

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE DOUTORADO**

**ESTRATÉGIAS PARA REDUÇÃO DO CICLO DE
MELHORAMENTO E DESENVOLVIMENTO DE
SEMENTES SINTÉTICAS DE MANDIOCA (*Manihot
esculenta* Crantz)**

Leila Verena da Conceição

**CRUZ DAS ALMAS - BAHIA
DEZEMBRO – 2025**

**ESTRATÉGIAS PARA REDUÇÃO DO CICLO DE
MELHORAMENTO E DESENVOLVIMENTO DE SEMENTES
SINTÉTICAS DE MANDIOCA (*Manihot esculenta* Crantz)**

Leila Verena da Conceição
Licenciada em Ciências Biológicas, UFRB, 2018

Tese apresentada ao Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito parcial para a obtenção do Título de Doutora em Ciências Agrárias (Área de Concentração: Agricultura Tropical).

Orientadora: Prof. Dr. Eder Jorge de Oliveira
Coorientador: Prof. Dr. Diego Fernando Marmolejo Cortes

**CRUZ DAS ALMAS - BAHIA
DEZEMBRO – 2025**

Ficha Catalográfica

FICHA CATALOGRÁFICA

C744e	<p>Conceição, Leila Verena da. Estratégias para redução do ciclo de melhoramento e desenvolvimento de sementes sintéticas de mandioca (<i>Manihot esculenta</i> Crantz)/ Leila Verena da Conceição - Cruz das Almas, Bahia, 2025. - 170f.; il.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Eder Jorge de Oliveira Co-orientadores: Prof. Dr. Diego Fernando Marmolejo Cortes.</p> <p>Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, Doutorado em Ciências Agrárias.</p> <p>1.Plantas - Melhoramento Genético. 2. Propagação clonal. 3. Mandioca (<i>Manihot esculenta</i> Crantz) I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas.</p> <p style="text-align: right;">CDD: 633.682</p>
--------------	---

Ficha elaborada pela Biblioteca Central de Cruz das Almas - UFRB.
Responsável pela Elaboração - Neubler Nilo Ribeiro da Cunha (Bibliotecário - CRB5/1578)
(os dados para catalogação foram enviados pelo usuário via formulário eletrônico).

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE DOUTORADO**

**ESTRATÉGIAS PARA REDUÇÃO DO CICLO DE MELHORAMENTO
E DESENVOLVIMENTO DE SEMENTES SINTÉTICAS DE
MANDIOCA (*Manihot esculenta* Crantz)**

Comissão Examinadora da Defesa de Tese de

Leila Verena da Conceição

Aprovada em 19 de dezembro de 2025

Prof. Dr. Eder Jorge de Oliveira
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB
Orientador

Prof. Dr. Ricardo Franco Cunha Moreira
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB
Examinador Interno

Profa. Dra. Rafaela Simão Abrahão Nóbrega
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB
Examinadora Interna

Prof. Dr. Rogério Ferreira Ribas
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB
Examinador Interno

Dr. Paulo Henrique Ramos Guimarães
Embrapa Mandioca e Fruticultura – EMBRAPA
Examinador Externo

DEDICATÓRIA

Com o coração transbordando de alegria, e uma imensa gratidão, dedico estas palavras a todos que, de maneira singular e inestimável, contribuíram para a realização e finalização deste curso. Esta conquista não é apenas minha, ela é nossa. A Deus, acima de tudo! Minha mais profunda gratidão por ter me concedido a saúde, a força e a permissão para trilhar este caminho, superar os desafios e, finalmente, chegar até este ponto. Sou grata pelas oportunidades e pelo sustento em cada passo.

Ao meu alicerce e motivação, minha amada família. Vocês são o meu alicerce, a minha base inabalável e a fonte inesgotável de minha força. Cada esforço, cada noite de estudo, foi motivado pelo amor que nos une. Ao meu filho, Arthur Lorenzo, meu anjo, você é a maior diferença e a mais doce motivação em minha vida. Mesmo sem ter a completa compreensão, seu sorriso, sua presença e a perspectiva de um futuro melhor ao seu lado foram o combustível para persistir, sobretudo na reta final deste curso. Meu amor, essa vitória também é sua.

À minha mãe, Marta, por você e para você! Minha definição viva de força, resiliência e coragem. Seu exemplo de vida me inspira a não desistir e seu apoio incondicional tem sido a âncora que me manteve firme nos momentos de tempestade. Sua fé em mim é um presente. Ao meu companheiro, Danilo, sua presença constante, sobretudo nos momentos mais desafiadores e de maior cansaço, foi um bálsamo. Seu apoio, sua paciência e o entendimento de minha dedicação foram essenciais. Obrigada por caminhar lado a lado comigo.

Aos meus guias da jornada, meus orientadores. Minha sincera gratidão pela dedicação, pelo empenho, pela partilha de conhecimento e pela orientação precisa que me guiaram ao longo desta trajetória acadêmica. À Equipe de Melhoramento Genético da Mandioca, vocês são incríveis! Minha admiração pelo trabalho e pela dedicação de vocês. Os saberes transmitidos por vocês foram cruciais para a qualidade deste trabalho.

Aos Amigos, os que me abraçaram e os que entenderam a ausência, obrigada por terem sido ombro, ouvido e por terem compreendido o silêncio e o afastamento que este período de estudo impôs. O carinho e a paciência de vocês foram um conforto necessário.

A todos, a minha eterna gratidão.

Vocês são parte fundamental desta história e desta realização.

AGRADECIMENTOS

Expresso minha profunda gratidão às instituições que forneceram o suporte acadêmico e técnico essencial para a elaboração e sucesso deste trabalho.

À Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), pela excelência em ensino, pesquisa e extensão, e por disponibilizar a estrutura e o ambiente acadêmico fundamentais para o meu desenvolvimento e a realização desta pesquisa.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) Mandioca e Fruticultura, pela valiosa parceria, pela infraestrutura de ponta e pela colaboração técnica inestimável que possibilitaram a execução deste estudo.

O apoio financeiro da instituição de fomento, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), pela concessão de bolsa de estudos. À Fundação Arthur Bernardes (FUNARBE) e à Fundação Syngenta e Fundação Bill & Melinda Gates pelo apoio financeiro, para realização desta pesquisa.

EPIGRAFE

Cada dia que vivo
Quero que seja um dia para dar
O melhor de mim.
Sou apenas um, mas não estou sozinho.
Meu melhor dia ainda é desconhecido.

Quebrei meu coração, lutei por cada conquista
Para provar o doce.
Enfrento a dor!
Subo e desço, mas, apesar de tudo,
Isso ainda permanece.

Eu quero!
Um momento no tempo,
Quando sou mais do que pensei que poderia ser,
Quando todos os meus sonhos
São um só coração batendo
E as respostas são todas para mim.

Dê-me um momento no tempo,
Quando estou correndo com o destino,
E, naquele momento do tempo,
Vou sentir, vou sentir a eternidade.
Vivi para ser o melhor,
Quero tudo, sem tempo para menos.

Coloquei os planos;
Agora, coloque a chance em minhas mãos.
Dê-me
Um momento no tempo...

Albert Hammond; John Bettis
One Moment in Time (1988).

ESTRATÉGIAS PARA REDUÇÃO DO CICLO DE MELHORAMENTO E DESENVOLVIMENTO DE SEMENTES SINTÉTICAS DE MANDIOCA (*Manihot esculenta* Crantz)

RESUMO GERAL

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é uma cultura importante para a segurança alimentar e a bioeconomia tropical, mas seu melhoramento genético é limitado por um ciclo reprodutivo prolongado e por uma baixa taxa de multiplicação vegetativa. Para superar esses gargalos, objetivou-se desenvolver e avaliar estratégias integradas focadas na aceleração da fase de seleção e na inovação em tecnologias de propagação clonal. No primeiro capítulo, demonstrou-se que a redução do tamanho das estacas-semente de 16 cm para 8 cm, associada a um tratamento com bioativadores e agroquímicos protetores, mantém a acurácia seletiva e os parâmetros genéticos em ensaios de avaliação clonal (CET), preliminares (PYT) e uniformes (UYT). Essa abordagem permitiu propor um novo esquema de seleção que incorpora a avaliação multiambiental precocemente, elimina uma etapa intermediária (PYT) e reduz o tempo total de desenvolvimento de cultivares de 11 para 9 anos, otimizando recursos e aumentando a eficiência dos programas de melhoramento. No segundo capítulo, o desenvolvimento de sementes sintéticas via encapsulamento de gemas axilares em alginato de sódio foi otimizado. Formulações com 1% de alginato e reticuladas com cloreto de cálcio (2%) apresentaram o melhor equilíbrio entre resistência mecânica, estabilidade hídrica e taxa de conversão *ex vitro*, superando as matrizes contendo hidróxido de cálcio ou amido. No terceiro capítulo, avançou-se na funcionalidade das sementes sintéticas através da engenharia de filmes biopoliméricos híbridos, combinando alginato com látex natural e fibra de coco. Estes compósitos exibiram maior integridade estrutural, modulação da liberação de água e promoveram uma emergência de plântulas equivalente ao controle, configurando-se como um sistema de revestimento promissor para a proteção e aclimatização de propágulos. Os resultados demonstram que a sinergia entre a otimização do manejo do material propagativo convencional e o desenvolvimento de tecnologias de encapsulamento baseadas em biopolímeros constitui um caminho viável para revolucionar a eficiência do melhoramento e a logística de distribuição de germoplasma de mandioca.

Palavras-chave: Melhoramento, Propagação clonal, Biocompósitos, *Manihot esculenta*.

STRATEGIES FOR REDUCING THE BREEDING CYCLE AND DEVELOPING SYNTHETIC SEEDS IN CASSAVA (*Manihot esculenta* Crantz)

GENERAL ABSTRACT

Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) plays a critical role in food security and the tropical bioeconomy; however, genetic improvement of the crop is constrained by a lengthy breeding cycle and a low rate of vegetative multiplication. To address these limitations, this study developed and evaluated integrated strategies aimed at accelerating selection processes and advancing clonal propagation technologies. The first chapter demonstrates that reducing stem cutting length from 16 cm to 8 cm, when combined with treatments using bioactivators and protective agrochemicals, maintains selection accuracy and key genetic parameters across clonal evaluation trials (CET), preliminary yield trials (PYT), and uniform yield trials (UYT). This innovation enabled the proposal of a revised breeding scheme in which multi-environment testing is introduced earlier, an intermediate evaluation stage (PYT) is eliminated, and total cultivar development time is shortened from 11 to 9 years, resulting in improved resource efficiency and greater breeding program effectiveness. In the second chapter, the development of synthetic seeds via encapsulation of axillary buds in sodium alginate was refined. Formulations containing 1% alginate and crosslinked with calcium chloride (2%) provided the most favorable balance among mechanical strength, water stability, and *ex vitro* conversion, outperforming matrices formulated with calcium hydroxide or starch. The third chapter advances synthetic seed functionality through the design of hybrid biopolymeric films combining alginate, natural rubber latex, and coconut fiber. These biocomposites showed enhanced structural integrity, regulated water release, and seedling emergence comparable to that of non-encapsulated controls, highlighting their potential as an effective coating system for propagule protection and acclimatization. Taken together, the findings demonstrate that combining optimized management of conventional propagative material with biopolymer-based encapsulation technologies offers a practical and transformative approach to improving breeding efficiency and modernizing cassava germplasm distribution systems.

Keywords: Plant breeding; Clonal propagation; Biocomposites; *Manihot esculenta*.

LISTA DE TABELAS

CAPITULO 1

Tabela 1- Lista de clones de mandioca avaliados para várias características agrônômicas em diferentes estágios de melhoramento: ensaio de avaliação clonal (CET), ensaio preliminar de rendimento (PYT) e ensaio de rendimento uniformizado (UYT).....66

Tabela 2- Hereditariedade em sentido amplo (H^2) e hereditariedade de Cullis (H_c^2) para características de crescimento, vigor e rendimento de raízes em diferentes ensaios de melhoramento de mandioca (ensaio de avaliação clonal – CET, ensaio de rendimento preliminar – PYT e ensaio de rendimento uniforme – UYT), considerando tamanho padrão de estacas (16 cm) e tamanho pequeno de estacas com tratamento agroquímico (8MP).....75

Tabela 3- Comparação de esquemas convencionais de multiplicação e seleção (plântulas não tratadas de 16 cm a 16 cm) e plântulas de 8 cm de comprimento tratadas com agroquímicos e alternativas (8MP) de programas de melhoramento de mandioca.....85

CAPITULO 2

Tabela 1- Formulações experimentais para produção de filmes poliméricos e sementes sintéticas.....106

Tabela 2- Parâmetros e metodologias para caracterização de filmes poliméricos.106

Tabela 3- Características morfológicas medidas em plântulas de mandioca oriundas de sementes sintéticas.....109

Tabela 4- ANOVA dos parâmetros físicos e funcionais dos filmes para sementes sintéticas de mandioca.....111

Tabela 5- Análises de variância para as características morfológicas em gemas únicas de mandioca submetidas a diferentes formulações de encapsulamento.....114

CAPITULO 3

Tabela 1- Tratamentos contendo combinações de biopolímeros aplicados ao desenvolvimento de sementes sintéticas de mandioca.....137

Tabela 2- Escala visual para avaliação da eficiência da cobertura dos filmes biopoliméricos.....139

Tabela 3- Formulações de biopolímeros encapsulantes, compostos por alginato de sódio, cloreto de cálcio, látex e fibra de coco.....140

Tabela 4- Características físico-funcionais avaliadas nos filmes biopoliméricos (alginato de sódio, látex e fibra de coco) secos e hidratados.....	142
Tabela 5- Formulações de cobertura biopolimérica selecionadas para o encapsulamento de gemas de mandioca.....	143
Tabela 6- Características agronômicas avaliadas nos ensaios de desempenho das sementes sintéticas de mandioca.....	145
Tabela 7- Análise de variância para as características de cobertura, propriedades reológicas e absorção de água dos filmes biopoliméricos utilizados no encapsulamento de gemas maduras de mandioca.....	146
Tabela 8- Análise de variância das propriedades estruturais dos filmes biopoliméricos, para as características UMD (Umidade); HDT(Hidratação); SLD (Solubilidade); BDG (Biodegradabilidade).....	149
Tabela 9- Análises de variância para as características morfológicas em gemas únicas de mandioca submetidas a diferentes formulações de encapsulamento.....	153
Tabela 10- Análise de variância para características de biomassa médio por planta em sementes sintéticas biopoliméricas de mandioca.....	157

LISTA DE FIGURAS

REFERENCIAL TEÒRICO

Figura 1- Esquema de ciclo de melhoramento convencional da mandioca. Representando o aumento do número de repetições, tamanho de parcelas e locais para os diferentes ensaios (ensaios de avaliação de mudas (SET); ensaios de avaliação clonal (CET); ensaios preliminares de rendimento replicado (PYT); ensaios avançados de rendimento (AYT) e ensaios uniformes de produção (UYT).....32

CAPÍTULO 1

Figura 1- Estimativas dos componentes da variância fenotípica para características relacionadas ao crescimento e vigor da planta (altura da planta, número de hastes por planta, arquitetura da planta, retenção foliar, estande e vigor do caule) nos diferentes ensaios do programa de melhoramento de mandioca (testes de avaliação clonal – CET, ensaio preliminar de rendimento – PYT e ensaios de rendimento uniforme – UYT, considerando estacas-semente de tamanho padrão (16 cm) e tamanho reduzido com tratamento agroquímico (8 MP). As proporções de variância fenotípica atribuídas a cada termo foram estimadas usando um modelo linear misto e são apresentadas em cores diferentes.....72

Figura 2- Estimativas dos componentes da variância fenotípica para características de rendimento (teor de matéria seca da raiz, número de raízes por planta, rendimento da parte aérea, rendimento de raiz fresca e rendimento de raiz seca) nos diferentes ensaios do programa de melhoramento da mandioca (testes de avaliação clonal – CET, ensaio preliminar de rendimento – PYT e ensaio de rendimento uniforme – UYT, considerando estacas-semente de tamanho padrão (16cm) e tamanho reduzido com tratamento agroquímico (8MP). As proporções de variância fenotípica atribuídas a cada termo foram estimadas usando um modelo linear misto e são apresentadas em cores diferentes.....73

Figura 3- Boxplot da melhor predição linear não viesada + a média geral (BLUP.U) em diferentes genótipos de mandioca avaliados para características de crescimento e vigor da planta (altura da planta – PH, número de hastes por planta – NHP, arquitetura da planta – PIArc, retenção foliar – LeRet, estande – Stand, vigor do caule – StVig) nos diferentes testes do programa de melhoramento de mandioca (ensaio de avaliação clonal – CET, ensaio de rendimento preliminar – PYT e ensaio de rendimento uniforme – UYT, considerando estacas de sementes de tamanho padrão (16 cm) e tamanho reduzido com tratamento agroquímico (8MP)..... 78

Figura 4- Boxplot da melhor predição linear não viesada + a média geral (BLUP.U) em diferentes genótipos de mandioca avaliados para características de rendimento (teor de matéria seca nas raízes - DMC, número médio de raízes por planta - NRP, rendimento da parte aérea - ShY, rendimento de raiz fresca - FRY e rendimento de raiz seca - DRY) nos diferentes testes do programa de melhoramento de mandioca (ensaio de avaliação clonal - CET, ensaio de rendimento preliminar - PYT e ensaio de rendimento uniforme - UYT,

considerando estacas de sementes de tamanho padrão (16 cm) e tamanho reduzido com tratamento agroquímico (8MP).....79

Figura 5- Concordância na classificação de clones de mandioca (A) e correlação de Pearson entre os índices de seleção (B) obtidos em diversos ensaios do programa de melhoramento de mandioca. Esses ensaios incluem ensaios de avaliação clonal (CET), ensaios preliminares de rendimento (PYT) e ensaios de rendimento uniforme (UYT). A análise considera mudas de tamanho padrão (16 cm) e de tamanho reduzido com tratamento agroquímico (8MP). Os gráficos representam os índices de seleção derivados do BLUP.U da análise conjunta, considerando avaliações em diferentes ambientes e anos, como os ensaios EPR 8MP e ERU 16 cm e 8MP. Nos gráficos de correlação, a linha preta representa a curva de regressão linear e a faixa cinza representa o intervalo de confiança de 95%. A análise de Bland-Altman avalia a concordância na classificação dos clones, onde a linha azul escura contínua representa o viés estimado e as duas linhas azuis claras representam os limites superior e inferior de confiança com 95% de concordância.....82

Figura 6- Esquema convencional de melhoramento genético da mandioca (esquerda) utilizando estacas de 16 cm e esquema alternativo utilizando estacas-semente de 8 cm tratadas com agroquímicos (direita). O esquema representa as principais etapas do programa de melhoramento genético da mandioca, que são: SDN, viveiro de mudas; CET, ensaio de avaliação clonal; PYT, ensaio preliminar de rendimento; AYT, ensaio avançado de rendimento; UYT, ensaio uniforme de rendimento; teste com agricultores; multiplicação; lançamento. No esquema alternativo (direita), as principais modificações em comparação com o sistema convencional estão destacadas em vermelho..... 84

CAPÍTULO 2

Figura 1- Processo de obtenção e padronização de gemas axilares maduras da cultivar BRS Novo Horizonte. Corte de precisão com serra circular para obtenção de segmentos uninodais padronizados (2,5 cm) prontos para o processo de encapsulamento..... 108

Figura 2- Aparência e estabilidade estrutural dos filmes de alginato de sódio em função da concentração e exposição aos reticulantes, cloreto de cálcio (CaCl_2), e hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2)..... 110

Figura 3- Influência da concentração de alginato na umidade, intumescimento, biodegradabilidade e solubilidade de filmes reticulados com cloreto de cálcio.....112

Figura 4- Gemas maduras encapsuladas com alginato de sódio (0,8; 1; 2; 4 e 6%), reticulada com cloreto de cálcio (10%), hidróxido de cálcio (10%) e amido de milho (10%), no desenvolvimento de sementes sintéticas de mandioca..... 114

Figura 5- Efeito de formulações encapsulantes na germinação, crescimento (altura da planta e diâmetro do caule) e vigor de gemas maduras de mandioca..... 115

Figura 6- Efeito de diferentes formulações encapsulantes em características associadas à produção de biomassa da parte aérea e raízes em gemas maduras de mandioca..... 116

CAPÍTULO 3

Figura 1- Modelo de escala empregada para avaliação de cobertura dos filmes biopolimérico em manivas sintéticas de mandioca..... 139

Figura 2- Aspecto das gemas encapsuladas nas formulações biopoliméricas avaliadas..... 146

Figura 3- Desempenho comparativo das formulações biopoliméricas selecionadas quanto à eficiência de cobertura (%), força reológica (N) e porcentagem de absorção de água (%). Barras seguidas pela mesma letra minúscula dentro de cada parâmetro não diferem estatisticamente pelo teste de agrupamento de Scott-Knott a 5% de probabilidade..... 147

Figura 4- Propriedades físico-estruturais dos filmes biopoliméricos: cobertura, resistência reológica e absorção. Médias seguidas pela mesma letra pertencem ao mesmo grupo pelo critério de agrupamento de Scott-Knott a 5% de probabilidade..... 150

Figura 5- Desempenho comparativo das formulações biopoliméricas nos parâmetros de UMD (Umidade); HDT (Hidratação); SLD (Solubilidade); BDG (Biodegradação) 151

Figura 6- Formulações biopoliméricas aplicadas ao encapsulamento de gemas maduras de mandioca..... 153

Figura 7- Germinação de gemas de mandioca sob diferentes formulações de encapsulamento biopolimérico..... 154

Figura 8- Síntese do desempenho fisiológico das gemas encapsuladas em diferentes formulações biopoliméricas para as características Germ= Germinação; AP= Altura da Planta; DC= Diâmetro do caule; MFPA = massa fresca da parte aérea; MSPA = massa seca da parte aérea; MFRA = massa fresca de raízes; MSRA = massa seca de raízes..... 155

Figura 9- Desempenho da formulação fibra de coco associadas a látex, no desenvolvimento de sementes sintéticas..... 164

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO GERAL.....	18
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1.	Aspectos gerais da cultura da mandioca.....	21
2.2.	Importância econômica.....	24
2.3.	Melhoramento genético da mandioca.....	26
2.3.1.	Seleção dos parentais e hibridação em mandioca.....	29
2.3.2.	Seleção clonal.....	31
2.3.3.	Fundamentos genéticos, quantitativos e ambientais no melhoramento da mandioca.....	33
2.4.	Gargalos associados à baixa taxa de multiplicação da mandioca.....	37
2.5.	Técnicas atuais de multiplicação da mandioca.....	39
2.6.	Sementes sintéticas como eixo tecnológico para a redução do ciclo de melhoramento da mandioca.....	42
3.	REREFÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46
	CAPÍTULO 1 – NOVO PROTOCOLO PARA MULTIPLICAÇÃO RÁPIDA DE MANDIOCA EM CONDIÇÕES DE CAMPO: UMA PERSPECTIVA SOBRE O MELHORAMENTO RÁPIDO.....	59
1.	INTRODUÇÃO	61
2.	MATERIAL E MÉTODOS	64
2.1.	Material vegetal	64
2.2.	Corte e tratamento das manivas.....	67
2.3.	Características avaliadas.....	68
2.4.	Análise dos dados.....	69
3.	RESULTADOS.....	71
3.1.	Análise de Componentes de Variância.....	71
3.2.	Parâmetros genéticos.....	73
3.3.	Distribuição das características de crescimento, vigor e produtividade de clones de mandioca.....	76
3.4.	Coincidência na classificação dos clones de mandioca nas diferentes fases de seleção.....	80

3.5. Utilização da abordagem 8MP no esquema de seleção no melhoramento da mandioca.....	82
4. DISCUSSÃO	86
4.1. Componentes de variância e parâmetros genéticos em ensaios com estacas de tamanho padrão e reduzido.....	86
4.2. Classificação da capacidade dos clones em ensaios com estacas de tamanho padrão e reduzido.....	88
4.3. Novo esquema de seleção baseado no tamanho reduzido de corte (8MP) para acelerar o desenvolvimento de cultivares de mandioca.....	89
4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	93
5. REFERÊNCIAS.....	95
CAPÍTULO 2- DESENVOLVIMENTO DE SEMENTES SINTÉTICAS COMO ESTRATÉGIA PARA AUMENTO DA TAXA MULTIPLICATIVA EM MANDIOCA.....	99
1. INTRODUÇÃO	102
2. MATERIAL E MÉTODOS	104
2.1. Produção de filmes poliméricos e delineamento experimental.....	104
2.1.1. Formulação e produção de filmes poliméricos.....	105
2.1.2. Caracterização físico-química dos filmes poliméricos.....	106
2.2. Produção e avaliação de sementes sintéticas de mandioca.....	107
2.2.1. Material vegetal e preparação do explante.....	107
2.2.2. Protocolo de produção das sementes sintéticas.....	108
2.2.3. Parâmetros agronômicos avaliados.....	109
2.4. Análise dos dados.....	109
3. RESULTADOS.....	110
3.1. Caracterização físico-funcional de matrizes de alginato reticuladas com $CaCl_2$.....	110
3.1.1. Umidade dos filmes.....	111
3.1.2. Índice de Intumescimento.....	112
3.1.3. Biodegradabilidade.....	112
3.1.4. Solubilidade.....	113
3.2. Efeito das formulações de encapsulamento na germinação e no desempenho agronômico inicial.....	113
4. DISCUSSÃO.....	117

4.1.	Interação entre matriz polimérica, cinética de reticulação iônica e desempenho fisiológico das sementes sintéticas de mandioca.....	117
4.2.	Propriedades físico-funcionais das matrizes e implicações na emergência das gemas.....	119
4.3.	A dicotomia do agente reticulante: CaCl_2 versus $\text{Ca}(\text{OH})_2$	120
4.4.	Análise dos filmes poliméricos como modelos de encapsulamento de gemas de mandioca.....	121
4.5.	Sensibilidade fisiológica e o custo do encapsulamento.....	122
4.6.	Dualidades fundamentais da tecnologia de sementes sintéticas.....	123
4.7.	Direções futuras para superar a dualidade estrutural.....	124
5.	CONCLUSÃO	125
6.	REREFÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126
	CAPÍTULO 3- DESAFIOS E AVANÇOS NA FORMULAÇÃO DE SEMENTES SINTÉTICAS DE MANDIOCA: EVIDÊNCIAS ESTRUTURAIIS E FISIOLÓGICAS	130
1.	INTRODUÇÃO	133
2.	MATERIAL E MÉTODOS	136
2.1.	Local de condução dos experimentos e material vegetal.....	136
2.2.	Delineamento experimental e concepção geral do estudo.....	136
2.2.1.	Experimento 1: formulação e aplicação de revestimentos biopoliméricos.....	137
2.2.2.	Experimento 2: Caracterização estrutural e funcional de filmes biopoliméricos.....	139
2.2.3.	Experimento 3: Encapsulamento de gemas e avaliação agrônômica ex vitro das sementes sintéticas de mandioca.....	142
2.3.	Implantação e avaliação das sementes sintéticas.....	144
2.4.	Análise estatística.....	145
3.	RESULTADOS	146
3.1.	Propriedades funcionais de matrizes biopoliméricas para encapsulamento de gemas.....	146
3.1.1.	Eficiência de cobertura e integridade do filme.....	147
3.1.2.	Comportamento reológico e resistência mecânica.....	148
3.1.3.	Capacidade de absorção hídrica.....	148
3.2.	Caracterização estrutural e estabilidade físico-química dos filmes.....	149

3.2.1.	Propriedades hídricas dos filmes biopoliméricos.....	150
3.2.2.	Solubilidade em Água.....	152
3.2.3.	Biodegradabilidade em substrato.....	152
3.3.	Desempenho agrônômico <i>ex vitro</i> das sementes sintéticas.....	152
3.3.1.	Germinação e vigor.....	153
3.3.2.	Crescimento vegetativo e alocação de biomassa em plântulas oriundas de sementes sintéticas.....	155
4.	DISCUSSÃO.....	159
4.1.	Efeitos estruturais, fisiológicos e funcionais de matrizes biopoliméricas no encapsulamento <i>ex vitro</i> de mandioca.....	159
4.2.	Desempenho estrutural e estabilidade físico-química dos filmes biopoliméricos.....	162
4.3.	Estratégias biopoliméricas mais promissoras para o encapsulamento da mandioca.....	163
4.4.	Perspectivas futuras para o desenvolvimento de sementes sintéticas de mandioca.....	165
5	CONCLUSÃO	66
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	167

1. INTRODUÇÃO GERAL

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é uma das culturas alimentares mais importantes das regiões tropicais, desempenhando papel central na segurança alimentar, na estabilidade socioeconômica de populações rurais e na sustentabilidade de sistemas agrícolas de baixa intensidade tecnológica. Caracteriza-se por elevada rusticidade, ampla adaptação a solos de baixa fertilidade e tolerância à deficiência hídrica (BESTER et al., 2021), atributos que a tornam estratégica para a agricultura familiar e para ambientes marginalizados do ponto de vista agrônomo (IMMANUEL et al., 2024).

No cenário global, a mandioca ocupa posição de destaque tanto em sistemas tradicionais de subsistência quanto em cadeias agroindustriais modernas. Segundo dados recentes da (FAO, 2024), a Nigéria lidera a produção mundial, seguida pela República Democrática do Congo, Tailândia, Indonésia e Brasil. Esses países concentram não apenas a produção, mas também grande parte da dependência alimentar e econômica associada à cultura, evidenciando sua relevância estratégica em um contexto de crescimento populacional, mudanças climáticas e instabilidade nos sistemas globais de produção de alimentos.

No Brasil, a mandioca consolidou-se historicamente como um pilar social, econômico e cultural, estando presente em todas as regiões do país, com maior expressão nas regiões Norte e Nordeste (IBGE, 2025). Além de sua importância alimentar, a cultura apresenta crescente relevância industrial, sendo amplamente utilizada nos setores alimentício, de papel e celulose, têxtil, cosmético e de biocombustíveis, ampliando oportunidades de agregação de valor e geração de renda (OGUNDAHUNSI et al., 2024). Apesar dessa multifuncionalidade, o desempenho produtivo nacional permanece aquém do potencial genético da espécie.

A produção brasileira estimada em 19,3 milhões de toneladas em 2024 (CONAB, 2025; FAO, 2024; IBGE, 2025), representa uma recuperação recente após períodos de retração. Entretanto, a produtividade média de 15,43 t ha⁻¹ é bastante inferior ao potencial produtivo observado em condições experimentais. Essa lacuna produtiva decorre de um conjunto de fatores inter-relacionados, incluindo a baixa adoção de insumos modernos, limitações no manejo

agronômico, fragilidade na assistência técnica e, sobretudo, a predominância de variedades geneticamente obsoletas nos sistemas produtivos (BECERRA-LOPEZ LAVALLE et al., 2021).

Nesse contexto, o melhoramento genético da mandioca assume papel central como estratégia de incremento da produtividade, estabilidade fenotípica e resistência a estresses bióticos e abióticos. Nas últimas décadas, avanços significativos foram alcançados com a incorporação de ferramentas biométricas e genômicas, permitindo maior eficiência na seleção de genótipos superiores (CEBALLOS et al., 2015; CIAT, 2026). Estudos conduzidos no Brasil demonstram o sucesso da aplicação de modelos mistos, bem como de abordagens de seleção genômica, na predição do valor genético e no aumento da acurácia seletiva em programas de melhoramento da mandioca (TORRES et al., 2019).

Apesar desses avanços metodológicos, a cultura da mandioca ainda apresenta um dos ciclos de melhoramento mais longos entre as espécies cultivadas, frequentemente superiores a 10–12 anos, em função de sua natureza perene, propagação vegetativa e limitações na multiplicação de material propagativo. A dependência quase exclusiva de manivas-semente representa um gargalo estrutural crítico para a rápida avaliação, multiplicação e difusão de novas cultivares. O estabelecimento de um hectare de mandioca requer, em média, de 14 a 16 mil manivas, o que implica elevado custo, grande volume de material e complexidade logística (CEBALLOS; KULAKOW; HERSHEY, 2012).

Além do aspecto operacional, a propagação convencional por estacas apresenta curta vida útil, baixa taxa multiplicativa e elevado risco de disseminação de patógenos sistêmicos, contribuindo para a manutenção de doenças e para a redução da longevidade produtiva das lavouras. Diante desse cenário, a redução do ciclo de melhoramento e o aumento da eficiência da multiplicação vegetativa configuram-se como desafios científicos e tecnológicos prioritários. Estratégias como a redução do tamanho das manivas-semente apresentam elevado potencial, uma vez que permitem maior aproveitamento do material vegetal, redução de custos de transporte e plantio e, sobretudo, aceleração das fases iniciais e intermediárias dos programas de melhoramento, sem comprometer o desempenho agrônomo e a acurácia seletiva.

Paralelamente, tecnologias inovadoras de propagação clonal, como o desenvolvimento de sementes sintéticas, emergem como alternativas

promissoras para superar limitações históricas da cultura. As sementes sintéticas baseiam-se no encapsulamento de gemas ou outros propágulos vegetativos em matrizes poliméricas, possibilitando elevadas taxas de multiplicação, armazenamento por períodos prolongados, transporte seguro e manutenção da identidade genética e sanitária do material vegetal (PARMAR; STURM; HENSEL, 2017). Essa abordagem tem sido amplamente explorada em culturas clonais e apresenta elevado potencial de aplicação em programas de melhoramento, produção de material básico e difusão de cultivares de mandioca.

Nesse contexto, a presente tese teve como objetivo geral desenvolver e avaliar estratégias integradas para a redução do ciclo de melhoramento da mandioca e para o desenvolvimento de tecnologias de sementes sintéticas funcionalmente eficientes. Para isso, avaliou-se o impacto da redução do tamanho das manivas-semente nas fases iniciais (CET), intermediárias (PYT) e finais (UYT) de um programa de melhoramento genético, comparando manivas de 8 cm (MandiPlus) e 16 cm (controle). Foram estimados parâmetros genéticos sob ambos os tratamentos e avaliada a consistência do ranqueamento dos clones, visando inferir a robustez da seleção e o potencial de aceleração do ciclo de desenvolvimento de novas variedades.

De forma complementar, investigou-se o encapsulamento de gemas maduras de mandioca utilizando diferentes combinações de alginato de sódio, cloreto de cálcio, hidróxido de cálcio e amido, bem como o desenvolvimento de matrizes biopoliméricas alternativas para o revestimento dos propágulos. Avaliaram-se as propriedades estruturais, mecânicas e hídricas dos filmes de encapsulamento, assim como a resposta fisiológica das gemas encapsuladas quanto à germinação e ao vigor em condições *ex vitro*. Por fim, foram identificadas formulações promissoras para aplicação no desenvolvimento, armazenamento e transporte de sementes sintéticas de mandioca, contribuindo para a modernização dos programas de melhoramento e para a sustentabilidade da cadeia produtiva da cultura.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Aspectos gerais da cultura da mandioca

A mandioca é a única espécie domesticada do gênero *Manihot*, pertencente à família Euphorbiaceae, sendo originária da bacia amazônica ocidental. Trata-se de uma planta perene, de ciclo relativamente curto, com propagação tanto sexuada quanto assexuada, caracterizada pela formação de raízes tuberosas ricas em amido, que constituem seu principal produto de interesse alimentar e industrial (COCK; CONNOR, 2021). A domesticação da espécie ocorreu inicialmente por povos ameríndios, configurando um dos mais antigos processos de domesticação vegetal nas Américas.

Evidências arqueológicas indicam que o cultivo da mandioca no Brasil remonta a aproximadamente 10.350 anos A.P., no sudoeste da Amazônia, região reconhecida como um dos centros primários de domesticação de plantas (LOMBARDO et al., 2020). A relevância histórica da mandioca na formação socioeconômica brasileira é amplamente documentada, destacando-se, inclusive, sua presença nos debates políticos do início do século XIX. Durante a Assembleia Constituinte de 1823, chegou-se a propor que apenas indivíduos com renda equivalente a 150 alqueires de farinha de mandioca pudessem exercer o direito ao voto, proposta que ficou conhecida como “Constituição da Mandioca”. Embora o texto não tenha sido promulgado, sua existência ilustra o papel central da cultura na economia colonial e imperial brasileira (FILGUEIRAS; HOMMA, 2016).

A expansão da mandioca para outros continentes ocorreu a partir do século XVI, quando comerciantes portugueses introduziram a cultura na África, inicialmente como provisão alimentar para embarcações que realizavam o tráfico transatlântico. O conhecimento sobre o processamento da raiz em farinha foi adquirido junto aos povos tupinambás do litoral brasileiro, permitindo sua rápida adoção em territórios africanos a partir de 1600 (JONES, 1959). Esse processo marcou o início da ampla difusão da mandioca fora do continente americano, consolidando-a como uma cultura global.

Estudos genéticos conduzidos por Olsen; Schaal (2001) e Olsen (2004) indicaram que a mandioca foi domesticada uma única vez, a partir da subespécie *Manihot esculenta* ssp. *flabellifolia*. Essa hipótese foi posteriormente corroborada por (LÉOTARD et al., 2009), que analisaram uma amostra mais abrangente da

subespécie e incluíram espécies aparentadas do gênero *Manihot* com potencial histórico de hibridização. Tais evidências reforçam a hipótese de um único evento de domesticação seguido por ampla diversificação genética mediada pela seleção humana e pela adaptação ambiental.

Registros paleoetnobotânicos indicam que a mandioca se dispersou pela região neotropical por meio da Cordilheira dos Andes há aproximadamente 6.500 anos A.P. Estudos protolinguísticos também apontam sua ampla distribuição na América do Sul e na Mesoamérica antes do estabelecimento de sociedades agrícolas sedentárias, entre 4.000 e 3.000 anos A.P. (BROWN et al., 2013). As migrações dos povos ameríndios contribuíram significativamente para essa dispersão, embora a origem e expansão de determinadas etnias tenham ocorrido após a domesticação da espécie (ERIKSEN, 2011).

A diferenciação entre mandiocas doces e amargas resultou de processos evolutivos complexos, envolvendo tanto dispersão natural quanto intercâmbio entre raças nativas. No Brasil, essa dispersão ocorreu de forma particularmente rápida ao longo dos principais rios amazônicos, muito antes da chegada dos europeus ao continente (ALVES-PEREIRA et al., 2020). A estrutura filogenômica robusta do gênero *Manihot* sustenta essa história evolutiva altamente diversificada, com a mandioca cultivada originando-se de seu progenitor selvagem em planícies tropicais ao longo da borda sul da bacia amazônica (LÉOTARD et al., 2009; SIMON et al., 2022).

Atualmente, o gênero *Manihot* compreende cerca de 120 espécies conhecidas, distribuídas em uma ampla variedade de habitats tropicais e subtropicais das Américas (SIMON et al., 2022). A domesticação da mandioca ocorreu há cerca de 9.000 anos, e a América do Sul é reconhecida como seu principal centro de origem e diversidade genética (ALVES-PEREIRA et al., 2020). A alta adaptabilidade da cultura a solos marginais e a flexibilidade de seu ciclo de crescimento favoreceram sua ampla expansão global (CEBALLOS et al., 2015).

As raízes de mandioca são classificadas em dois grandes grupos, i.e. doces e amargas. Essa distinção está associada principalmente ao teor de glicosídeos cianogênicos e à toxicidade das raízes. A hipótese mais aceita é que ambos os grupos derivam de um ancestral comum com toxicidade intermediária, submetido a processos seletivos independentes ao longo da domesticação (CLEMENT et al., 2010; ELIAS et al., 2004). As variedades doces apresentam

baixos teores de compostos cianogênicos e podem ser consumidas após cozimento simples, enquanto as variedades amargas exigem processamento e desintoxicação antes do consumo, sendo tradicionalmente utilizadas na produção de farinha, beiju, pães, bolos e bebidas fermentadas (CLEMENT et al., 2010; ZEKARIAS; BASA; HERAGO, 2019)

Entre as principais mudanças morfológicas associadas ao processo de domesticação destacam-se a redução da dormência das sementes, o aumento do tamanho dos frutos e sementes, a perda de mecanismos de dispersão natural, a redução de substâncias tóxicas e o aumento da uniformidade fenotípica das plantas (BESTER et al., 2021). Todas as partes da mandioca (folhas, caules e raízes) são aproveitadas na alimentação humana, na ração animal e em aplicações farmacêuticas, conferindo elevada versatilidade à cultura (FATHIMA et al., 2023).

Historicamente, a mandioca foi considerada uma cultura de subsistência, sobretudo em países da África, Ásia e América Latina, em função de sua capacidade de produzir em solos pobres, permitir colheita ao longo de todo o ano, propagar-se facilmente por estacas e apresentar boa rentabilidade com baixo investimento inicial (FILGUEIRAS; HOMMA, 2016). No entanto, nas últimas décadas, sua relevância econômica tem se ampliado substancialmente, impulsionada pela crescente demanda industrial por amido.

O amido de mandioca destaca-se por suas propriedades funcionais e ampla aplicação industrial, sendo utilizado como agente estrutural em alimentos processados, especialmente nas indústrias de confeitaria, panificação e processamento de carnes, além de atuar como aditivo em bebidas e produtos alimentícios (NUWAMANYA et al., 2010; WATERSCHOOT et al., 2015). Também possui importância estratégica nos setores têxtil, papelero, de plásticos biodegradáveis e da construção civil (FATHIMA et al., 2023; NUWAMANYA et al., 2010).

Comparativamente a outros amidos comerciais, o amido de mandioca apresenta baixo teor de resíduos, menor conteúdo de amilose e cadeias de amilopectina de alto peso molecular, características que conferem propriedades reológicas específicas e elevado valor tecnológico em comparação com alguns cereais (BREUNINGER; PIYACHOMKWAN; SRIROTH, 2009). Entre os alimentos básicos amiláceos, destaca-se ainda por sua elevada produtividade de

carboidratos, sendo aproximadamente 40% superior ao arroz e 25% superior ao milho (TONUKARI, 2004).

Do ponto de vista nutricional, a mandioca constitui uma fonte acessível e econômica de energia, ocupando a terceira posição mundial no consumo humano de carboidratos, atrás apenas do arroz e do milho (FATHIMA et al., 2023). Uma composição típica da raiz apresenta cerca de 70% de umidade, 24% de amido, 2% de fibras, 1% de proteínas e 3% de minerais e outros compostos (TONUKARI, 2004). Estudos indicam ainda que seu consumo moderado pode apresentar benefícios nutricionais, incluindo redução do colesterol e efeitos hipoglicêmicos e antidiabéticos (ZHU, 2015).

No Brasil, a mandioca é cultivada em praticamente todas as regiões, sob ampla diversidade de condições edafoclimáticas e sistemas de manejo. Sua elevada plasticidade fenotípica e resiliência ambiental permitem bom desempenho produtivo mesmo em condições adversas (BESTER et al., 2021). Essa heterogeneidade ambiental explica a grande diversidade de variedades locais, embora os efeitos ambientais continuem sendo determinantes para o desenvolvimento e a produtividade da cultura.

2.2. Importância econômica

A mandioca figura entre as principais culturas agrícolas do Brasil, desempenhando papel fundamental na segurança alimentar, na geração de renda e no abastecimento industrial. Sua relevância socioeconômica está associada à chamada bimodalidade produtiva, que reflete duas realidades contrastantes: a produção familiar de base tradicional, predominante nas Regiões Norte e Nordeste, e o cultivo altamente tecnificado do Centro-Sul, voltado majoritariamente à agroindústria (CARDOSO et al., 2019; EMDAGRO, 2025).

A produção conduzida por agricultores familiares responde por parcela expressiva da produção nacional, com destaque para os estados do Pará, Bahia, Ceará e Amazonas. Nesses sistemas, a mandioca é destinada principalmente ao consumo in natura, à alimentação animal e à produção artesanal de farinha, sustentando economias locais e o abastecimento regional (EMBRAPA, 2024). Em contraste, o segmento tecnificado do Centro-Sul caracteriza-se pelo uso intensivo de mecanização, cultivares melhoradas e

insumos industriais, direcionando a produção para o processamento de fécula e farinha refinada, com destaque para Paraná, São Paulo e Mato Grosso do Sul (PONCE; RIBEIRO; TELLES, 2020; EMDAGRO, 2025).

Dados do IBGE (2025) e da CONAB (2025) indicam que Pará e Paraná alternam-se como principais produtores nacionais, evidenciando o contraste entre os modelos produtivos familiar e industrial. Em 2023, a produção nacional alcançou aproximadamente 19,13 milhões de toneladas em 1,24 milhão de hectares, com rendimento médio de 15,4 t ha⁻¹. Em 2024, a produção manteve-se estável, totalizando cerca de 19,06 milhões de toneladas, apesar da leve redução da área cultivada (CONAB, 2025).

Segundo a (EMBRAPA, 2025), o valor da produção nacional atingiu R\$ 19,178 bilhões em 2023. A cultura figura entre as maiores empregadoras do meio rural, especialmente nas Regiões Norte e Nordeste, contribuindo para a fixação do homem no campo e para o fortalecimento das economias locais (FAPESPA, 2025).

As diferenças regionais de produtividade são marcantes. Enquanto o Paraná apresenta média de 25,4 t ha⁻¹, a Bahia registra apenas 7,8 t ha⁻¹, evidenciando profundas desigualdades tecnológicas (IBGE, 2025). Essas disparidades não refletem ausência de conhecimento científico, mas sim limitações na transferência de tecnologia, no acesso a insumos e material propagativo de qualidade, na organização da cadeia produtiva e nas condições edafoclimáticas. Assim, a existência de centros de pesquisa, embora estratégica, não é suficiente para garantir altos rendimentos sem políticas efetivas de adoção tecnológica no campo.

No setor industrial, a mandioca ocupa posição estratégica, sendo amplamente utilizada na produção de alimentos e produtos não alimentares. A fécula integra cadeias produtivas de massas, biscoitos, fermentos, conservas e embutidos, além de abastecer indústrias de papel, colas e tintas (PONCE; RIBEIRO; TELLES, 2020). Nos últimos anos, também se observa avanço na produção de etanol e outros biocombustíveis a partir da mandioca, configurando uma alternativa sustentável frente à escassez de combustíveis fósseis (LU; DING; WU, 2011).

O setor de fécula registrou, em 2023, o maior volume dos últimos oito anos, com produção de 676,7 mil toneladas, representando aumento de 29%

em relação a 2022 (CEPEA, 2026). Em 2024, o consumo aparente foi estimado em 639,2 mil toneladas, com exportações de 29,1 mil toneladas, correspondendo a crescimento de 44% em relação ao ano anterior (CEPEA, 2026).

No mercado externo, o Brasil exportou 35,6 mil toneladas de fécula de mandioca em 2024, totalizando cerca de US\$ 27,3 milhões. Os principais destinos foram Estados Unidos, Bolívia, África do Sul e Colômbia (EMBRAPA, 2024). O estado do Mato Grosso do Sul destaca-se como líder nacional em exportações, respondendo por aproximadamente 23 mil toneladas em 2022 e mantendo essa posição em 2023 (SEMADESC, 2024).

Em escala global, a produção de mandioca aproxima-se de 320 milhões de toneladas, sendo 63% proveniente da África, 28% da Ásia e 9% das Américas (FAO, 2024). A cultura é essencial para a segurança alimentar de cerca de um bilhão de pessoas em mais de 100 países (VELMURUGAN et al., 2024). Até 1991, o Brasil liderava a produção mundial, mas atualmente ocupa a quinta posição, atrás de Nigéria, Tailândia, República Democrática do Congo e Gana (FAO, 2024).

Países asiáticos, como Tailândia e Indonésia, destacam-se pelo elevado grau de industrialização e agregação de valor, com expressivas exportações de fécula e amidos modificados (JAKRAWATANA; PINGMUANGLEKA; GHEEWALA, 2016). Na Nigéria, o crescimento produtivo está associado ao aumento populacional, ao uso de variedades melhoradas e à implementação de políticas públicas voltadas ao fortalecimento da cadeia produtiva (OGUNYINKA; OGUNTUASE, 2020). Nesse contexto, o Brasil perde protagonismo internacional em função da baixa industrialização da cadeia, da ineficiência dos sistemas de propagação, da desigualdade na adoção tecnológica, da fragmentação produtiva e da ausência de políticas públicas contínuas voltadas à agregação de valor e à inserção no mercado internacional. A superação desses entraves é fundamental para reposicionar o país como protagonista global na cultura da mandioca.

2.3. Melhoramento genético da mandioca

O melhoramento genético da mandioca constitui um campo de pesquisa estratégico de relevância global (BECERRA-LOPEZ LAVALLE et al., 2021),

assumindo papel central na promoção da segurança alimentar, da resiliência dos sistemas produtivos e do desenvolvimento sustentável, especialmente em regiões tropicais e subtropicais. Reconhecida por sua elevada rusticidade, ampla adaptabilidade a solos de baixa fertilidade e tolerância relativa a estresses bióticos e abióticos (EL-SHARKAWY, 2003), A mandioca configura-se como uma cultura de subsistência essencial para centenas de milhões de pessoas em países em desenvolvimento (FAO, 2013).

No contexto contemporâneo, o melhoramento genético da mandioca transcende a busca exclusiva por incrementos de produtividade, passando a incorporar um conjunto complexo e integrado de atributos agronômicos, nutricionais e industriais. Entre esses, destacam-se a resistência a pragas e doenças de grande impacto econômico, como a o vírus do mosaico africano (CMD) e o castanho listrado da mandioca (CBSD), bem como a melhoria da qualidade nutricional por meio da biofortificação com carotenoides pró-vitamina A e da qualidade industrial, especialmente pelo aumento do teor e da funcionalidade do amido (CEBALLOS et al., 2016; BESTER et al., 2021).

Historicamente, os programas de melhoramento da mandioca remontam às primeiras iniciativas sistematizadas no Brasil e na África Oriental na década de 1930. Contudo, a consolidação de esforços coordenados em escala internacional ocorreu apenas no final dos anos 1960, com a criação do *International Institute of Tropical Agriculture* (IITA) e do *Centro Internacional de Agricultura Tropical* (CIAT), que estabeleceram as bases metodológicas e estruturais dos programas modernos de melhoramento da cultura (CEBALLOS et al., 2020). Tradicionalmente, esses programas basearam-se em estratégias convencionais, como a seleção recorrente fenotípica associada à propagação clonal. Entretanto, as limitações impostas pelo longo ciclo reprodutivo da mandioca e pela baixa taxa de multiplicação vegetativa impulsionaram, nas últimas décadas, a incorporação de ferramentas biotecnológicas avançadas, incluindo transformação genética, seleção assistida por marcadores (MAS), edição gênica e, mais recentemente, seleção genômica (EMMANUEL NORMAN; DZIDZIENYO; YANNAH KARIM, 2021).

Nesse cenário, o melhoramento genético da mandioca consolida-se como um pilar estratégico frente aos desafios impostos pelo crescimento populacional, pelas mudanças climáticas e pela necessidade de sistemas agrícolas mais

sustentáveis. Conforme destacado por (CEBALLOS et al., 2020), os programas modernos devem atuar de forma integrada sobre três eixos interdependentes, como produtividade, resiliência e qualidade.

O desenvolvimento de variedades de alto rendimento é fundamental não apenas para atender à crescente demanda por alimentos, mas também para promover o uso mais eficiente da terra e dos recursos naturais, reduzindo a pressão por expansão agrícola sobre áreas ambientalmente sensíveis. Paralelamente, a resiliência ambiental exige o desenvolvimento de cultivares adaptadas a estresses abióticos, como seca e baixa fertilidade do solo, cujos efeitos tendem a se intensificar em um cenário de aquecimento global (OLIVEIRA et al., 2021).

A sustentabilidade dos sistemas produtivos depende, ainda, da resistência genética a pragas e doenças. Patógenos como o vírus do mosaico africano da mandioca podem causar perdas severas de produtividade, tornando o desenvolvimento de variedades resistentes a estratégia mais eficiente, econômica e ambientalmente adequada para o manejo fitossanitário (PARSA; MEDINA; RODRÍGUEZ, 2015).

Adicionalmente, a qualidade da raiz assume importância crescente no melhoramento moderno. A biofortificação é reconhecida como uma estratégia eficaz de saúde pública, visando elevar o teor de micronutrientes, especialmente carotenoides pró-vitamina A, com o objetivo de mitigar deficiências nutricionais em populações vulneráveis (BOUIS et al., 2011; CEBALLOS et al., 2020). No contexto industrial, a ênfase recai sobre o aumento do teor e da qualidade do amido (ORTIZ et al., 2011), enquanto a segurança alimentar demanda a redução dos níveis de compostos cianogênicos.

Historicamente ancorado em metodologias convencionais, o melhoramento genético da mandioca tem buscado superar as limitações impostas pelo longo ciclo reprodutivo da cultura (CEBALLOS et al., 2016; KAWANO, 2003), por meio da incorporação de ferramentas moleculares e genômicas. Técnicas como o uso de marcadores moleculares, a seleção genômica (GS) e a edição gênica permitem a seleção precoce e mais precisa de características de interesse, reduzindo o tempo necessário para a identificação de genótipos superiores (POOTAKHAM et al., 2014). Essas inovações são particularmente relevantes no contexto desta tese, que busca estratégias para a redução do ciclo de

melhoramento e para o desenvolvimento de sementes sintéticas de mandioca como alternativa para acelerar a avaliação, multiplicação e disseminação de novos genótipos.

2.3.1. Seleção dos parentais e hibridação em mandioca

A seleção de parentais e a hibridação constituem o núcleo de qualquer programa de melhoramento genético e, na mandioca, assumem papel ainda mais crítico em função das particularidades biológicas da espécie. Apesar da elevada heterozigose individual observada nos genótipos cultivados, a geração e exploração efetiva de variabilidade genética são limitadas por fatores como a propagação clonal, a baixa taxa de multiplicação e o longo ciclo reprodutivo (CEBALLOS et al., 2016).

Historicamente, a hibridação intraespecífica na mandioca baseia-se na seleção estratégica de parentais com características complementares, visando maximizar o potencial genético das progênies. O critério central para essa escolha é a estimativa da capacidade geral de combinação (CGC), que expressa o valor reprodutivo médio de um genótipo e sua contribuição para a performance da descendência (CEBALLOS et al., 2016). Nesse contexto, os melhoristas enfrentam o desafio de combinar, em um mesmo genótipo, alta produtividade (rendimento de raízes e teor de amido) com resistência múltipla a estresses bióticos, como bacteriose e mosaico africano, e abióticos, como a seca.

O pré-melhoramento, por meio da incorporação de espécies silvestres do gênero *Manihot*, emerge como estratégia fundamental para a ampliação da base genética da cultura. Essa abordagem possibilita a reintrodução de alelos valiosos relacionados à resistência a doenças, tolerância a estresses ambientais e qualidade das raízes, frequentemente ausentes nos genótipos comerciais modernos (SIMON et al., 2022). Estudos genômicos recentes reforçam que a diversidade genética e a estrutura populacional das espécies de *Manihot* são determinantes para o sucesso do pré-melhoramento e para a introgressão eficiente de alelos raros de interesse agrônomo (ADU et al., 2021).

O processo de melhoramento por hibridação envolve, portanto, a seleção dos progenitores, a obtenção das progênies F_1 e a subsequente identificação de clones superiores ao longo das etapas de multiplicação e avaliação clonal. A propagação vegetativa assegura a manutenção da constituição genotípica dos

clones selecionados ao longo das gerações, característica que confere estabilidade, mas que também contribui para a lentidão do processo de melhoramento (CEBALLOS ET AL., 2004; EMMANUEL NORMAN; DZIDZIENYO; YANNAH KARIM, 2021; KAWANO, 2003).

Apesar de amplamente utilizada, a hibridação convencional na mandioca é reconhecida por sua baixa eficiência temporal. A elevada heterozigose resulta em ampla segregação genética, mesmo em cruzamentos entre clones elite, exigindo vários anos de seleção fenotípica para a identificação de genótipos superiores (CEBALLOS et al., 2016). Ademais, limitações logísticas, como a floração assíncrona entre parentais e a baixa disponibilidade inicial de material propagativo, restringem a escala e a velocidade dos programas de melhoramento.

Nesse contexto, a introdução da seleção genômica (GS) representa um dos avanços mais significativos para a superação do longo ciclo reprodutivo da mandioca. A GS utiliza modelos estatísticos capazes de prever o valor genético dos indivíduos com base em marcadores moleculares em estágios iniciais do desenvolvimento, permitindo a identificação precoce de clones superiores. Além de acelerar a seleção de híbridos, essa abordagem aprimora a estimativa do valor de melhoramento dos parentais, especialmente quando combinada a análises espaciais que aumentam a acurácia fenotípica (ELIAS, et al., 2018).

Diversos modelos estatísticos têm sido avaliados quanto à eficiência preditiva da GS em mandioca. O *Best Linear Unbiased Prediction* (BLUP), baseado em informações de pedigree, e o *Genomic BLUP* (GBLUP), que incorpora dados genômicos, destacam-se pela robustez e simplicidade operacional em programas de larga escala (WOLFE et al., 2016). O GBLUP tem apresentado desempenho superior para características quantitativas complexas, como rendimento e teor de amido, especialmente quando associado a painéis densos de SNPs (ADU et al., 2021).

Modelos Bayesianos, como BayesA, BayesB e BayesC π , também vêm sendo explorados por sua capacidade de modelar distribuições diferenciadas de variância dos efeitos dos marcadores, capturando loci de grande efeito com maior precisão (ESUMA et al., 2016; OGBONNA et al., 2021). Estudos comparativos indicam que BayesB e GBLUP apresentam maior estabilidade e acurácia preditiva entre ciclos de seleção, particularmente em situações de tamanho reduzido da população de treinamento, condição frequente em programas de melhoramento

de mandioca. Abordagens mais recentes, como *Reproducing Kernel Hilbert Space* (RKHS) e algoritmos de aprendizado de máquina, têm demonstrado potencial para modelar efeitos não aditivos e interações genótipo x ambiente, ampliando as possibilidades de ganho genético para características complexas (DE ANDRADE et al., 2022).

O planejamento de cruzamentos, anteriormente fundamentado quase exclusivamente em avaliações fenotípicas, passa a ser orientado por informações genômicas, aumentando a probabilidade de sucesso nas gerações subsequentes. Recentemente, estratégias mais avançadas, como a hibridação baseada em parentais endogâmicos, têm sido propostas com o objetivo de estabilizar linhas parentais, facilitar a predição da heterose e elevar a eficiência do melhoramento da mandioca a níveis comparáveis aos observados em culturas anuais (SANTOS et al., 2025).

2.3.2. Seleção clonal

O melhoramento genético da mandioca fundamenta-se predominantemente na seleção clonal, método amplamente empregado em função da propagação vegetativa da cultura. Esse processo sequencial inicia-se com a geração sexuada, por meio de sementes botânicas, e é estruturado para identificar, selecionar e multiplicar genótipos superiores, culminando no lançamento de novas variedades.

A lógica central do sistema baseia-se na progressiva redução do número de genótipos avaliados ao longo das etapas, concomitantemente ao aumento da precisão e da robustez das avaliações experimentais (DE FREITAS et al., 2018). Esse modelo, frequentemente descrito como um “funil genético”, organiza-se em uma sequência padronizada de ensaios de campo: *Seedling Evaluation Trial* (SET), *Clonal Evaluation Trial* (CET), *Preliminary Yield Trial* (PYT), *Advanced Yield Trial* (AYT) e *Uniform Yield Trial* (UYT) (Figura 1). A cada transição, observa-se o aumento do tamanho das parcelas, do número de repetições e da quantidade de ambientes avaliados, permitindo uma análise mais abrangente do desempenho genotípico (CEBALLOS et al., 2021).

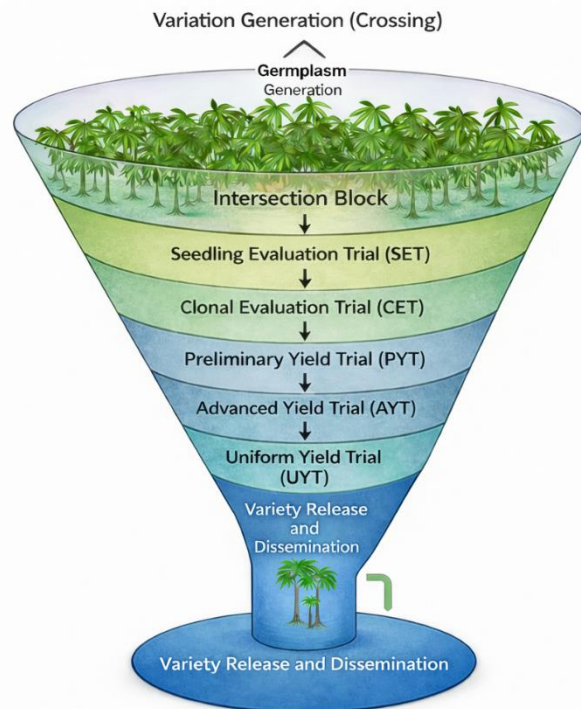


Figura 1. Esquema de ciclo de melhoramento convencional da mandioca. Representando o aumento do número de repetições, tamanho de parcelas e locais para os diferentes ensaios (ensaios de avaliação de mudas (SET); ensaios de avaliação clonal (CET); ensaios preliminares de rendimento replicado (PYT); ensaios avançados de rendimento (AYT) e ensaios uniformes de produção (UYT).

Nas etapas iniciais (SET e CET), os ensaios são conduzidos em um único local e sem repetições, priorizando a eliminação massiva de genótipos indesejáveis com base em características de alta herdabilidade, como vigor, arquitetura de planta, índice de colheita e reação a doenças (CEBALLOS et al., 2016). A capacidade de produzir um número mínimo de manivas para a etapa subsequente constitui, adicionalmente, um critério de seleção fundamental.

À medida que o processo avança para os ensaios preliminares (PYT) e avançados de rendimento (AYT), a avaliação torna-se mais rigorosa, incorporando repetições, maior número de plantas por parcela e múltiplos locais. A fase final, representada pelos ensaios uniformes de produção (UYT), envolve um número reduzido de genótipos avaliados em ampla diversidade ambiental, permitindo a identificação de clones com desempenho superior e estabilidade fenotípica. Os genótipos aprovados nessa etapa são lançados como novas variedades e, simultaneamente, incorporados como genitores em novos ciclos de

cruzamento, retroalimentando o programa de melhoramento (CEBALLOS; KULAKOW; HERSHEY, 2012).

Recentemente, a eficiência da seleção clonal tem sido ampliada pela adoção de estratégias de seleção precoce, incluindo o uso de ferramentas moleculares e genômicas para a identificação antecipada de características complexas, como o tipo de amido (waxy), ainda nas fases iniciais do ciclo (ANDRADE et al., 2019; DO CARMO et al., 2020). Essas abordagens reduzem significativamente a área experimental necessária, os custos operacionais e o tempo até a tomada de decisão, contribuindo diretamente para a redução do ciclo de melhoramento. Nesse contexto, a integração dessas estratégias com o desenvolvimento de sementes sintéticas de mandioca emerge como uma perspectiva promissora para acelerar a avaliação, multiplicação e disseminação de novos genótipos, alinhando-se aos objetivos centrais desta tese.

2.3.3. Fundamentos genéticos, quantitativos e ambientais no melhoramento da mandioca

A diversidade genética constitui o alicerce de qualquer programa de melhoramento vegetal, conferindo às culturas agrícolas a capacidade de adaptação, resiliência e resposta evolutiva frente a ambientes dinâmicos e a demandas produtivas crescentes (ADJEBENG-DANQUAH et al., 2020). No caso da mandioca, essa diversidade assume contornos particularmente complexos, refletindo um genoma altamente heterozigoto e historicamente moldado pela domesticação, pela propagação clonal e pela ampla interação com ambientes tropicais heterogêneos.

A mandioca apresenta um dos mais elevados níveis de heterozigosidade já descritos em plantas cultivadas (WANG et al., 2014), característica que sustenta o vigor híbrido, a estabilidade fenotípica e a ampla plasticidade adaptativa observada na cultura (DE ANDRADE et al., 2022). Essa condição genética, embora vantajosa do ponto de vista adaptativo, impõe desafios substanciais ao melhoramento, uma vez que a segregação resultante de cruzamentos é intensa e imprevisível, demandando ciclos prolongados de avaliação clonal.

Essa complexidade é amplificada pelo fato de o gênero *Manihot*, que compreende cerca de 120 espécies descritas, apresentar predominância de poliploidia ($2n = 36$ cromossomos), o que intensifica os efeitos de dominância,

epistasia e interação gênica (VELMURUGAN et al., 2024). A combinação entre poliploidia e heterozigosidade elevada resulta em populações altamente segregantes, tornando imprescindível o planejamento estratégico das hibridações e o uso racional da variabilidade genética disponível.

A conservação e o uso eficiente dessa diversidade são, portanto, elementos centrais para a sustentabilidade do melhoramento. Coleções *ex situ*, como as mantidas pelo CIAT e pela Embrapa, representam reservatórios genéticos estratégicos (DUITAMA et al., 2017). Entretanto, a ampla adoção da propagação clonal em sistemas produtivos tem promovido erosão genética *in situ*, elevando a vulnerabilidade da cultura a estresses emergentes. Evidências genômicas recentes indicam que a domesticação e a clonagem contínua levaram ao acúmulo de mutações deletérias, especialmente em genes associados à reprodução sexual, sugerindo um relaxamento da pressão seletiva e um estreitamento do pool genético funcional (LONG et al., 2025).

Nesse contexto, o mapeamento molecular e a caracterização genômica do germoplasma tornam-se ferramentas indispensáveis. Estudos de larga escala, como o conduzido por Ogbonna et al. (2021), que analisaram mais de 3.300 variedades brasileiras e identificaram cerca de 27.000 SNPs, permitiram estruturar a diversidade genética da mandioca em grupos bem definidos, oferecendo subsídios objetivos para a escolha de parentais, o manejo da diversidade e a maximização do ganho genético.

O futuro do melhoramento da mandioca depende da exploração dessa diversidade em duas frentes complementares. A primeira envolve o uso estratégico de espécies silvestres do gênero *Manihot* no pré-melhoramento, visando a introgressão de alelos associados à resistência a estresses abióticos, como seca e solos de baixa fertilidade, e a novas ameaças bióticas (OTUN et al., 2023). A segunda frente refere-se à exploração da variabilidade para características de qualidade e segurança alimentar, incluindo o aumento do teor de carotenoides pró-vitamina A e a redução dos níveis de compostos cianogênicos, para os quais já foram identificadas correlações genéticas favoráveis (ESUMA et al., 2016).

O progresso efetivo de um programa de melhoramento é mensurado pelo ganho genético esperado (GG), sendo este diretamente influenciado pela intensidade de seleção, pela variância genética disponível, pela acurácia seletiva

e, sobretudo, pela duração do ciclo de seleção (FALCONER, 1996; RESENDE, 2007). Em termos anuais, o ganho genético pode ser expresso pela relação clássica: $GG/ano = \frac{K \times Acurácia \times \sqrt{Variância\ Genética}}{Ciclo\ de\ seleção\ (anos)}$, onde K representa a intensidade de seleção e o denominador reflete o tempo necessário para completar um ciclo de melhoramento (BERNARDO, 2020)

Em culturas perenes e clonais como a mandioca, o longo ciclo de avaliação, frequentemente superior a seis anos, constitui o principal entrave à obtenção de ganhos genéticos anuais elevados. Assim, a redução do ciclo de melhoramento, desde que acompanhada da manutenção ou aumento da acurácia, emerge como estratégia central para aumentar a eficiência do programa (RESENDE, 2007).

Nesse cenário, a herdabilidade estimada via BLUP assume papel crucial, pois representa a correlação entre os valores genéticos preditos e os valores genéticos reais, funcionando como indicador direto da acurácia seletiva (PIEPHO et al., 2008). Para caracteres de baixa herdabilidade fenotípica, como produtividade de raízes e teor de amido sob múltiplos ambientes, a Seleção Genômica (GS) destaca-se como ferramenta estratégica, ao permitir a predição precoce do Valor Genético Genômico (VGG) com base em marcadores SNPs densamente distribuídos (TORRES et al., 2019).

A integração entre multiplicação acelerada, seleção genômica e métodos de predição robustos permite substituir parte da avaliação fenotípica tardia por decisões precoces, reduzindo significativamente o intervalo entre gerações. Esse avanço conceitual estabelece as bases para a incorporação de novas tecnologias, como a produção de sementes sintéticas, capazes de acelerar a multiplicação clonal, padronizar materiais e reduzir gargalos logísticos nos estágios iniciais do melhoramento.

A herdabilidade é o parâmetro genético central que orienta as decisões de seleção, quantificando a proporção da variação fenotípica atribuível a causas genéticas (FALCONER, 1996). Em mandioca, cultura essencial para a segurança alimentar de mais de 800 milhões de pessoas (FAO, 2013), a correta estimativa desse parâmetro é particularmente relevante devido à forte influência ambiental e à propagação clonal.

A herdabilidade em sentido amplo (H^2), que inclui os componentes aditivo, dominante e epistático, é especialmente importante em culturas clonais, pois o genótipo selecionado é integralmente fixado e multiplicado (RESENDE, 2002). Já a herdabilidade em sentido restrito (h^2), associada apenas à variância aditiva, é fundamental para orientar a seleção de parentais em esquemas de hibridação (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2004).

A complexidade genética da mandioca, aliada à forte interação genótipo \times ambiente, exige o uso de metodologias estatísticas avançadas para estimativas confiáveis de herdabilidade. Modelos mistos baseados em REML/BLUP têm se consolidado como padrão-ouro, permitindo a decomposição precisa das variâncias, o tratamento de dados desbalanceados e o aumento da acurácia seletiva em ensaios multiambientais (CULLIS; SMITH; COOMBES, 2006; RESENDE, 2007).

Outro fator importante no melhoramento de mandioca é a interação genótipo \times ambiente (G \times E) representa um dos principais fatores responsáveis pelo prolongamento do ciclo de melhoramento. Esse fenômeno expressa a resposta diferencial dos genótipos frente à diversidade de condições edafoclimáticas nas quais a cultura é cultivada, afetando diretamente caracteres como rendimento de raízes, teor de matéria seca e resistência a doenças (FILHO et al., 2024).

Particularmente desafiadora é a G \times E do tipo *crossover*, na qual ocorre mudança no ranking de desempenho dos genótipos entre ambientes, exigindo extensos ensaios multiambientais para identificação de materiais estáveis e amplamente adaptados (AMELEWORK et al., 2023). Essa necessidade eleva custos, demanda tempo e retarda o lançamento de novas cultivares. Para lidar com essa complexidade, os programas de melhoramento têm incorporado ferramentas estatísticas avançadas, como análises AMMI, biplots GGE e modelos mistos REML/BLUP, que permitem quantificar a interação, prever valores genéticos ajustados e identificar genótipos com adaptabilidade e estabilidade simultâneas (RESENDE, 2007; PIEPHO et al., 2008; HABTEGEBRIEL, 2022).

Avanços recentes incluem o uso de modelos de covariância parcimoniosos para G \times E (BAKARE et al., 2022), índices combinados de média e estabilidade (HABTEGEBRIEL, 2022) E estratégias de melhoramento acelerado, que antecipam a avaliação multiambiental para estágios mais precoces do ciclo

(CONCEICÃO et al., 2023). Paralelamente, a integração entre GWAS e Seleção Genômica tem permitido elucidar a arquitetura genética de caracteres complexos e refinar a predição genômica em diferentes ambientes (RABBI et al., 2022).

Nesse contexto, a redução do ciclo de melhoramento da mandioca depende de uma abordagem sistêmica, que integre diversidade genética, ganho genético, herdabilidade, modelagem da G×E e novas tecnologias de multiplicação clonal. A semente sintética surge como elemento potencialmente disruptivo, ao permitir a propagação rápida, padronizada e escalável de genótipos superiores, contribuindo diretamente para a aceleração do progresso genético e para a modernização dos sistemas de melhoramento da mandioca.

2.4. Gargalos associados à baixa taxa de multiplicação da mandioca

O ciclo fisiológico da mandioca é complexo e caracterizado por cinco fases parcialmente sobrepostas, que se estendem desde a brotação inicial e a formação das primeiras raízes fibrosas (por volta do sétimo dia após o plantio), passando pela substituição e aprofundamento do sistema radicular (até cerca de 70 dias), pela intensa ramificação e migração de reservas (em torno de 90 dias), até o espessamento das raízes tuberosas por meio da deposição de amido, processo que pode se prolongar por até cinco meses (CEBALLOS et al., 2004). Uma característica crítica desse ciclo é a ausência de uma definição precisa e universalmente aceita dos estágios fenológicos, o que dificulta o manejo agrônomo e a padronização das avaliações.

Essa indefinição fenológica, aliada à maturação fisiológica irregular da antese, que nem sempre ocorre de forma consistente entre genótipos e ambientes, pode impactar diretamente o manejo da cultura, o planejamento dos cruzamentos e a determinação do momento ideal de colheita (OKOMA et al., 2025). Essa complexidade fisiológica intrínseca se soma aos desafios operacionais enfrentados pelos programas de melhoramento genético da mandioca.

Um dos principais gargalos desses programas é a carência de sistemas eficientes, escaláveis e sustentáveis para a produção e distribuição de material de plantio de novas variedades. Embora existam tecnologias de propagação rápida, continuamente refinadas nas últimas décadas, sua conversão em sistemas práticos e economicamente viáveis ainda é limitada, sobretudo em contextos de

agricultura familiar e em regiões tropicais de baixa infraestrutura. Ainda assim, há um esforço contínuo para o desenvolvimento de abordagens de multiplicação acelerada que assegurem material de plantio com elevada qualidade fitossanitária e alto potencial multiplicativo (CEBALLOS et al., 2021).

A baixa taxa de multiplicação vegetativa da mandioca agrava esse cenário. Após sucessivos anos de hibridização, avaliação e seleção, uma única planta-mãe é capaz de gerar apenas um número restrito de estacas, geralmente entre nove e quinze por ciclo produtivo. Essa limitação impõe um atraso significativo, frequentemente de cinco a seis anos, para que genótipos promissores alcancem volume suficiente de material de plantio para avaliações em múltiplos ambientes, etapa correspondente aos ensaios regionais. Adicionalmente, fatores ambientais e fitossanitários podem reduzir ainda mais a sobrevivência das mudas, resultando, em condições de campo, em apenas cinco a dez estacas viáveis por planta (CEBALLOS; KULAKOW; HERSHEY, 2012).

Outro fator que contribui para a complexidade do melhoramento da mandioca é sua natureza altamente heterozigótica, bem como a dos genitores utilizados na geração de progênies segregantes. Essa característica dificulta a identificação de parentais com elevado valor genético aditivo e torna o processo de seleção mais dependente de avaliações fenotípicas extensivas. Historicamente, o melhoramento da mandioca tem se baseado predominantemente em esquemas de seleção recorrente fenotípica em massa (CEBALLOS et al., 2004). No entanto, a possibilidade de multiplicação clonal de indivíduos heterozigotos representa uma vantagem estratégica, pois permite a separação mais eficiente dos efeitos genéticos e ambientais, possibilitando a estimativa precisa dos valores genéticos dentro das famílias (CEBALLOS et al., 2004, 2015; KAWANO, 2003; OKOGBENIN et al., 2012).

A qualidade do material de plantio constitui outro aspecto crítico. A posição da estaca no caule da planta-mãe influencia significativamente o desempenho da planta resultante. Estacas oriundas da porção mediana das hastes tendem a apresentar maior vigor, brotação mais uniforme e maior viabilidade, quando comparadas às estacas provenientes das regiões superiores, mais suscetíveis à desidratação e à infecção por patógenos, ou inferiores, que geralmente são mais lignificadas, possuem menor reserva de carboidratos e apresentam brotação tardia (CEBALLOS; KULAKOW; HERSHEY, 2012).

Diante desse conjunto de limitações, a precisão da seleção genética, apoiada em delineamentos experimentais robustos ao longo de todas as fases do programa de melhoramento, torna-se essencial. Aspectos como tamanho de parcela, número de repetições e diversidade de ambientes de avaliação exercem papel central na acurácia das estimativas genéticas (DE FREITAS et al., 2018). A escolha criteriosa de genitores e o planejamento de cruzamentos específicos são igualmente determinantes para o sucesso dos programas (SOUSA et al., 2021). Ainda assim, persiste o desafio de converter os avanços genéticos obtidos em material de plantio disponível, de alta qualidade e acessível aos agricultores, reforçando a necessidade de otimização integrada de todo o processo de melhoramento da mandioca, desde a seleção de clones superiores quanto à produtividade, resistência a pragas, doenças e deterioração fisiológica pós-colheita, até sua multiplicação e distribuição eficientes (DE FREITAS et al., 2018).

2.5. Técnicas atuais de multiplicação da mandioca

A propagação da mandioca é realizada tradicionalmente por meio de estacas caulinares, conhecidas como manivas, um método de multiplicação assexuada amplamente difundido que permite a troca relativamente livre de material de plantio entre agricultores. Apesar de sua simplicidade operacional, esse sistema apresenta uma taxa de multiplicação intrinsecamente baixa, variando entre nove e quinze manivas por planta (CEBALLOS et al., 2010; CEBALLOS; KULAKOW; HERSHEY, 2012; MURRAY; COHEN, 2021). Estacas consideradas ideais geralmente possuem entre cinco e sete nós, comprimento de 15 a 30 cm e não apresentam dormência, podendo ser plantadas imediatamente após a colheita.

Em contraste, a propagação sexuada, a partir de sementes botânicas verdadeiras, é empregada principalmente em programas de melhoramento genético com o objetivo de gerar variabilidade genética por meio de cruzamentos dirigidos. No entanto, essa abordagem é limitada por fatores fisiológicos e operacionais, uma vez que a floração da mandioca não é rigidamente determinada do ponto de vista fenológico, diferindo de culturas anuais amplamente domesticadas (CEBALLOS; KULAKOW; HERSHEY, 2012; GUEDES; SOUSA; OLIVEIRA, 2025).

Embora os avanços no melhoramento genético da mandioca tenham se intensificado nas últimas quatro décadas, particularmente após a introdução da embriogênese somática e da propagação clonal *in vitro* (STAMP; HENSHAW, 1987; SZABADOS; HOYOS; ROCA, 1987), a cultura ainda carece de um número suficiente de variedades melhoradas amplamente adaptadas aos principais sistemas de produção. Esse fato está fortemente associado ao longo ciclo de cultivo e às limitações impostas pelos métodos convencionais de multiplicação.

A propagação clonal por estacas, utilizando segmentos nodais com gemas axilares, permanece como a base do sistema de multiplicação da mandioca, sendo fundamental para a manutenção da identidade genética dos clones selecionados (CEBALLOS et al., 2015; SOUSA et al., 2021). Técnicas baseadas na estaquia de gemas maduras ou foliares têm sido amplamente empregadas para aumentar a eficiência da multiplicação, explorando o potencial regenerativo das gemas como unidade básica de propagação (NEVES; DINIZ; OLIVEIRA, 2018).

Em resposta às limitações da multiplicação convencional, diversas estratégias têm sido desenvolvidas com o objetivo de otimizar a produção de material de plantio. Essas abordagens incluem o uso de estacas de tamanho reduzido, o aproveitamento de partes da planta anteriormente descartadas e a adoção de manejo intensivo em ambientes protegidos. Tais técnicas têm demonstrado elevada eficiência na produção rápida de propágulos em escala experimental e semi-comercial.

Neves, Diniz e Oliveira, (2018), observaram que, apesar de um crescimento inicial menos vigoroso em campo, plântulas originadas de gemas foliares, especialmente das regiões superior e mediana do caule, são capazes de produzir até cinco vezes mais propágulos em comparação ao método tradicional. Posteriormente, Neves, Souza e Oliveira (2020), confirmaram a viabilidade da técnica, registrando elevada taxa de brotação (81%) e maior vigor em plântulas provenientes de gemas foliares coletadas da região superior de plantas-mãe jovens, com até seis meses de idade. Como resultado prático, foi alcançada uma taxa anual de multiplicação de aproximadamente 1:72, significativamente superior à taxa de 1:5 observada no sistema convencional.

Outra abordagem inovadora foi proposta por (OLIVEIRA et al., 2020), que desenvolveram tratamentos de manivas com bioativadores, possibilitando o uso

de estacas de tamanho reduzido sem prejuízo à brotação e ao vigor inicial. Essa estratégia permite triplicar a taxa de multiplicação por planta-mãe em condições de campo, além de reduzir custos logísticos associados ao transporte e armazenamento do material de plantio.

A Técnica de Multiplicação Rápida (TMR), desenvolvida e difundida pelo CIAT, representa uma das principais estratégias para acelerar a multiplicação clonal da mandioca. Originalmente descrita por Santos et al. (2009), a TMR envolve o plantio de estacas com duas gemas em canteiros protegidos, seguido do corte sucessivo dos brotos, enraizamento em água e posterior transplantio. Essa técnica permite uma multiplicação estimada de até 16 vezes em relação ao método convencional. Estudos mais recentes, como os de Schoffel et al. (2021), refinaram o protocolo, recomendando a coleta de brotos com seis a oito folhas visíveis, diâmetro entre 20 e 25 mm e plantio no final de setembro, visando maximizar o enraizamento e a sobrevivência das mudas.

Murray e Cohen (2021), avaliaram a Técnica de Remoção Múltipla de Brotos (MSRT), que consiste na indução da brotação de estacas maduras em ambiente protegido, seguida do corte e enraizamento repetido dos brotos ao longo do tempo. Essa abordagem possibilita a obtenção de três a seis propágulos viáveis por estaca em um período aproximado de três meses, com melhor desempenho observado em seções médias e basais do caule de plantas jovens, com cerca de sete meses de idade. Ao concentrar a multiplicação em condições controladas, a MSRT permite acelerar significativamente a fase pós-seleção clonal nos programas de melhoramento.

De forma integrada, a otimização da produção de material de plantio da mandioca envolve estratégias que atuam em múltiplas escalas. Em sistemas de produção em massa e sob condições de semi-campo, a macropropagação otimizada emprega minisseções e estaquia em viveiros protegidos, como casas teladas, visando maximizar a produção de brotos com elevado padrão sanitário (CEBALLOS et al., 2021; CEBALLOS; KULAKOW; HERSHEY, 2012). O sucesso dessas abordagens depende diretamente de manejo intensivo, incluindo nutrição adequada e controle rigoroso de pragas e doenças, fatores essenciais para a obtenção de hastes de alta qualidade agronômica.

Na base da cadeia produtiva, a micropropagação *in vitro* desempenha papel estratégico e insubstituível. Além de permitir a obtenção de material

geneticamente uniforme e livre de vírus geralmente por meio da cultura de meristemas essa técnica possibilita a multiplicação acelerada dos clones elite iniciais, superando de forma expressiva a taxa natural de multiplicação da cultura. Conforme destacado por (CEBALLOS et al., 2021), a micropropagação é a ferramenta padrão para a manutenção segura de coleções de germoplasma e para o lançamento inicial de novas variedades no sistema formal de sementes.

O principal desafio reside na integração eficiente dessas diferentes técnicas em um sistema coerente, robusto e economicamente viável. A precisão na seleção dos clones, aliada à escolha adequada do material de plantio considerando a seção do caule e a idade ideal da planta-mãe, geralmente entre sete e dezoito meses é determinante para o sucesso do processo (CEBALLOS; KULAKOW; HERSHEY, 2012; DE FREITAS et al., 2018). Esforços contínuos de pesquisa, investimento e inovação são necessários para escalar a produção de variedades melhoradas e garantir sua disponibilização rápida e sustentável aos agricultores, contribuindo de forma efetiva para a segurança alimentar e o fortalecimento dos sistemas produtivos tropicais (SOUSA et al., 2021).

2.6. Sementes sintéticas como eixo tecnológico para a redução do ciclo de melhoramento da mandioca

A mandioca é tradicionalmente propagada por meio de manivas, um sistema que, embora eficiente do ponto de vista agrônomo, impõe severas limitações aos programas de melhoramento e à difusão de novas variedades. Entre os principais entraves destacam-se a baixa taxa de multiplicação, os elevados custos logísticos e, sobretudo, a disseminação de patógenos, especialmente vírus e bactérias, ao longo das cadeias produtivas (RIHAN et al., 2017). Esses fatores contribuem de forma decisiva para o prolongamento do ciclo de melhoramento da cultura, retardando a disponibilização de genótipos superiores aos agricultores. Nesse cenário, a biotecnologia vegetal surge como um componente estratégico para a modernização dos sistemas de propagação, com destaque para o desenvolvimento de sementes sintéticas, uma abordagem capaz de associar sanidade, uniformidade genética e escalabilidade produtiva (EMBRAPA, 2025).

As sementes sintéticas podem ser definidas como estruturas artificiais constituídas por propágulos vegetais, tais como embriões somáticos, ápices

caulinares, gemas axilares ou microestacas, encapsulados em matrizes poliméricas, geralmente na forma de hidrogéis (RIHAN et al., 2017; YÜCESAN, 2019). O princípio dessa tecnologia consiste em mimetizar funcionalmente a semente botânica, oferecendo proteção física ao propágulo, estabilidade fisiológica e, quando possível, reservas nutricionais que viabilizem sua conversão em plântula. Diferentemente da semente sexuada, a semente sintética preserva integralmente a identidade genética do genótipo de origem, aspecto particularmente relevante para culturas de propagação clonal como a mandioca.

O desenvolvimento das sementes sintéticas está diretamente associado aos avanços da cultura de tecidos vegetais. A concepção inicial dessa tecnologia remonta às proposições de Murashige (1978), que reconheceu o potencial do uso de embriões somáticos encapsulados como unidades de propagação. Entretanto, a consolidação do conceito ocorreu com o advento de técnicas eficientes de encapsulamento, especialmente a partir do uso do alginato de sódio como agente formador da matriz artificial. Trabalhos pioneiros de Kitto e Janick (1985) e Redenbaugh et al. (1987), demonstraram que o alginato reúne características ideais para essa finalidade, como baixo custo, ausência de toxicidade, rápida gelificação e elevada biocompatibilidade, tornando-se o polímero padrão para a produção de sementes sintéticas (PATEL et al., 2000; HURTADO et al., 2022).

A viabilidade prática da tecnologia foi reforçada quando Onishi, Mashiko e Okamoto (1992), demonstraram a conversão bem-sucedida de embriões encapsulados em condições não estéreis, um marco essencial para a aplicação direta em viveiro ou campo. Desde então, a tecnologia de sementes sintéticas tem sido validada em diversas espécies vegetais, incluindo *Solanum tuberosum* (GHANBARALI et al., 2016), e culturas de grande relevância econômica, como a cana-de-açúcar (BADR). Os benefícios associados a essa abordagem são amplos e incluem a eliminação de doenças transmitidas pelo material propagativo convencional, a manutenção da uniformidade genética, a facilidade de transporte e armazenamento e o potencial de mecanização do plantio, especialmente em sistemas de alta eficiência como o Plantio Direto (RIHAN et al., 2017; YÜCESAN, 2019).

Apesar dos avanços obtidos, o principal gargalo para a adoção em larga escala das sementes sintéticas permanece a conversão eficiente do propágulo encapsulado em plântula sob condições *ex vitro*. A possibilidade de implantação

direta no solo ou em substratos não estéreis é determinante para o sucesso agronômico e econômico da tecnologia. Nesse contexto, a matriz encapsulante assume papel central, devendo apresentar resistência mecânica suficiente para proteger o propágulo durante o manuseio e o plantio, sem comprometer a emergência do broto e o desenvolvimento do sistema radicular (QAHTAN et al., 2019; TADDA et al., 2021; HURTADO et al., 2022).

O alginato de sódio destaca-se como o principal componente dessa matriz artificial. Trata-se de um biopolímero natural amplamente utilizado em sistemas de encapsulamento devido à sua capacidade de formar hidrogéis por meio de um processo simples de gelificação iônica. Nesse processo, a solução de alginato de sódio contendo o propágulo é gotejada em uma solução de íons cálcio, geralmente fornecidos pelo cloreto de cálcio, promovendo a substituição dos íons sódio pelos íons cálcio e resultando na formação do alginato de cálcio, segundo o modelo estrutural conhecido como *egg-box* (SILVA et al., 2015; BESIRI et al., 2023). Essa matriz apresenta propriedades viscoelásticas que permitem a liberação gradual do propágulo e sustentam seu crescimento inicial (BUSTAMANTE-TORRES et al., 2021; DONATI; CHRISTENSEN, 2023).

A funcionalidade da cápsula depende criticamente do equilíbrio entre as concentrações de alginato e do agente reticulador. Concentrações elevadas de CaCl_2 aumentam a resistência mecânica e a homogeneidade do hidrogel, porém reduzem sua capacidade de inchamento e flexibilidade, o que pode restringir a conversão do propágulo em plântula (LÓPEZ-SANTIAGO; CASTILLO, 2025). Dessa forma, a otimização da matriz encapsulante deve considerar as exigências fisiológicas da espécie e do tipo de explante utilizado, como evidenciado em estudos com maracujazeiro silvestre (SILVA et al., 2015) e cana-de-açúcar (PITALOKA et al., 2021).

Além da função estrutural, a matriz de alginato atua como um endosperma artificial, permitindo a incorporação de nutrientes, reguladores de crescimento e compostos bioativos. A suplementação com citocininas e auxinas, como BAP e NAA, tem demonstrado efeitos positivos sobre o crescimento da parte aérea e o enraizamento em mandioca, enquanto formulações inadequadas, como a adição direta de sacarose na solução de reticulação, podem exercer efeitos negativos sobre a regeneração (CHANDRA; PANDEY; KUMAR, 2018; DANSO; FORD-LLOYD, 2003). Mais recentemente, a integração de microrganismos promotores

de crescimento e bioinsumos tem transformado a cápsula em um sistema de liberação inteligente (*smart delivery system*), capaz de aumentar o vigor inicial e a tolerância ao estresse abiótico em condições *ex vitro* (NANDA et al., 2025; SKRZYPCZAK et al., 2021).

Nesse contexto de inovação em materiais, o látex de borracha natural (*Hevea brasiliensis*) emerge como um biopolímero complementar de elevado potencial funcional. Reconhecido por sua elasticidade, adesividade e sustentabilidade, o látex tem sido amplamente explorado na forma de filmes e membranas, com aplicações que vão desde sistemas biomédicos até usos agrícolas (KEDDIE, 1997; SIMCHAREON et al., 2012). Na agricultura, filmes à base de látex têm sido utilizados como revestimentos protetores pós-colheita e como componentes de sistemas hidro-retentores, contribuindo para a manutenção da umidade e para a liberação gradual de nutrientes no solo (SILVA et al., 2024). Essas propriedades tornam o látex um material promissor para aplicações associadas às sementes sintéticas, seja como revestimento adicional ou como componente funcional da cápsula.

De forma complementar, a fibra de coco, obtida do mesocarpo de *Cocos nucifera* L., destaca-se como um substrato sustentável e altamente eficiente para a fase de aclimatização *ex vitro* de plântulas provenientes de sementes sintéticas ou cultura de tecidos. Suas propriedades físicas (elevada retenção de água, alta porosidade, adequada aeração e pH próximo à neutralidade) favorecem o desenvolvimento radicular e aumentam a sobrevivência das plântulas durante a transição do ambiente *in vitro* para a casa de vegetação (DE FREITAS ROSA et al., 2002; DE FRANÇA CARDOZO; NETO, 2021). Embora apresente baixa fertilidade intrínseca, essa limitação pode ser superada por meio de suplementação nutricional adequada, especialmente com o uso de fertilizantes de liberação controlada.

Além de seu uso direto como substrato, a fibra de coco tem sido explorada como material de reforço em compósitos poliméricos sustentáveis, incluindo sistemas baseados em látex natural. Essa integração amplia o potencial tecnológico do sistema, aliando desempenho funcional, sustentabilidade ambiental e valorização de resíduos agroindustriais (CHANDRAN et al., 2024).

Dessa forma, o desenvolvimento de sementes sintéticas para a mandioca deve ser compreendido como uma estratégia tecnológica integradora, que articula

avanços em biotecnologia vegetal, ciência dos polímeros e manejo agrônomo. Ao permitir a produção rápida, sanitariamente segura e potencialmente mecanizável de material de plantio, essa abordagem apresenta elevado potencial para reduzir significativamente o ciclo de melhoramento da cultura, contribuindo para a modernização dos sistemas produtivos e para o fortalecimento da segurança alimentar em regiões tropicais.

3. REREFÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADJEBENG-DANQUAH, J.; ASANTE, I. K.; MANU-ADUENING, J.; AGYARE, R. Y.; GRACEN, V. E.; OFFEI, S. K. Genotypic variability in some morpho-physiological traits in different environments and their relationship with cassava (*Manihot esculenta* Crantz) root yield. **International Journal of Agronomy**, n. 1, p. 587-1351, 2020. DOI: <https://10.1155/2020/5871351>.

ADU, B. G.; AKROMAH, R.; AMOAH, S.; NYADANU, D.; YEBOAH, A.; ABOAGYE, L. M.; AMOAH, R. A.; OWUSU, E. G. High-density DArT-based SilicoDArT and SNP markers for genetic diversity and population structure studies in cassava (*Manihot esculenta* Crantz). **PLOS ONE**, v. 16, n. 7, p. e0255290, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255290>.

AGUIRRE, M.; HAMZEHLU, S.; GONZALEZ, E.; LEIZA, J. Renewable feedstocks in emulsion polymerization: Coating and adhesive applications. **Advances in Chemical Engineering**, v. 56, p. 139–186, 2020. <https://doi.org/10.1016/bs.ache.2020.07.004>.

ALVES-PEREIRA, A.; CLEMENT, C. R.; PICANÇO-RODRIGUES, D.; VEASEY, E. A.; DEQUIGIOVANNI, G.; RAMOS, S. L. F.; PINHEIRO, J. B.; DE SOUZA, A. P.; ZUCCHI, M. I. A population genomics appraisal suggests independent dispersals for bitter and sweet manioc in Brazilian Amazonia. **Evolutionary Applications**, v. 13, n. 2, p. 342–361, 2020. DOI: <https://10.1111/eva.12873>.

AMELEWORK, A. B.; BAIRU, M. W.; MARX, R.; LAING, M.; VENTER, S. L. Genotype × Environment interaction and stability analysis of selected cassava cultivars in south Africa. **Plants**, v. 12, n. 13, 2023. DOI: <https://10.3390/plants12132490>.

ANDRADE, L. R. B. de; SOUSA, M. B. e; OLIVEIRA, E. J.; RESENDE, M. D. V. de; AZEVEDO, C. F. Cassava yield traits predicted by genomic selection methods. **PLOS ONE**, v. 14, n. 11, p. e0224920, 2019. DOI: <https://10.1371/journal.pone.0224920>.

BAKARE, M. A.; KAYONDO, S. I.; AGHOGHO, C. I.; WOLFE, M. D.; PARKES, E. Y.; KULAKOW, P.; EGESI, C.; JANNINK, J.-L.; RABBI, I. Y. Parsimonious genotype by environment interaction covariance models for cassava (*Manihot esculenta*). **Frontiers in Plant Science**, v. 13, 2022. DOI: <https://10.3389/fpls.2022.978248>.

BECERRA-LOPEZ LAVALLE, L. A.; NEWBY, J. C.; ZHANG, X.; BOHORQUEZ-CHAUX, A.; MALIK, I.; CUÉLLAR, W. J.; DELAQUIS, E.; SLAVCHEVSKA, V.; TRAN, T.; CHAVARRIAGA, P.; ESCOBAR PÉREZ, R. H. **Cassava annual report 2020**. 2021. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10568/116743>. Acesso em: 23 fev. 2026.

BERNARDO, R. N. **Breeding for quantitative traits in plants**. Third edition. Woodbury, Minnesota: Stemma Press, 2020. 422 p.

BESIRI, I. N.; GOUDOULAS, T. B.; FATTAHI, E.; BECKER, T. Experimental advances in the real-time recording of cross-linking alginate in situ gelation: a review. **Polymers**, v. 15, n. 13, p. 2875, 2023. DOI: <https://10.3390/polym15132875>.

BESTER, A. U.; CARVALHO, I. R.; SILVA, J. A. G. D.; HUTRA, D. J.; MOURA, N. B.; LAUTENCHLEGER, F.; LORO, M. V.; BESTER, A. U.; CARVALHO, I. R.; SILVA, J. A. G. D.; HUTRA, D. J.; MOURA, N. B.; LAUTENCHLEGER, F.; LORO, M. V. Three decades of cassava cultivation in Brazil: potentialities and perspectives. **Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas**, v. 15, n. 2, 2021. DOI: <http://10.17584/rcch.2021v15i2.12087>.

BOUIS, H. E.; HOTZ, C.; MCCLAFFERTY, B.; MEENAKSHI, J. V.; PFEIFFER, W. H. Biofortification: a new tool to reduce micronutrient malnutrition. **Food and Nutrition Bulletin**, v. 32, n. 1_suppl1, p. S31–S40, 2011. DOI: <https://10.1177/15648265110321S105>.

BREUNINGER, W. F.; PIYACHOMKWAN, K.; SRIROTH, K. Tapioca/cassava starch. **Starch**. Elsevier, 2009. p. 541–568. DOI: <https://10.1016/B978-0-12-746275-2.00012-4>.

BROWN, C. H.; CLEMENT, C. R.; PATIENCE EPPS; LUEDELING, E.; WICHMANN, S. The paleobiolinguistics of domesticated manioc (*Manihot esculenta*). **Ethnobiology Letters**, v. 4, p. 61–70, 2013. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/26423562>. Acesso em: 23 fev. 2026.

BUSTAMANTE-TORRES, M.; ROMERO-FIERRO, D.; ARCENTALES-VERA, B.; PALOMINO, K.; MAGAÑA, H.; BUCIO, E. Hydrogels classification according to the physical or chemical interactions and as stimuli-sensitive materials. **Gels**, v. 7, n. 4, p. 182, 2021. DOI: <https://10.3390/gels7040182>.

CARDOSO, A. dos S. *et al.* **Mandioca: agregação de valor e rentabilidade de negócios**. Brasília, DF: Embrapa Amazônia Oriental, p. 223, 2019. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1108529>. Acesso em: 23 fev. 2026.

CAVALIERI POLIZELI, K.; VIZIOLI, B.; FILHO, P.; CAGNA, C.; TORMENA, C. CASSAVA YIELD AND SOIL PHYSICAL PROPERTIES UNDER DIFFERENT TILLAGE SYSTEMS IN PARANÁ, SOUTHERN BRAZIL. **Scientia Agraria**, v. 20, 2024. <https://doi.org/10.5380/rsa.v1i1.95003>.

CEBALLOS, H.; ROJANARIDPICHED, C.; PHUMICHAJ, C.; BECERRA, L. A.; KITTIPADAKUL, P.; IGLESIAS, C.; GRACEN, V. E. Excellence in cassava

breeding: perspectives for the future. **Crop Breeding, Genetics and Genomics**, v. 2, n. 2, 2020. DOI: <https://10.20900/cbgg20200008>.

CEBALLOS, H.; HERSHEY, C.; IGLESIAS, C.; ZHANG, X. Fifty years of a public cassava breeding program: evolution of breeding objectives, methods, and decision-making processes. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 134, n. 8, p. 2335–2353, 2021. DOI: <https://10.1007/s00122-021-03852-9>.

CEBALLOS, H.; IGLESIAS, C. A.; PÉREZ, J. C.; DIXON, A. G. O. Cassava breeding: opportunities and challenges. **Plant Molecular Biology**, v. 56, n. 4, p. 503–516, 2004. DOI: <https://10.1007/s11103-004-5010-5>.

CEBALLOS, H.; KAWUKI, R. S.; GRACEN, V. E.; YENCHO, G. C.; HERSHEY, C. H. Conventional breeding, marker-assisted selection, genomic selection and inbreeding in clonally propagated crops: a case study for cassava. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 128, n. 9, p. 1647–1667, 2015. DOI: <https://10.1007/s00122-015-2555-4>.

CEBALLOS, Hernán; KULAKOW, P.; HERSHEY, C. Cassava breeding: current status, bottlenecks and the potential of biotechnology tools. **Tropical Plant Biology**, v. 5, n. 1, p. 73–87, 2012. DOI: <https://10.1007/s12042-012-9094-9>.

CEBALLOS, Hernán; OKOGBENIN, E.; PÉREZ, J. C.; LÓPEZ-VALLE, L. A. B.; DEBOUCK, D. Cassava. *In*: BRADSHAW, J. E. (org.). **Root and Tuber Crops**. New York, NY: Springer, 2010. p. 53–96. DOI: https://10.1007/978-0-387-92765-7_2.

CEBALLOS, H.; PÉREZ, J. C.; JOAQUI BARANDICA, O.; LENIS, J. I.; MORANTE, N.; CALLE, F.; PINO, L.; HERSHEY, C. H. Cassava breeding I: the value of breeding value. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, 2016. DOI: <https://10.3389/fpls.2016.01227>.

CEPEA. MANDIOCA: indústria de fécula e amidos modificados diversifica produção, e exportações aumentam. 2026. **Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada - CEPEA-Esalq/USP**. Disponível em: <https://cepea.org.br/br/mandioca-cepea-industria-de-fecula-e-amidos-modificados-diversifica-producao-e-exportacoes-aumentam.aspx>. Acesso em: 23 fev. 2026.

CHANDRA, K.; PANDEY, A.; KUMAR, P. **Synthetic seed – future prospects in crop improvement**, v. 6, n. 4, 2018.

CHANDRAN, L. M.; IRANIOSE, D. C.; THANKACHAN, A. A.; KUMAR, H. S. V.; VAIBHAV, S. S.; JAYA, V.; BALAN, K. Effect of latex content on morphological behaviour of coir-latex composite. **Materials Circular Economy**, v. 6, n. 1, p. 41, 2024. DOI: <https://10.1007/s42824-024-00126-9>.

CIAT. Cassava research approach at the Alliance. 2026. **Alliance Bioversity International - CIAT**. Disponível em: <https://alliancebioversityciat.org/crops/cassava/research-approach>. Acesso em: 25 fev. 2026.

CLEMENT, C. R.; DE CRISTO-ARAÚJO, M.; COPPENS D'EECKENBRUGGE, G.; ALVES PEREIRA, A.; PICANÇO-RODRIGUES, D. Origin and domestication of native amazonian crops. **Diversity**, v. 2, n. 1, p. 72–106, 2010. DOI: <https://10.3390/d2010072>.

COCK, J. H.; CONNOR, D. J. Cassava. **Crop Physiology Case Histories for Major Crops**: Academic Press, p. 588–633, 2021. DOI: <https://10.1016/B978-0-12-819194-1.00019-0>.

CONAB. Preços de mercado agrícola- 2025. 2025. **Conab**. Disponível em: <https://consultaprecosdemercado.conab.gov.br/#/home>. Acesso em: 23 fev. 2026.

CONCEICÃO, L. V. da; CORTES, D. F. M.; KLAUSER, D.; ROBINSON, M.; OLIVEIRA, E. J. de. New protocol for rapid cassava multiplication in field conditions: a perspective on speed breeding. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 2023. DOI: <https://10.3389/fpls.2023.1258101>.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. Modelos biométricos aplicados ao melhoramento de plantas. **Viçosa, UFV.**, p. 585, 2004.

CULLIS, B. R.; SMITH, A. B.; COOMBES, N. E. On the design of early generation variety trials with correlated data. **Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics**, v. 11, n. 4, p. 381–393, 2006. DOI: <https://10.1198/108571106X154443>.

DANSO, K. E.; FORD-LLOYD, B. V. Encapsulation of nodal cuttings and shoot tips for storage and exchange of cassava germplasm. **Plant Cell Reports**, v. 21, n. 8, p. 718–725, 2003. DOI: <https://10.1007/s00299-003-0594-9>.

DE ANDRADE, L. R. B.; SOUSA, M. B. e; WOLFE, M.; JANNINK, J.-L.; DE RESENDE, M. D. V.; AZEVEDO, C. F.; DE OLIVEIRA, E. J. Increasing cassava root yield: Additive-dominant genetic models for selection of parents and clones. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, 2022. DOI: <https://10.3389/fpls.2022.1071156>.

DE FRANÇA CARDOZO, L. V.; NETO, M. V. P. Fibra de coco na composição de substrato para produção de mudas de mamoeiro. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 11, n. 1, p. 246–251, 2021. Disponível em: <https://scholar.archive.org/work/kduijt2kz5h6rnzjwgn6ttjqia/access/wayback/https://periodicos.ufv.br/rbas/article/download/11588/6834>. Acesso em: 23 fev. 2026.

DE FREITAS, J. P. X.; DINIZ, R. P.; SANTOS, V. da S.; DE OLIVEIRA, E. J. Genetic parameters and selection gains in early clonal evaluation trials: implications for cassava breeding. **Euphytica**, v. 214, n. 7, p. 127, 2018. DOI: <https://10.1007/s10681-018-2209-0>.

DE FREITAS ROSA, M.; BEZERRA, F. C.; CORREIA, D.; DE SEIXAS SANTOS, F. J.; DE ABREU, F. A. P.; FURTADO, A. A. L.; BRÍGIDO, A. K. L.; DE VASCONCELOS NORÕES, E. R. Utilização da Casca de Coco como Substrato Agrícola. **EMBRAPA** 2002. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/MorsyleideRosa/publication/300907330_Utilizacao_da_casca_de_coco_como_substrato_agricola/links/570b0bcd08ae2eb94

21ffac/Utilizacao-da-casca-de-coco-como-substrato-agricola.pdf. Acesso em: 23 fev. 2026.

DO CARMO, C. D.; E SOUSA, M. B.; BRITO, A. C.; DE OLIVEIRA, E. J. Genome-wide association studies for waxy starch in cassava. **Euphytica**, v. 216, n. 5, p. 82, 2020. DOI: <https://10.1007/s10681-020-02615-9>.

DONATI, I.; CHRISTENSEN, B. E. Alginate-metal cation interactions: macromolecular approach. **Carbohydrate Polymers**, v. 321, p. 121-280, 2023. DOI: <https://10.1016/j.carbpol.2023.121280>.

DUITAMA, J.; KAFURI, L.; TELLO, D.; LEIVA, A. M.; HOFINGER, B.; DATTA, S.; LENTINI, Z.; ARANZALES, E.; TILL, B.; CEBALLOS, H. Deep assessment of genomic diversity in cassava for herbicide tolerance and starch biosynthesis. **Computational and Structural Biotechnology Journal**, v. 15, p. 185–194, 2017. DOI: <https://10.1016/j.csbj.2017.01.002>.

ELIAS, A. A.; RABBI, I.; KULAKOW, P.; JANNINK, J.-L. Improving genomic prediction in cassava field experiments using spatial analysis. **G3 Genes|Genomes|Genetics**, v. 8, n. 1, p. 53–62, 2018. DOI <https://10.1534/g3.117.300323>.

ELIAS, M.; MÜHLEN, G. S.; MCKEY, D.; ROA, A. C.; TOHME, J. Genetic diversity of traditional south american landraces of cassava (*Manihot esculenta* crantz): an analysis using microsatellites. **Economic Botany**, v. 58, n. 2, p. 242–256, 2004. DOI: [https://10.1663/0013-0001\(2004\)058\[0242:GDOTSA\]2.0.CO;2](https://10.1663/0013-0001(2004)058[0242:GDOTSA]2.0.CO;2).

EL-SHARKAWY, M. A. Cassava biology and physiology. **Plant Molecular Biology**, v. 53, n. 5, p. 621–641, 2003. DOI: <https://10.1023/B:PLAN.0000019109.01740.c6>.

EMBRAPA. Mandioca. 2024. **Portal Embrapa**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/mandioca-e-fruticultura/cultivos/mandioca>. Acesso em: 24 fev. 2026.

EMBRAPA. Embrapa leva tecnologias da mandioca e fruticultura para a Fenagro 2024. **Portal Embrapa-Agricultura familiar Produção vegetal Transferência de Tecnologia**, 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/96073489/embrapa-leva-tecnologias-da-mandioca-e-fruticultura-para-a-fenagro-2024>. Acesso em: 24 fev. 2026.

EMBRAPA. **Produção brasileira de mandioca em 2024 área colhida 2025**. Disponível em: https://www.cnpmf.embrapa.br/Base_de_Dados/index_pdf/dados/brasil/mandioca/b1_mandioca.pdf. Acesso em: 24 fev. 2026.

EMDAGRO. Análise conjuntural da mandioca 2025. **Empresa de Desenvolvimento Agropecuário de Sergipe**, p. 20, 2025. Disponível em: <https://emdagro.se.gov.br/wp-content/uploads/2025/07/MANDIOCA-ANALISE-CONJUNTURAL.pdf>.

EMMANUEL NORMAN, P.; DZIDZIENYO, D. K.; YANNAH KARIM, K. Assessing mating designs utilized in cassava population improvement. *In*: FREDIANSYAH, A. (org.). **Cassava - Biology, Production, and Use**: IntechOpen, 2021. DOI: <https://10.5772/intechopen.96785>.

ERIKSEN, L. **Nature and culture in prehistoric amazonia: using G.I.S. to reconstruct ancient ethnogenetic processes from archeology, linguistics, geography, and ethnohistory**. Lund: Department of Human Geography, Human Ecology Division, Lund University, 2011.

ESUMA, W.; HERSELMAN, L.; LABUSCHAGNE, M. T.; RAMU, P.; LU, F.; BAGUMA, Y.; BUCKLER, E. S.; KAWUKI, R. S. Genome-wide association mapping of provitamin A carotenoid content in cassava. **Euphytica**, v. 212, n. 1, p. 97–110, 2016. DOI: <https://10.1007/s10681-016-1772-5>.

FAISAL, M.; ALATAR, A. A. (org.). **Synthetic Seeds: Germplasm Regeneration, Preservation and Prospects**. Cham: Springer International Publishing, 2019. DOI: <http://10.1007/978-3-030-24631-0>.

FALCONER, D. S. **Introduction to quantitative genetics**. Pearson Education India, 1996.

FANG, C.; MAO, X.; GAO, M.; PAN, L. **Synthesis, characterization, and properties of bio-based polyacrylate latex pressure sensitive adhesives**, v. 226, n. 17, p. e00134, 2025. DOI: <https://10.1002/macp.202500134>.

FAO. **The state of food and agriculture 2013**. 2013. Disponível em: <https://www.fao.org/4/i3300e/i3300e00.htm>. Acesso em: 24 fev. 2026.

FAO. Crops and livestock products. 2024. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#home>. Acesso em: 24 fev. 2026.

FAPESPA, F. A. de amparo a estudos e pesquisas. **Boletim-agropecuário PARÁ-2024**. Pará, 2025. Disponível em: <https://www.fapespa.pa.gov.br/wp-content/uploads/2025/01/Boletim-Agropecuario-2024-VERSAO-PUBLICACAO.pdf>.

FATHIMA, A. A.; SANITHA, M.; TRIPATHI, L.; MUIRURI, S. Cassava (*Manihot esculenta*) dual use for food and bioenergy: A review. **Food and Energy Security**, v. 12, n. 1, p. e380, 2023. DOI: <https://10.1002/fes3.380>.

FILGUEIRAS, G. C.; HOMMA, A. K. O. Cassava crop: socioeconomic aspects, genetical enhancement, cultivation systems, management of pests and diseases and agroindustry. **EMBRAPA: Brasília-DF. 36p**, 2016.

FILHO, J. S. S.; OLIVEIRA, I. C. M.; PASTINA, M. M.; CAMPOS, M. de S.; OLIVEIRA, E. J. de. Genotype x Environment interaction in cassava multi-environment trials via analytic factor. **PLOS ONE**, v. 19, n. 12, p. e0315370, 2024. DOI: <https://10.1371/journal.pone.0315370>.

GHANBARALI, S.; ABDOLLAHI, M. R.; ZOLNORIAN, H.; MOOSAVI, S. S.; SEGUÍ-SIMARRO, J. M. Optimization of the conditions for production of synthetic seeds by encapsulation of axillary buds derived from minituber sprouts in potato (*Solanum tuberosum*). **Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)**, v. 126, n. 3, p. 449–458, 2016. DOI: <https://10.1007/s11240-016-1013-6>.

GUEDES, L. da S.; SOUSA, M. B. e; OLIVEIRA, E. J. de. Genotype x Environment interaction and correlations between agronomic traits, flowering, and fruit set in cassava. **Horticulturae**, v. 11, n. 6, p. 648, 2025. DOI: <https://10.3390/horticulturae11060648>.

HABTEGEBRIEL, H. M. Adaptability and stability for soybean yield by AMMI and GGE models in Ethiopia. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, 2022. DOI: <https://10.3389/fpls.2022.950992>.

HURTADO, A.; ALJABALI, A. A. A.; MISHRA, V.; TAMB UWALA, M. M.; SERRANO-ARCA, Á. Alginate: enhancement strategies for advanced applications. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 9, 2022. DOI: <https://10.3390/ijms23094486>.

HUSSEIN, E. T.; AHMED, M. F.; ABDEL-GABER, R.; BALOGUN, O. S.; RAZIK, A. B. A. Synthesis and characterization of artificial seeds plantlets of in vitro male *Populus alba*. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture**, v. 156, n. 2, p. 37, 2023. DOI: <https://10.1007/s11240-023-02664-7>.

IBGE. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola - LSPA**. 2025. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/busca.html?searchword=mandioca>. Acesso em: 24 fev. 2026.

IMMANUEL, S.; JAGANATHAN, D.; PRAKASH, P.; SIVAKUMAR, P. S. Cassava for food security, poverty reduction and climate resilience: a review. **Indian Journal of Ecology**, v. 51, p. 21–31, 2024. DOI: <https://10.55362/IJE/2024/4191>.

JAKRAWATANA, N.; PINGMUANGLEKA, P.; GHEEWALA, S. H. Material flow management and cleaner production of cassava processing for future food, feed and fuel in Thailand. **Journal of Cleaner Production**, v. 134, p. 633–641, 2016. DOI: <https://10.1016/j.jclepro.2015.06.139>.

JONES, W. O. **Manioc in Africa**. 1959. p.315, 1959. Disponível em: https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Manioc+in+Africa&author=W.+O.+Jones. Acesso em: 24 fev. 2026.

KAWANO, K. Thirty years of cassava breeding for productivity—biological and social factors for success. **Crop Science**, v. 43, n. 4, p. 1325–1335, 2003. DOI: <https://10.2135/cropsci2003.1325>.

KEDDIE, J. L. Film formation of latex. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, v. 21, n. 3, p. 101–170, 1997. DOI: [https://10.1016/S0927-796X\(97\)00011-9](https://10.1016/S0927-796X(97)00011-9).

KITTO, S. L.; JANICK, J. Production of synthetic seeds by encapsulating asexual embryos of carrot. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, 1985. DOI: <https://10.21273/JASHS.110.2.277>.

LÉOTARD, G.; DUPUTIÉ, A.; KJELLBERG, F.; DOUZERY, E. J. P.; DEBAIN, C.; DE GRANVILLE, J.-J.; MCKEY, D. Phylogeography and the origin of cassava: new insights from the northern rim of the amazonian basin. **Molecular Phylogenetics and Evolution**, v. 53, n. 1, p. 329–334, 2009. DOI: <https://10.1016/j.ympev.2009.05.003>.

LOMBARDO, U.; IRIARTE, J.; HILBERT, L.; RUIZ-PÉREZ, J.; CAPRILES, J. M.; VEIT, H. Early Holocene crop cultivation and landscape modification in Amazonia. **Nature**, v. 581, n. 7807, p. 190–193, 2020. DOI: <https://10.1038/s41586-020-2162-7>.

LONG, E. M.; STITZER, M. C.; MONIER, B.; SCHULZ, A. J.; ROMAY, M. C.; ROBBINS, K. R.; BUCKLER, E. S. Evolutionary signatures of the erosion of sexual reproduction genes in domesticated cassava (*Manihot esculenta*). **G3 Genes|Genomes|Genetics**, v. 15, n. 2, p. jkae282, 2025. DOI: <https://10.1093/g3journal/jkae282>.

LÓPEZ-SANTIAGO, R. F.; CASTILLO, R. Alginate biopolymer viscoelasticity from sol to gel: linear and nonlinear rheology, and brownian motion of tracer particles embedded in the polymer network. **Physics of Fluids**, v. 37, n. 1, p. 013110, 2025. DOI: <https://10.1063/5.0245878>.

LU, Y.; DING, Y.; WU, Q. Simultaneous saccharification of cassava starch and fermentation of algae for biodiesel production. **Journal of Applied Phycology**, v. 23, n. 1, p. 115–121, 2011. DOI: <https://10.1007/s10811-010-9549-z>.

MURASHIGE, T. The impact of plant tissue culture on agriculture. *Frontiers of plant tissue cultures*. **International Association for Plant Tissue Culture**, 1978.

MURRAY, F. V. N.; COHEN, J. E. Efficacy of shoot production of cassava using the multiple shoot removal technique for rapid propagation. **The Journal of Agricultural Science**, v. 159, n. 3–4, p. 177–187, 2021. DOI: <https://10.1017/S0021859621000356>.

NANDA, D.; BEHERA, D.; PATTNAIK, S. S.; BEHERA, A. K. Advances in natural polymer-based hydrogels: synthesis, applications, and future directions in biomedical and environmental fields. **Discover Polymers**, v. 2, n. 1, p. 6, 2025. DOI: <https://10.1007/s44347-025-00017-5>.

NEVES, R. de J.; SOUZA, L. S.; OLIVEIRA, E. J. de. A leaf bud technique for rapid propagation of cassava (*Manihot esculenta* Crantz). **Scientia Agricola**, v. 77, p. e20180005, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2018-0005>.

NEVES, R. J.; DINIZ, R. P.; OLIVEIRA, E. J. D. Productive potential of cassava plants (*Manihot esculenta* Crantz) propagated by leaf buds. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, p. 1733–1747, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765201820170867>.

NUWAMANYA, E.; BAGUMA, Y.; EMMAMBUX, M. N.; TAYLOR, J. R. N. (John R. N.; RUBAIHAYO, P. Physicochemical and functional characteristics of cassava starch in Ugandan varieties and their progenies. **Journal of Plant Breeding and Crop Science**, v. 2, p. 001–011, 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/2263/16845>. Acesso em: 24 fev. 2026.

OGBONNA, A. C.; BRAATZ DE ANDRADE, L. R.; MUELLER, L. A.; DE OLIVEIRA, E. J.; BAUCHET, G. J. Comprehensive genotyping of a Brazilian cassava (*Manihot esculenta* Crantz) germplasm bank: insights into diversification and domestication. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 134, n. 5, p. 1343–1362, 2021. DOI: <https://10.1007/s00122-021-03775-5>.

OGUNDAHUNSI, O. E.; AKPAN, G. E.; SHITTU, T. D.; UMANI. Biofuel production from cassava processing by-products and processing wastes. **Sustainable Cassava**. Academic Press, 2024. p. 311–328. DOI: <https://10.1016/B978-0-443-21747-0.00017-5>.

OGUNYINKA, O.; OGUNTUASE, A. Analysis of cassava production and processing by various groups in support of cassava value chain in the south west of Nigeria. **ISABB Journal of Food and Agricultural Sciences**, v. 9, n. 1, p. 11–19, 2020. DOI: <http://10.5897/ISABB-JFAS2020.0113>.

OKOGBENIN, E.; EGESI, C. N.; OLASANMI, B.; OGUNDAPO, O.; KAHYA, S.; HURTADO, P.; MARIN, J.; AKINBO, O.; MBA, C.; GOMEZ, H.; DE VICENTE, C.; BAIYERI, S.; UGURU, M.; EWA, F.; FREGENE, M. Molecular marker analysis and validation of resistance to cassava mosaic disease in elite cassava genotypes in nigeria. **Crop Science**, v. 52, n. 6, p. 2576–2586, 2012. DOI: <https://10.2135/cropsci2011.11.0586>.

OKOMA, P. M.; KAYONDO, S. I.; RABBI, I. Y.; MORENO-CADENA, P. L.; HOOGENBOOM, G.; JANNINK, J.-L. Evaluating a cassava crop growth model by optimizing genotype-specific parameters using multi-environment trial breeding data. **Frontiers in Plant Science**, v. 16, 2025. DOI: <https://10.3389/fpls.2025.1535058>.

OLIVEIRA, C. R. S. de; BOREL, J. C.; PEREIRA, D. A.; CARVALHO, B. P. de; MEDRADO, E. da S.; ISHIKAWA, F. H.; OLIVEIRA, E. J. de. Genetic parameters and path analysis for root yield of cassava under drought and early harvest. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 21, p. e36162137, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1984-70332021v21n3a46>.

OLIVEIRA, E. J. de; OLIVEIRA, S. A. S. de; OTTO, C.; ALICAI, T.; FREITAS, J. P. X. de; CORTES, D. F. M.; PARIYO, A.; LIRI, C.; ADIGA, G.; BALMER, A.; KLAUSER, D.; ROBINSON, M. A novel seed treatment-based multiplication approach for cassava planting material. **PLOS ONE**, v. 15, n. 3, p. e0229943, 2020. DOI: <https://10.1371/journal.pone.0229943>.

OLSEN, K. M. SNPs, SSRs and inferences on cassava's origin. **Plant Molecular Biology**, v. 56, n. 4, p. 517–526, 2004. DOI: <https://10.1007/s11103-004-5043-9>.

OLSEN, K. M.; SCHAAL, B. A. Microsatellite variation in cassava (*Manihot esculenta*, Euphorbiaceae) and its wild relatives: further evidence for a southern Amazonian origin of domestication. **American Journal of Botany**, v. 88, n. 1, p. 131–142, 2001. DOI: <https://10.2307/2657133>.

ONISHI, N.; MASHIKO, T.; OKAMOTO, A. Cultural system producing encapsulatable units of synthetic seeds in celery. **Acta Horticulturae**, n. 319, p. 113–118, 1992. DOI: <https://10.17660/ActaHortic.1992.319.12>.

ORTIZ, D.; SÁNCHEZ, T.; MORANTE, N.; CEBALLOS, H.; PACHÓN, H.; CHÁVEZ, A. L.; ESCOBAR, A. F. Sampling strategies for proper quantification of carotenoid content in cassava breeding. **Journal of Plant Breeding and Crop Science**, v. 3, p. 14–23, 2011.

OTUN, S.; ESCRICH, A.; ACHILONU, I.; RAUWANE, M.; LERMA-ESCALERA, J. A.; MORONES-RAMÍREZ, J. R.; RIOS-SOLIS, L. The future of cassava in the era of biotechnology in Southern Africa. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 43, n. 4, p. 594–612, 2023. DOI: <https://10.1080/07388551.2022.2048791>.

PARMAR, A.; STURM, B.; HENSEL, O. Crops that feed the world: Production and improvement of cassava for food, feed, and industrial uses. **Food Security**, v. 9, n. 5, p. 907–927, 2017. DOI: <https://10.1007/s12571-017-0717-8>.

PARSA, S.; MEDINA, C.; RODRÍGUEZ, V. Sources of pest resistance in cassava. **Crop Protection**, v. 68, p. 79–84, 2015. DOI: <https://10.1016/j.cropro.2014.11.007>.

PATEL, A. V.; PUSCH, I.; MIX-WAGNER, G.; VORLOP, K. D. A novel encapsulation technique for the production of artificial seeds. **Plant Cell Reports**, v. 19, n. 9, p. 868–874, 2000. DOI: <https://10.1007/s002990000223>.

PIEPHO, H. P.; MÖHRING, J.; MELCHINGER, A. E.; BÜCHSE, A. BLUP for phenotypic selection in plant breeding and variety testing. **Euphytica**, [S.l.], v. 161, n. 1, p. 209–228, 2008. DOI: <https://10.1007/s10681-007-9449-8>.

PITALOKA, D.; SUDIARSO; TYASMORO, S. Y.; PRAYOGO, C. Application of sodium alginate on encapsulation sugarcane bud chips (*Saccharum officinarum* L) to improve seed quality and production. **Badebio Biotechnology Ltd.** 2021. Disponível em: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20220167783>. Acesso em: 24 fev. 2026.

PONCE, T. P.; RIBEIRO, M. R.; TELLES, T. S. Dinâmica espacial da produção de mandioca no Paraná, Brasil. **Confins. Revue franco-brésilienne de géographie / Revista franco-brasileira de geografia**, n. 48, 2020. DOI: <https://10.4000/confins.34307>.

POOTAKHAM, W.; SHEARMAN, J. R.; RUANG-AREERATE, P.; SONTHIROD, C.; SANGSRAKRU, D.; JOMCHAI, N.; YOOCHA, T.; TRIWITAYAKORN, K.; TRAGOONRUNG, S.; TANGPHATSORNRUANG, S. Large-scale SNP discovery through RNA sequencing and SNP genotyping by targeted enrichment sequencing in cassava (*manihot esculenta crantz*). **PLOS ONE**, v. 9, n. 12, p. e116028, 2014. DOI: <https://10.1371/journal.pone.0116028>.

QAHTAN, A. A.; ABDEL-SALAM, E. M.; ALATAR, A. A.; WANG, Q.-C.; FAISAL, M. An introduction to synthetic seeds: production, techniques, and applications. *In*: FAISAL, M.; ALATAR, A. A. (org.). **Synthetic Seeds: Germplasm Regeneration, Preservation and Prospects**. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 1–20. DOI: https://10.1007/978-3-030-24631-0_1.

RABBI, Ismail Yusuf; KAYONDO, Siraj Ismail; BAUCHET, Guillaume; *et al.* Genome-wide association analysis reveals new insights into the genetic architecture of defensive, agro-morphological and quality-related traits in cassava. **Plant Molecular Biology**, v. 109, n. 3, p. 195–213, 2022. DOI: <https://10.1007/s11103-020-01038-3>.

REDENBAUGH, K.; SLADE, D.; VISS, P.; FUJII, J. A. Encapsulation of somatic embryos in synthetic seed coats. **HortScience**, v. 22, n. 5, p. 803–809, 1987. Disponível em: <https://journals.ashs.org/downloadpdf/view/journals/hortsci/22/5/article-p803.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2026.

RESENDE, M. D. V. de. **Genetica biometrica e estatistica no melhoramento de plantas perenes**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica: p. 975, 2002. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/1gvqiiVGNfcRwIG1WLRge7wEavNqPOT2j/view?usp=share_link&usp=embed_facebook. Acesso em: 25 fev. 2026.

RESENDE, M. D. V. De. **Matemática e estatística na análise de experimentos e no melhoramento genético**. 1. ed. Colombo: Embrapa Florestas: p. 362, 2007. Disponível em: https://drive.google.com/file/u/0/d/1GaANPoDRpLZ6HDCgEBck9YbxJtO5XZmL/view?usp=drive_link&pli=1&usp=embed_facebook. Acesso em: 25 fev. 2026.

RIHAN, H. Z.; KAREEM, F.; EL-MAHROUK, M. E.; FULLER, M. P. Artificial seeds (principle, aspects and applications). **Agronomy**, v. 7, n. 4, 2017. DOI: <https://10.3390/agronomy7040071>.

SALAZAR, M. del R.; DUQUE, J. F. S.; SAENZ-GALINDO, A.; RODRIGUEZ-HERRERA, R. (org.). **Biodegradable Polymers: Concepts and Applications**. Boca Raton: CRC Press, p. 354, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003230533>.

SANTOS, V. da S.; PEREIRA, H. D.; FILHO, J. S. S.; ANDRADE, L. R. B. de. Genetic merit of parents and heterosis in cassava (*Manihot esculenta* Crantz). **Horticulturae**, v. 11, n. 7, 2025. DOI: <https://10.3390/horticulturae11070714>.

SANTOS, V. da S.; SOUZA, A. D. S.; VIANA, A. E. S.; FERREIRA FILHO, J. R.; SOUZA, K. D. S.; MENEZES, M. C.; MENEZES, M. C. **Multiplicação rápida, método simples e de baixo custo na produção de material propagativo de mandioca**, 2009. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/748639/multiplicacao-rapida-metodo-simples-e-de-baixo-custo-na-producao-de-material-propagativo-de-mandioca>. Acesso em: 25 fev. 2026.

SCHOFFEL, A.; LOPES, S. J.; KOEFENDER, J.; LÚCIO, A. D.; CAMERA, J. N.; GOLLE, D. P. Adaptation of the rapid multiplication method: selecting stem cuttings based on their number of leaves for cassava seedling production. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 43, p. e50289, 2021. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v43i1.50289>.

SEMADESC. MS bate recorde na produção de mandioca e lidera exportação de fécula no País. 2024. **SEMADESA- Secretaria de Meio Ambiente, Desenvolvimento, Ciência, Tecnologia e Inovação**. Disponível em: <https://www.semadesec.ms.gov.br/ms-bate-recorde-na-producao-de-mandioca-e-lidera-exportacao-de-fecula-no-pais/>. Acesso em: 24 fev. 2026.

SILVA, M. L. da; PINTO, D. L. P.; GUERRA, M. P.; LANII, E. R. G.; CARVALHO, I. de; ROSSI, A. A. B.; OTONI, W. C. Synthetic seeds of a wild passionfruit species with ornamental potential. **Ornam Hortic**, v. 21, n. 3, p. 331–338, 2015. DOI: <https://doi.org/10.14295/oh.v21i3.752>.

SILVA, J. S.; BRAULIO, C. da S.; JESUS, D. S. de; LEITE, E. da S.; NÓBREGA, R. S. A.; MARTINS, R. P.; NÓBREGA, J. C. A. Hidrogel associado a níveis de umidade do solo no cultivo de *Eucalyptus urograndis*. **Ciência Florestal**, v. 34, p. e73403, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509873403>.

SIMCHAREON, W.; AMNUAIKIT, T.; BOONME, P.; TAWEEPRED, W.; PICHAYAKORN, W. Characterization of natural rubber latex film containing various enhancers. **Procedia Chemistry**, v. 4, p. 308–312, 2012. DOI: <https://10.1016/j.proche.2012.06.043>.

SIMON, M. F.; MENDOZA FLORES, J. M.; LIU, H.-L.; MARTINS, M. L. L.; DROVETSKI, S. V.; *et al.* Phylogenomic analysis points to a South American origin of *Manihot* and illuminates the primary gene pool of cassava. **New Phytologist**, v. 233, n. 1, p. 534–545, 2022. DOI: <https://10.1111/nph.17743>.

SKRZYPCZAK, D.; JARZEMBOWSKI, Ł.; IZYDORCZYK, G.; MIKULA, K.; *et al.* Hydrogel alginate seed coating as an innovative method for delivering nutrients at the early stages of plant growth. **Polymers**, v. 13, n. 23, 2021. DOI: <https://10.3390/polym13234233>.

SOUSA, M. B. e; ANDRADE, L. R. B. de; SOUZA, E. H. de; ALVES, A. A. C.; OLIVEIRA, E. J. de. Reproductive barriers in cassava: Factors and implications for genetic improvement. **PLOS ONE**, v. 16, n. 11, p. e0260576, 2021. DOI: <https://10.1371/journal.pone.0260576>.

STAMP, J. A.; HENSHAW, G. G. Secondary somatic embryogenesis and plant regeneration in cassava. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture**, v. 10, n. 3, p. 227–233, 1987. DOI: <https://10.1007/BF00037307>.

SZABADOS, L.; HOYOS, R.; ROCA, W. In vitro somatic embryogenesis and plant regeneration of cassava. **Plant Cell Reports**, v. 6, n. 3, p. 248–251, 1987. DOI: <https://10.1007/BF00268492>.

TADDA, S. A.; KUI, X.; YANG, H.; LI, M.; HUANG, Z.; CHEN, X.; QIU, D. The response of vegetable sweet potato (*Ipomoea Batatas lam*) nodes to different

concentrations of encapsulation agent and MS salts. **Agronomy**, v. 12, n. 1, 22 dez. 2021. DOI: <https://10.3390/agronomy12010019>.

TONUKARI, N. J. Cassava and the future of starch. **Electronic Journal of Biotechnology**, v. 7, n. 1, p. 5–8, 2004. Disponível em: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0717-34582004000100003&lng=es&nrm=iso&tlng=en. Acesso em: 25 fev. 2026.

TORRES, L. G.; RESENDE, M. D. V. de; AZEVEDO, C. F.; SILVA, F. F. e; OLIVEIRA, E. J. de. Genomic selection for productive traits in biparental cassava breeding populations. **PLOS ONE**, v. 14, n. 7, p. e0220245, 2019. DOI: <https://10.1371/journal.pone.0220245>.

VELMURUGAN, M.; JANA HARSHINI, R.; *et al.* Cassava breeding: Classical to recent breeding approaches for food, industry and climate resilience. **Journal of Environmental Biology**, v. 45, n. 5, p. 487–497, 2024. DOI: <http://j10.22438/jeb/45/5/MRN-5309>. df. Acesso em: 24 fev. 2026.

WANG, W.; FENG, B.; XIAO, J.; XIA, Z.; ZHOU, X.; *et al.* Cassava genome from a wild ancestor to cultivated varieties. **Nature Communication**, v. 5, n. 1, p. 5110, 2014. DOI: <https://10.1038/ncomms6110>.

WATERSCHOOT, J.; GOMAND, S. V.; FIERENS, E.; DELCOUR, J. A. Production, structure, physicochemical and functional properties of maize, cassava, wheat, potato and rice starches. **Starch - Stärke**, v. 67, n. 1–2, p. 14–29, 2015. DOI: <https://10.1002/star.201300238>.

WOLFE, M. D.; KULAKOW, P.; RABBI, I. Y.; JANNINK, J.-L. Marker-based estimates reveal significant nonadditive effects in clonally propagated cassava (*Manihot esculenta*): implications for the prediction of total genetic value and the selection of varieties. **G3 Genes|Genomes|Genetics**, v. 6, n. 11, p. 3497–3506, 2016. DOI: <https://10.1534/g3.116.033332>.

YÜCESAN, B. Synseed: a new trend in seed technology. *In*: FAISAL, M.; ALATAR, A. A. (org.). **Synthetic Seeds Germplasm Regeneration, Preservation and Prospects**. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 61–75. DOI: https://10.1007/978-3-030-24631-0_3.

ZEKARIAS, T.; BASA, B.; HERAGO, T. Medicinal, nutritional and anti-nutritional properties of cassava (*Manihot esculenta*): a review. 2019. <https://doi.org/10.5829/idosi.aj.2019.34.46>.

ZHU, F. Composition, structure, physicochemical properties, and modifications of cassava starch. **Carbohydrate Polymers**, v. 122, p. 456–480, 2015. DOI: <https://10.1016/j.carbpol.2014.10.063>.

Capítulo 1

Novo protocolo para multiplicação rápida de mandioca em condições de campo: uma perspectiva sobre o melhoramento rápido¹

¹Artigo publicado: Front. Plant Sci., 10 September 2023
Sec. Plant Breeding, Volume 14 – 2023.
Doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1258101>

Novo protocolo para multiplicação rápida de mandioca em condições de campo: uma perspectiva sobre o melhoramento rápido

Leila Verena da Conceição¹, Diego Fernando Marmolejo Cortes², Dominik Klauser³, Michael Robinson³, Éder Jorge de Oliveira^{2*}

¹Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas; ²Embrapa Mandioca e Fruticultura, Nugene, Cruz das Almas, Bahia, Brasil; ³Fundação Syngenta para Agricultura Sustentável, Basileia, Suíça

* Correspondente: Eder Jorge de Oliveira
eder.oliveira@embrapa.br

Palavras-chave: *Manihot esculenta* Crantz¹, seleção², otimização³, ciclo de melhoramento⁴, tratamento de sementes⁵.

RESUMO: Apesar da importância econômica e social, cultivares de mandioca de alto rendimento só são liberadas após extensa pesquisa, principalmente devido à baixa taxa de multiplicação. Este estudo teve como objetivo avaliar o impacto do uso de estacas de sementes de menor tamanho tratadas com agroquímicos (8MP) em comparação ao tamanho de plantio convencional (16 cm) em parâmetros genéticos, desempenho agrônomico e classificação de clones de mandioca com base em atributos de rendimento e crescimento. A avaliação foi realizada em ensaio de avaliação clonal (CET), ensaio preliminar de rendimento (PYT) e ensaios de rendimento uniforme (UYT). Além disso, um novo esquema de seleção para programas de melhoramento de mandioca foi proposto. Um total de 169 clones foram avaliados, incluindo 154 clones melhorados em diferentes estágios de seleção e 15 variedades locais usadas como testemunhas. Ensaios de campo foram conduzidos usando ambos os tamanhos de material propagativo (8MP e 16 cm) em cada fase do programa de melhoramento. Os dados foram analisados usando modelos mistos, considerando os efeitos aleatórios do genótipo e a interação genótipo-ambiente (G×E) para determinar variâncias e herdabilidades. A análise de concordância e correlação de Bland-Altman dos índices de seleção foi empregada para examinar a consistência na classificação de clones de mandioca usando diferentes tamanhos de estacas de sementes. A distribuição dos componentes de variância, herdabilidades, médias e amplitude dos ensaios de 8MP e 16 cm em diferentes fases do programa de melhoramento de mandioca exibiram notável similaridade, permitindo assim uma avaliação comparativa de efeitos genéticos semelhantes. Com uma intensidade de seleção de 30%, a concordância na classificação dos clones foi de 0,41, 0,57 e 0,85 nos ensaios CET, PYT e UYT, respectivamente, ao comparar a seleção baseada nos ensaios de 8MP e 16 cm. Vale ressaltar que a classificação dos 15% melhores permaneceu praticamente inalterada. Com base nos resultados, as mudanças propostas no esquema de seleção da mandioca envolvem o aumento do número de ensaios a partir da fase CET, a incorporação precoce da interação G×E, a eliminação do ensaio PYT, a redução do ciclo de melhoramento de 5 para 3 anos e a redução do tempo necessário para o desenvolvimento da variedade de 11 para 9 anos. Espera-se que essas modificações levem à redução de custos e aumentem a eficácia dos programas de melhoramento da mandioca.

1. INTRODUÇÃO

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é reconhecida como a segunda fonte mais importante de amido em nível global (Stapleton, 2012). Ela serve como cultura fundamental para inúmeros processos agroindustriais em todo o mundo. Além de sua importância industrial, a mandioca tem sido identificada como uma cultura crucial para garantir a segurança alimentar, particularmente na África Subsaariana (Ceballos et al., 2020; FAOSTAT, 2020). Apesar do recente aumento no comércio global e nas exportações de produtos de mandioca, levando a níveis recordes de produção de raízes (Howeler et al., 2013), a produtividade média da mandioca no Brasil permanece baixa, com 14,70 t.ha⁻¹, significativamente abaixo do potencial alcançado por novas cultivares (27,50 t.ha⁻¹ em ciclo anual) (Oliveira et al., 2020).

De modo geral, a baixa produtividade de raízes no Brasil pode ser atribuída a diversos fatores limitantes, incluindo a baixa fertilidade do solo, materiais de propagação inadequados, variedades de baixo rendimento ou inadequadas para regiões específicas e a falta de avanços tecnológicos nos sistemas de produção (Andrade et al., 2019). Os programas de melhoramento genético da mandioca devem abordar esses fatores para recomendar genótipos de alto rendimento que atendam às necessidades dos usuários finais. Considerado o principal indicador da tecnologia adotada por agricultores em diferentes níveis tecnológicos, o desenvolvimento e a adoção de novas cultivares continuam sendo um desafio significativo para os programas de melhoramento. Em ambos os casos, a baixa taxa de multiplicação da mandioca exige vários anos para o desenvolvimento de novas cultivares, e a adoção dessas cultivares pelos agricultores costuma ser lenta. Isso resulta em considerável frustração, já que os impactos das novas cultivares só são percebidos pelos agricultores décadas após o seu lançamento.

Os recentes avanços em tecnologias como transformação genética, seleção genômica e edição de genes oferecem o potencial de introgressão ou manipulação de regiões genômicas para conferir vantagens adaptativas e agronômicas (como resistência a doenças, tolerância a herbicidas e melhoria da qualidade do amido). No entanto, essas novas abordagens têm maior probabilidade de sucesso quando integradas a programas de melhoramento

genético que também incluem avaliação convencional e testes de adoção com agricultores (Ceballos et al., 2020).

As abordagens convencionais utilizadas no melhoramento da mandioca geralmente se baseiam na seleção fenotípica recorrente, o que leva à variação no ciclo de seleção da mandioca, que normalmente varia de 5 a 6 anos. O tempo total necessário para desenvolver novas cultivares é de cerca de 10 a 12 anos (Oliveira et al., 2012; Wolfe et al., 2016; Ceballos et al., 2020). As principais etapas envolvidas na seleção fenotípica em programas de melhoramento da mandioca incluem: i) cruzamento de genitores de elite para produzir progênies; ii) testes de avaliação de mudas (SET); iii) testes de avaliação clonal (CET), onde os clones são plantados sem repetição e selecionados com base em características de alta herdabilidade; iv) ensaios preliminares de rendimento (PYT), onde as avaliações replicadas começam e a seleção é baseada em características de herdabilidade média a alta; v) ensaios avançados de rendimento (AYT), que envolvem parcelas maiores, múltiplos ambientes e características de herdabilidade média. vi) ensaios de rendimento uniforme (UYT), caracterizados pela avaliação de clones em múltiplas repetições, diferentes ambientes e vários anos para obter dados mais precisos para características com baixa herdabilidade; vii) ensaios com agricultores, que utilizam parcelas experimentais maiores e técnicas adotadas por agricultores colaboradores para avaliar o potencial de adoção de novas cultivares e iniciar as fases de multiplicação; e viii) as etapas subsequentes envolvem a multiplicação e o lançamento de novas cultivares em ambientes-alvo.

Devido à heterozigiosidade dos genitores da mandioca, as progênies resultantes dos cruzamentos são geneticamente diversas, e cada planta F1 é geneticamente distinta. De acordo com Falconer e Mackay (1996), o valor genético dos genótipos heterozigotos é influenciado tanto por ações gênicas aditivas quanto não aditivas (dominância e epistasia). No entanto, a seleção recorrente para o desenvolvimento parental depende da variabilidade genética atribuível a efeitos aditivos, uma vez que esse componente determina o ganho genético a longo prazo da população. Por outro lado, a seleção clonal entre plantas F1 de diferentes progênies de mandioca oferece a vantagem de explorar plenamente tanto os efeitos aditivos quanto os não aditivos (Bradshaw, 2016). Portanto, os principais programas de melhoramento da mandioca têm se concentrado no melhoramento da população (aumentando o valor aditivo ao longo

do tempo para várias características) e na seleção de clones para o desenvolvimento de cultivares (explorando tanto os efeitos genéticos aditivos quanto os não aditivos).

No melhoramento da mandioca, as progênies F1 são geradas por reprodução sexuada, mas sua multiplicação é realizada por propagação clonal nas etapas subsequentes de seleção. Esse método de propagação representa um dos principais desafios nos programas de melhoramento da mandioca, pois exige o equilíbrio entre a seleção fenotípica e a disponibilidade de material de propagação. Tradicionalmente, a mandioca é propagada por meio de estacas, resultando em uma baixa taxa de multiplicação entre plantas-mãe e descendentes, tipicamente variando de 1:5 a 1:10 (Oliveira et al., 2020). Portanto, novos genótipos são inicialmente testados como plântulas em ensaios não replicados (SET). Clones selecionados dos ensaios SET são então propagados clonalmente para gerar plantas geneticamente idênticas, que são avaliadas em ensaios clonais não replicados (CET). Posteriormente, os genótipos restantes são avaliados em parcelas experimentais maiores com múltiplas repetições em campo (PYT). À medida que as seleções fenotípicas progredem, o número de genótipos é progressivamente reduzido, e os selecionados são testados em parcelas experimentais maiores, em múltiplos ambientes e ao longo de vários anos de cultivo (AYT e UYT).

Este esquema de melhoramento genético sofreu apenas algumas modificações específicas nas últimas décadas. Conseqüentemente, a seleção para características menos herdáveis tem sido conduzida principalmente em estágios avançados, como AYT e UYT, onde avaliações em diferentes ambientes permitem a análise da interação genótipo x ambiente (GxA). A interação GxA ocorre quando a contribuição dos alelos que controlam uma característica ou seus níveis de expressão diferem entre os ambientes (Gauch e Zobel, 1996). A seleção de genitores com alto valor genético ou alto desempenho agrônômico para o desenvolvimento de cultivares melhoradas geralmente ocorre de 5 a 6 anos após os cruzamentos iniciais (após a seleção baseada nos testes AYT e UYT).

Existem diversas tecnologias disponíveis para aumentar a taxa de multiplicação da mandioca, como a micropropagação *in vitro*, a produção de mudas a partir de gemas foliares imaturas e o método hidropônico semiautotrófico (SAH), mais recente (IITA, 2017). No entanto, esses métodos requerem

infraestrutura específica, como estufas e meios/substratos de cultivo especializados, o que os torna mais caros para uso em larga escala no melhoramento da mandioca. Além disso, esses métodos produzem mudas de mandioca como produto final, em vez de estacas, o que pode gerar complicações operacionais no campo e pode não refletir totalmente o potencial e os padrões de produção de materiais caulinares derivados diretamente. Por outro lado, Oliveira et al. (2020) desenvolveram recentemente uma formulação composta por agroquímicos protetores e estimulantes de crescimento, que demonstrou potencial para manter as taxas de germinação e melhorar a resiliência da mandioca. Segundo os autores, estacas caulinares de 8 cm de comprimento tratadas com a formulação (doravante denominadas 8MP) apresentaram potencial de germinação e desempenho agrônomico semelhantes ao padrão local de cultivo com estacas de 16 cm não tratadas. Portanto, os principais objetivos deste estudo foram: i) avaliar o uso de agroquímicos protetores e estimulantes de crescimento nos parâmetros genéticos relacionados a características de produtividade e crescimento da mandioca em diferentes fases do programa de melhoramento genético da mandioca (CET, PYT e UYT); ii) avaliar a concordância na classificação de clones de mandioca dos tratamentos 8MP e 16 cm em diferentes estágios de seleção, considerando características agrônomicas e índices de seleção; iii) avaliar as diferenças no desempenho agrônomico entre os tratamentos 8MP e 16 cm em diferentes estágios de seleção. Além disso, este manuscrito discute novas perspectivas para reduzir o número de etapas seletivas e, conseqüentemente, o tempo necessário para o desenvolvimento de novas cultivares de mandioca.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material vegetal e delineamento experimental

O programa de melhoramento de mandioca da Embrapa Mandioca e Fruticultura avaliou híbridos para a indústria de amido, bem como variedades de mandioca para consumo in natura comumente comercializadas para o mercado de amido durante os períodos de pico (Tabela S1). Um total de 169 clones de mandioca foram incluídos na avaliação, consistindo em 154 novos clones

melhorados testados em diferentes estágios (CET, PYT e UYT) e 15 variedades locais (testemunhas) usadas como padrões agronômicos nas regiões-alvo.

O CET utilizou um delineamento de blocos aumentados com 69 clones de tratamento não comuns e 11 controles comuns, distribuídos uniformemente em 18 blocos (Tabela 1). As parcelas no ensaio CET consistiram em uma única fileira com oito plantas. Para os ensaios PYT, foi utilizado um delineamento em blocos completos casualizados com duas repetições. O número de novos clones avaliados variou de 19 a 71, dependendo da disponibilidade de material de propagação por ensaio. Adicionalmente, foram incluídos entre 11 e 13 controles. As parcelas experimentais PYT compreendiam duas fileiras com oito plantas cada, resultando em um total de 16 plantas por parcela. Os testes UYT foram conduzidos utilizando um delineamento em blocos completos casualizados com três repetições. As parcelas experimentais consistiam em 40 plantas dispostas em quatro fileiras com 10 plantas cada. Nos ensaios UYT, 14 novos clones foram avaliados juntamente com 10 controles locais.

O programa de melhoramento genético da mandioca implementou os seguintes ensaios:

i) Dois ensaios de CET conduzidos na safra de 2022 no município de Cruz das Almas (BA). Um ensaio utilizou material de plantio de tamanho convencional (denominado "16cm"), enquanto o outro ensaio utilizou material de tamanho reduzido tratado (8MP).

ii) Quatro ensaios de PYT foram conduzidos na safra de 2022 nos municípios de Cruz das Almas (BA) e Laje (BA). Um ensaio utilizou o material de plantio convencional de 16 cm e três ensaios utilizaram o tamanho reduzido (8 MP).

iii) Oito ensaios de UYT foram conduzidos em diferentes áreas de produção nos municípios de Cruz das Almas (BA) e Laje (BA), nas safras de 2021 e 2022. Quatro ensaios utilizaram o material de plantio convencional de 16 cm e quatro ensaios utilizaram o material de tamanho reduzido tratado (8MP).

Tabela 1. Lista de clones de mandioca avaliados para várias características agronômicas em diferentes estágios de melhoramento: ensaio de avaliação clonal (CET), ensaio preliminar de rendimento (PYT) e ensaio de rendimento uniformizado (UYT).

Breeding stage	Novos clones	Checks	N# total	Trial code	City / Location	Year	GPS
CET	69	11	80	BR.CET.21.PP1.16cm	Cruz das Almas (BA) / PP1	2022	12°39'14.6"S 39°04'47.1"W
	69	11	80	BR.CET.21.PP1.8MP	Cruz das Almas (BA) / PP1	2022	
PYT	19	12	31	BR.PYT.21.Candial.8MP	Cruz das Almas (BA) / Candial	2022	12°39'14.6"S 39°04'47.1"W
	67	11	78	BR.PYT.21.PP1.8MP	Cruz das Almas (BA) / PP1	2022	12°39'14.6"S 39°04'47.1"W
	71	13	84	BR.PYT.21.SJ.16cm	Laje (BA) / São Jorge	2022	13°06'29.4"S 39°18'34.3"W
	67	13	80	BR.PYT.21.SJ.8MP	Laje (BA) / São Jorge	2022	
UYT	14	10	24	BR.UYT.20.NH1.16cm	Laje (BA) / NH1	2021	13°06'38.8"S; 39°16'41.7"W
	14	10	24	BR.UYT.20.NH1.8MP	Laje (BA) / NH1	2021	
	14	10	24	BR.UYT.20.Roger.16cm	Laje (BA) / Roger	2021	13°09'04.5"S; 39°19'43.2"W
	14	10	24	BR.UYT.20.Roger.8MP	Laje (BA) / Roger	2021	
	14	10	24	BR.UYT.21.SJ.16cm	Laje (BA) / São Jorge	2022	13°07'36.7"S; 39°17'01.0"W
	14	10	24	BR.UYT.21.SJ.8MP	Laje (BA) / São Jorge	2022	
	14	10	24	BR.UYT.21.NH1.16cm	Laje (BA) / NH1	2022	13°07'36.7"S; 39°17'01.0"W
	13	10	23	BR.UYT.21.NH1.8MP	Laje (BA) / NH1	2022	

Em cada fase do programa de melhoramento, foram realizados ensaios de campo utilizando ambos os tamanhos de material de propagação para avaliar o desempenho agronômico dos clones de mandioca sob o mesmo ambiente de cultivo. Isso permitiu a comparação da classificação dos clones sob as mesmas influências ambientais. Isso foi feito para os ensaios CET plantados no mesmo ambiente (testes BR.CET.21.PP1.16cm e BR.CET.21.PP1.8MP), ensaios PYT (testes BR.PYT.21.SJ.16cm e BR.PYT.21.SJ.8MP) e todos os ensaios UYT nas safras de 2021 e 2022 (Tabela 1). Os demais testes foram utilizados para verificar

a interação G×E nos estágios inicial, intermediário e avançado do programa de melhoramento.

O processo de preparação do solo seguiu métodos convencionais, começando com a dessecação de ervas daninhas e, posteriormente, arando e gradando duas vezes para incorporar os resíduos da cultura ao solo. Uma plantadeira de mandioca foi então utilizada para criar sulcos de plantio e aplicar fertilizantes com base na análise do solo de cada área específica. O plantio manual foi realizado nos sulcos usando estacas medindo 8 ou 16 cm, dependendo do tratamento a ser aplicado. As estacas utilizadas para o plantio foram obtidas de hastes com 11 a 12 meses de idade, garantindo que estivessem livres de pragas e doenças. Essas estacas foram colocadas horizontalmente ao longo da linha de plantio. O espaçamento entre linhas foi fixado em 0,90 m, enquanto o espaçamento entre plantas individuais foi mantido em 0,80 m. Após o processo de plantio, as práticas culturais pós-plantio aderiram às diretrizes nacionalmente recomendadas para a mandioca, conforme descrito por Souza et al. (2006).

2.2 Corte e tratamento das manivas

Os tamanhos de estacas utilizados nos ensaios de campo foram de 8 cm e 16 cm, sendo este último o tamanho de material de propagação comumente utilizado entre os agricultores brasileiros. Tipicamente, estacas de 8 cm contêm de 2 a 4 gemas, enquanto estacas de 16 cm podem ter de 3 a 7 gemas, dependendo do clone. As estacas foram preparadas com precisão usando uma serra elétrica ajustada ao tamanho específico necessário para cada tratamento. Após o processo de estaca, um teste de absorção foi realizado nas estacas de 8 cm para auxiliar na determinação da dosagem apropriada de pesticida com base no volume de absorção antes do tratamento. Posteriormente, o volume de absorção por hectare (obtido multiplicando o número de estacas por hectare pela absorção por estaca) foi calculado. Esta informação foi usado para estimar o volume total de produto necessário (TVPR) usando a fórmula): $TVPR = \frac{\text{dosage of product*slurry required}}{\text{absorption volume*ha}^{-1}}$. Além do agroquímicos (tiametoxam 21 g ha⁻¹, mefenoxam 1,0 g ha⁻¹, fludioxonil 1,3 g ha⁻¹, tiabendazol 7,5 g ha⁻¹), um ligante (látex, 2%) foi incorporado para aumentar a adesão do tratamento à superfície das

estacas (Oliveira et al., 2020). Todos os pesticidas foram aplicados utilizando uma mistura aquosa para garantir uma cobertura uniforme das estacas. O pH da mistura foi ajustado para uma faixa de 6,5 a 7,0. Após o tratamento, as estacas foram deixadas secar por 8 horas em temperatura ambiente antes de serem colocadas em sacos de polietileno de malha Raschel, comumente usados para armazenar cebolas e batatas.

2.3 Características avaliadas

As avaliações agronômicas foram realizadas no momento da colheita dos ensaios (12 meses após o plantio). As características avaliadas foram:

Altura de planta - medida em metros, representa o crescimento vertical de plantas de mandioca.

Estande - determinado pela contagem do número de plantas por parcela e expressa como uma porcentagem do número esperado de plantas por parcela. Indica o estabelecimento e a densidade populacional das plantas.

Número de hastes por planta - a média da avaliação de cinco plantas em cada parcela, fornece informações sobre o hábito de crescimento e o potencial de produção de caules.

Arquitetura da planta - avaliado em uma escala de 1 a 5, indicando o tamanho geral e padrão de ramificação das plantas, onde: 1: excelente – plantas sem ramificações ou com ramificações acima de 2,0 metros; 2: bom – plantas com ramificações acima de 1,60 metros ou ramificação baixa, mas pelo menos 1,6 metros de caules eretos; 3: médio – plantas com ramificações acima de 1,20 metros ou ramificação baixa, mas pelo menos 1,2 metros de caules eretos; 4: ruim – plantas com ramificações acima de 0,80 metros ou ramificação baixa, mas com menos de 0,80 metros de caules eretos; e 5: muito ruim – clones altamente ramificados com menos de 0,80 metros de caules eretos.

Retenção foliar - avaliado em uma escala de 1 a 5, representando a cobertura de folhas no meristema apical: 1: <20% do meristema apical coberto com folhas; 2: 20 - 39% do meristema apical coberto com folhas; 3: 40 - 59% do meristema apical coberto com folhas; 4: 60 - 79% do meristema apical coberto com folhas; 5: >80% do meristema apical coberto com folhas.

Vigor das hastes - avaliado numa escala de 1 a 5, indicando a espessura e resistência dos caules: 1: vigor muito baixo - caules com espessura < 10 mm; 2: vigor baixo - caules com espessura entre 11 e 15 mm; 3: vigor médio – caules com espessura entre 16 e 20 mm; 4: vigor alto - caules com espessura entre 21 e 25 mm; 5: vigor muito alto - caules com espessura > 25 mm.

Teor de matéria seca nas raízes- expressa em percentagem, foi determinada utilizando o método gravimétrico descrito por Kawano et al. (1987).

Número médio de raízes por planta- contadas em uma amostra de cinco plantas por parcela, fornecem informações sobre o desenvolvimento do sistema radicular.

Rendimento de brotos- avaliada em t ha⁻¹, representa o peso de caules, pecíolos e folhas. Isso indica a produtividade da biomassa acima do solo.

Produtividade de raízes frescas- medido em t ha⁻¹, representa o rendimento de raízes frescas de mandioca.

Produtividade de raízes secas- calculado multiplicando FRY pelo DMC.

2.4 ANÁLISE DOS DADOS

Os testes CET foram submetidos a uma análise de variação usando o seguinte modelo: $Y_{ij} = \mu + G_i + B_j + \varepsilon_{ij}$, onde Y_{ij} é o valor observado na parcela experimental do bloco j que recebeu o tratamento i ou o tratamento controle i' dentro do bloco j ; μ denota a média geral, G_i representa os efeitos aleatórios do tratamento i (onde $i = i'$ para o tratamento controle), B_j é o efeito fixo do bloco j e ε_{ij} é o erro aleatório associado à porção do bloco j que recebeu o tratamento controle i' ou o tratamento regular i dentro do bloco j . Os testes PYT e UYT foram analisados individualmente utilizando um modelo misto semelhante, mas sem considerar a presença de um tratamento controle.

Para a análise conjunta dos testes PYT e UYT, foi empregado um modelo misto: $Y_{ijk} = \mu + G_i + E_k + BE_k + GE_{ik} + \varepsilon_{ijk}$, onde Y_{ijk} representa o valor observado da parcela experimental no j^{th} bloco, do i^{th} genótipo no k^{th} ambiente. μ denota a média geral, G_i é o efeito aleatório do genótipo i^{th} , E_k representa o efeito fixo do ambiente k^{th} , BE_{jk} representa o efeito fixo do bloco j^{th} no ambiente k^{th} , e ε_{ijk} é o erro aleatório associado à parcela experimental no bloco j^{th} , do genótipo

i^{th} no ambiente k^{th} . Presume-se que todos os efeitos aleatórios sigam uma distribuição normal e independente.

As estimativas de herdabilidade foram obtidas utilizando duas abordagens: i) herdabilidade no sentido amplo H^2 , calculada usando a equação $H^2 = \frac{\sigma_g^2}{\sigma_g^2 + \sigma_i^2 + \sigma_e^2}$, onde σ_g^2 representa a variância genotípica, σ_i^2 denota a variância da interação genótipo-ambiente e σ_e^2 é a variância residual. ii) Cullis et al. (2006) herdabilidade (H_c^2), calculado usando a equação: $H_c^2 = 1 - \frac{\Delta BLUP}{2\sigma_g^2}$, onde Δ a melhor predição linear não viesada (BLUP), representa o erro padrão médio das BLUPs genotípicas. A análise de dados utilizando modelos mistos foi realizada no software R versão 4.0.3 (R Core Team, 2020) com o pacote lme4 (Bates et al., 2015).

Boxplots, gerados utilizando o pacote ggstatsplot (Patil, 2021) no software R, foram utilizados para visualizar a distribuição e identificar diferenças em características agronômicas entre os diferentes ensaios do programa de melhoramento da mandioca. Aproximadamente 30% dos clones de mandioca foram selecionados em cada ensaio e tratamento para avaliar a consistência na seleção. O índice de seleção Mulamba e Mock (1978) foi utilizado, o qual envolve a soma das classificações de cada característica multiplicadas por pesos predefinidos. O índice de seleção (SI) foi calculado da seguinte forma: $SI = (PH \times 5) + (DMC \times 10) + (DRY \times 20) + (NHP \times 10) + (PIArc \times -10) + (ShY \times 15) + (FRY \times 20) + (LeRet \times 10) + (Stand \times 15) + (StVig \times 10) + (NRP \times 2)$. Aqui, o BLUP de cada característica é multiplicado pelo seu respectivo peso econômico. O ganho genético foi calculado usando a fórmula $G = h_m^2 S$, onde G é o ganho genético e S é o desvio BLUP dos genótipos selecionados em relação à média da população, seguindo Schmidt et al. (2019).

Para avaliar as relações e a concordância entre os diferentes ensaios, foram calculadas as correlações de Pearson para examinar as associações entre os valores do índice de seleção. Além disso, a classificação dos clones de mandioca foi avaliada utilizando o gráfico de Bland e Altman (Bland & Altman, 1986). O gráfico de Bland e Altman envolveu a plotagem das diferenças entre cada par de clones (16cm - 8MP) no eixo vertical, enquanto a média das médias do par $[(16cm + 8MP) / 2]$ foi plotada no eixo horizontal. O limite de confiança de

95%, denominado Limite de Concordância (LC), foi determinado como $\pm 1,96$ vezes o desvio padrão (DP) do viés.

3 RESULTADOS

3.1 Análise de componentes de variância

Em relação às características de crescimento e vigor das plantas (PH, NHP, PIArc, LeRet, Stand e StVig), a análise individual dos diferentes testes (CET, PYT e UYT) mostrou que as variâncias genética e residual foram predominantes. Na maioria dos casos, a variância genética foi maior, exceto para NHP e certos UYT (Figura 1). Na análise conjunta dos três ensaios PYT 8MP, a variância ambiental foi maior para a característica PH, respondendo por 35% da variância total.

Para a característica PIArc, a variância genética desempenhou um papel mais significativo, explicando 37% da variância total. Padrões semelhantes foram observados na análise conjunta dos ensaios UYT 16cm e UYT 8MP, com a variância ambiental sendo maior para a característica PH (25% e 32% da variância total, respectivamente). A variância da interação G×E contribuiu de forma relativamente semelhante para a variância genética para a maioria das características de crescimento e vigor das plantas, respondendo por 12% a 27% da variação na interação G×E e 17% a 37% da variação na variância genética.

Em relação às características de rendimento (DMC, NRP, ShY, FRY e DRY), as variâncias genéticas nas análises individuais foram maiores que a variância devido aos efeitos de bloco e residual (Figura 2). Entretanto, na análise conjunta dos testes PYT e UYT, o ambiente teve maior influência nas características ShY, representando de 25% a 35% da variância total. A variância da interação G×E foi maior para as características FRY e DRY, constituindo aproximadamente 27% da variância total.

Baseado em Figuras 1 e 2, a distribuição dos componentes de variância nos ensaios de 8MP e 16cm em diferentes fases de seleção do programa de melhoramento da mandioca (CET, PYT e UYT), seja em análises individuais ou conjuntas, apresentaram semelhanças marcantes. Portanto, em termos comparativos, é possível capturar efeitos genéticos semelhantes para a seleção dos melhores clones e seu avanço para as etapas subsequentes de avaliação.

Figura 1. Estimativas dos componentes da variância fenotípica para características relacionadas ao crescimento e vigor da planta (altura da planta, número de hastes por planta, arquitetura da planta, retenção foliar, estande e vigor do caule) nos diferentes ensaios do programa de melhoramento de mandioca (testes de avaliação clonal – CET, ensaio preliminar de rendimento – PYT e ensaios de rendimento uniforme – UYT, considerando estacas-semente de tamanho padrão (16 cm) e tamanho reduzido com tratamento agroquímico (8 MP). As proporções de variância fenotípica atribuídas a cada termo foram estimadas usando um modelo linear misto e são apresentadas em cores diferentes.

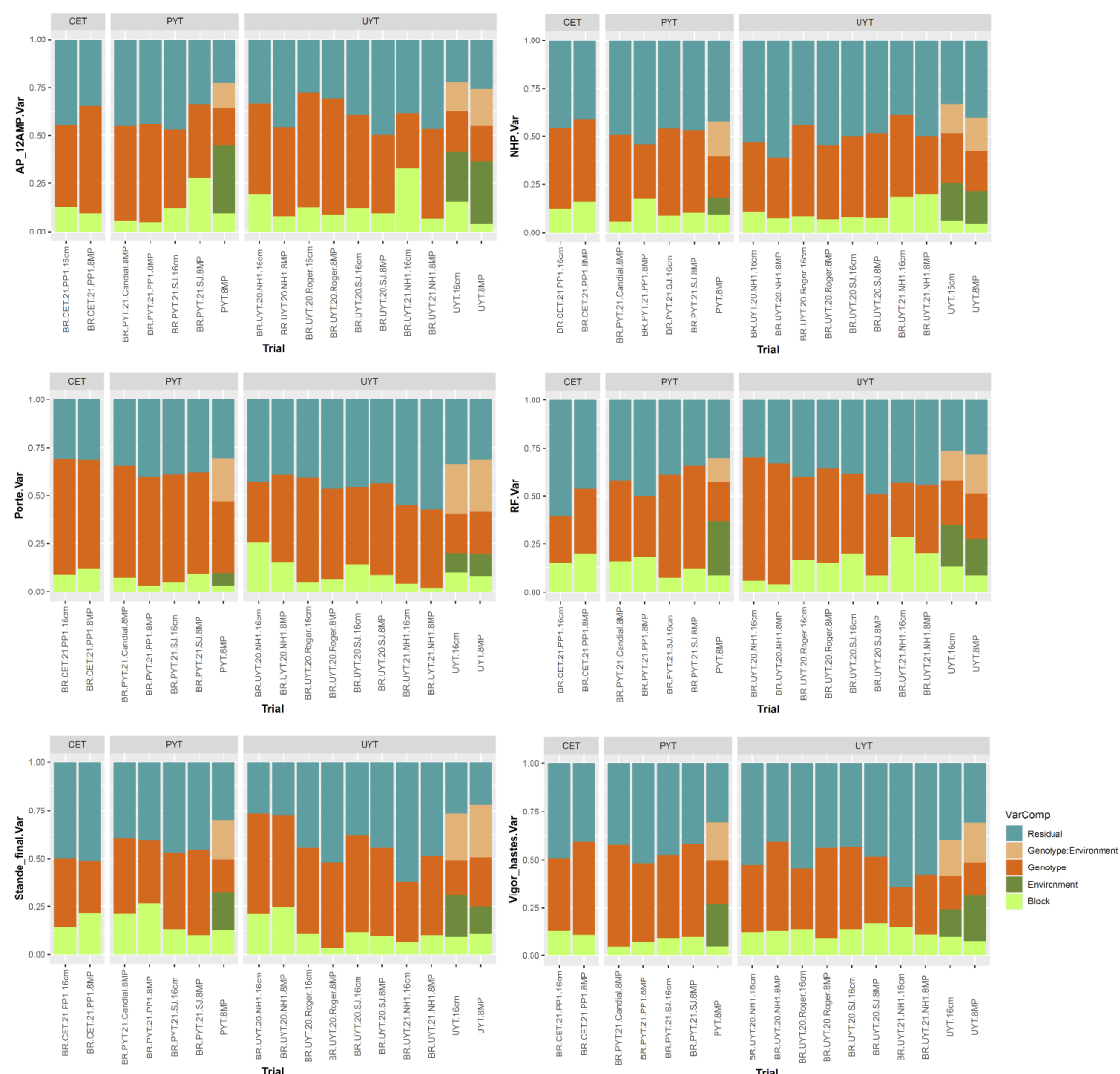


Figura 2. Estimativas dos componentes da variância fenotípica para características de rendimento (teor de matéria seca da raiz, número de raízes por planta, rendimento da parte aérea, rendimento de raiz fresca e rendimento de raiz seca) nos diferentes ensaios do programa de melhoramento da mandioca (testes de avaliação clonal – CET, ensaio preliminar de rendimento – PYT e ensaio de rendimento uniforme – UYT, considerando estacas-semente de tamanho padrão (16cm) e tamanho reduzido com tratamento agroquímico (8MP). As proporções de variância fenotípica atribuídas a cada termo foram estimadas usando um modelo linear misto e são apresentadas em cores diferentes.



3.2 Parâmetros genéticos

Nos ensaios CET individuais, a herdabilidade das características de crescimento e vigor das plantas foi geralmente maior no ensaio 8MP em comparação com o ensaio convencional de 16 cm, exceto para a característica

Stand (Tabela 2). As características LeRet, Stand e StVig apresentaram a menor herdabilidade no teste de 16 cm (BR.CET.21.PP1.16cm), com uma variação de 0,15 a 0,23 (H^2 e H_c^2) para LeRet e 0,39 - 0,46 (H^2 e H_c^2) para StVig. No ensaio 8MP (BR.CET.21.PP1.8MP), esses valores de herdabilidade foram mais altos, mas ainda moderados, variando de 0,24 a 0,27 (H^2 e H_c^2) para Stand e 0,53 a 0,57 (H^2 e H_c^2) para StVig. Por outro lado, as características de rendimento nos testes CET apresentaram altos valores de herdabilidade, variando de 0,75 a 0,76 (H^2 e H_c^2) para DMC e 0,82 a 0,93 (H^2 e H_c^2) para DRY. As diferenças nos valores de herdabilidade entre os ensaios de 8MP e 16cm para as características de rendimento foram menores em comparação com as características de crescimento e vigor da planta.

No caso dos testes PYT individuais, a maioria das características apresentou herdabilidade mediana semelhante à do CET, com valores de herdabilidade ligeiramente superiores nos testes PYT, exceto para a característica PIArc (Tabela 2). No entanto, as características agrônômicas exibiram herdabilidade superior, semelhante à dos testes CET. Para uma comparação direta, os ensaios BR.PYT.21.SJ.16cm e BR.PYT.21.SJ.8MP, plantados lados a lado no mesmo ambiente, apresentaram valores muito semelhantes H^2 e H_c^2 , valores para características de crescimento, vigor e produtividade das plantas. Por exemplo, H^2 os valores variaram de 0,73 a 0,89 para FRY e de 0,69 a 0,75 para PIArc, enquanto H_c^2 os valores variaram de 0,84 a 0,93 para FRY e de 0,80 a 0,83 para PIArc. Em relação aos outros ensaios PYT 8MP conduzidos em diferentes ambientes, os valores de herdabilidade de BR.PYT.21. Candial.8MP foram semelhantes aos dos ensaios BR.PYT.21.SJ.16cm e BR.PYT.21.SJ.8MP. No entanto, o ensaio BR.PYT.21.PP1.8MP apresentou herdabilidade ligeiramente inferior, particularmente para características como NHP, LeRet e StVig. Além disso, embora a análise de variância individual dos testes tenha revelado herdabilidades de média a alta, a análise conjunta dos três testes PYT 8MP resultou em baixo valor de herdabilidade para a maioria das características, exceto para PIArc, onde a influência da variância ambiental e da interação G×E foi de magnitude relativamente baixa.

Tabela 2. Hereditariedade em sentido amplo (H^2) e de Cullis (H_c^2) para características de crescimento, vigor e rendimento de raízes em diferentes ensaios de melhoramento de mandioca (ensaios de avaliação clonal – CET, ensaio de rendimento preliminar – PYT e ensaio de rendimento uniforme – UYT), considerando

Level	Trial	PH		NSP		PIArc		LeRet		Stand		StVig		DMC		NRP		ShY		FRY		DRY	
		H^2	H_c^2	H^2	H_c^2	H^2	H_c^2	H^2	H_c^2	H^2	H_c^2	H^2	H_c^2	H^2	H_c^2	H^2	H_c^2	H^2	H_c^2	H^2	H_c^2	H^2	H_c^2
Individual	BR.CET.21.PP1.16cm	0,46	0,51	0,41	0,46	0,79	0,81	0,15	0,23	0,33	0,40	0,39	0,46	0,47	0,54	0,69	0,73	0,79	0,81	0,83	0,86	0,82	0,85
	BR.CET.21.PP1.8MP	0,77	0,76	0,68	0,65	0,76	0,79	0,40	0,41	0,24	0,27	0,53	0,57	0,75	0,76	0,82	0,81	0,88	0,89	0,91	0,91	0,93	0,93
Individual	BR.PYT.21.SJ.16cm	0,69	0,76	0,42	0,57	0,75	0,83	0,68	0,79	0,44	0,60	0,58	0,70	0,86	0,87	0,81	0,89	0,76	0,82	0,89	0,93	0,87	0,87
	BR.PYT.21.SJ.8MP	0,59	0,65	0,39	0,49	0,69	0,80	0,74	0,84	0,49	0,65	0,59	0,72	0,85	0,85	0,81	0,87	0,81	0,87	0,73	0,84	0,72	0,76
	BR.PYT.21.Candial.8MP	0,67	0,75	0,47	0,63	0,74	0,84	0,49	0,65	0,62	0,74	0,66	0,76	0,81	0,88	0,54	0,70	0,67	0,74	0,68	0,76	0,69	0,77
	BR.PYT.21.PP1.8MP	0,60	0,67	0,22	0,32	0,67	0,76	0,29	0,42	0,48	0,59	0,43	0,54	0,78	0,83	0,58	0,70	0,76	0,81	0,79	0,86	0,79	0,82
Joint	PYT.8MP	0,35	0,60	0,18	0,42	0,49	0,75	0,30	0,62	0,48	0,59	0,30	0,58	0,47	0,67	0,22	0,44	0,18	0,36	0,21	0,40	0,23	0,40
Individual	BR.UYT.20.NH1.16cm	0,79	0,84	0,33	0,54	0,37	0,59	0,81	0,91	0,79	0,90	0,11	0,25	0,75	0,86	0,50	0,72	0,80	0,86	0,72	0,85	0,73	0,85
	BR.UYT.20.NH1.8MP	0,50	0,72	0,21	0,42	0,65	0,82	0,77	0,89	0,75	0,87	0,56	0,75	0,82	0,90	0,46	0,69	0,68	0,82	0,48	0,70	0,49	0,71
	BR.UYT.20.Roger.16cm	0,83	0,91	0,58	0,77	0,65	0,82	0,54	0,76	0,52	0,73	0,25	0,49	0,75	0,87	0,54	0,75	0,63	0,81	0,53	0,74	0,40	0,64
	BR.UYT.20.Roger.8MP	0,73	0,86	0,37	0,62	0,58	0,79	0,68	0,82	0,45	0,66	0,54	0,75	0,80	0,90	0,43	0,67	0,59	0,78	0,50	0,72	0,55	0,75
	BR.UYT.21.SJ.16cm	0,61	0,82	0,45	0,69	0,45	0,70	0,54	0,75	0,66	0,83	0,49	0,73	0,82	0,93	0,70	0,86	0,80	0,92	0,72	0,86	0,72	0,84
	BR.UYT.21.SJ.8MP	0,39	0,62	0,44	0,69	0,54	0,78	0,53	0,73	0,51	0,73	0,41	0,64	0,78	0,91	0,60	0,80	0,54	0,76	0,56	0,77	0,52	0,72
	BR.UYT.21.NH1.16cm	0,51	0,69	0,56	0,79	0,37	0,62	0,29	0,54	0,26	0,48	0,11	0,26	0,59	0,80	0,54	0,77	0,36	0,56	0,76	0,91	0,74	0,89
	BR.UYT.21.NH1.8MP	0,54	0,68	0,29	0,47	0,33	0,53	0,63	0,78	0,42	0,65	0,18	0,33	0,58	0,78	0,49	0,71	0,36	0,57	0,55	0,76	0,52	0,74
Joint	UYT.16cm	0,38	0,76	0,34	0,79	0,18	0,58	0,36	0,78	0,45	0,66	0,13	0,55	0,55	0,88	0,34	0,77	0,22	0,59	0,28	0,68	0,26	0,65
Joint	UYT.8MP	0,23	0,64	0,19	0,65	0,22	0,63	0,35	0,75	0,45	0,66	0,19	0,59	0,67	0,93	0,35	0,79	0,25	0,66	0,21	0,42	0,19	0,48

tamanho padrão de estacas (16 cm) e tamanho pequeno de estacas com tratamento agroquímico (8 MP).

PH: altura da planta, NHP: número de hastes por planta, PIArc: porte da planta, LeRet: retenção foliar, Stand: estande da parcela, StVig: vigor das hastes, DMC: teor de matéria seca nas raízes, NRP: número médio de raízes por planta, ShY: produtividade da parte aérea, FRY: produtividade de raízes frescas, e DRY: produtividade de raízes secas

Os valores de herdabilidade dos UYT individuais foram geralmente comparáveis aos dos CET e PYT, embora algumas variações tenham sido observadas. Notavelmente, características como altura da planta (PH), retenção foliar (LeRet) e estande (Stand) apresentaram maior herdabilidade em certos ensaios de campo (Tabela 2). A característica StVig apresentou a maior amplitude de estimativas de herdabilidade, com valores variando de 0,11 a 0,56 H^2 e de 0,25 a 0,75 para H_c^2 da mesma forma, a característica ShY apresentou herdabilidade de moderada a alta, com H^2 variando de 0,36 a 0,80 e H_c^2 variando de 0,56 a 0,92. Entre todas as características, o teor de matéria seca (TMS) apresentou consistentemente a maior herdabilidade nos ensaios UYT, em consonância com os resultados dos ensaios PYT.

Comparando a herdabilidade entre os ensaios UYT com tratamentos de 16 cm e 8 MP plantados no mesmo ambiente (BR.UYT.20.NH1.16cm e BR.UYT.20.NH1.8MP, BR.UYT.20.Roger.16cm e BR.UYT.20.Roger.8MP, BR.UYT.20.SJ.16cm e BR.UYT.20.SJ.8MP, BR.UYT.21.NH1.16cm e BR.UYT.21.NH1.8MP), foram observadas pequenas diferenças na H^2 e H_c^2 os valores foram semelhantes, exceto em alguns casos específicos. Por exemplo, houve pequenas variações na herdabilidade de StVig entre os ensaios BR.UYT.20.NH1, BR.UYT.20.Roger e BR.UYT.21.NH1, bem como diferenças na herdabilidade de LeRet nos ensaios BR.UYT.21.NH1 e na herdabilidade de PIArc nos ensaios BR.UYT.20.NH1. No entanto, de modo geral, as estimativas de herdabilidade da análise conjunta dos ensaios UYT 16cm e UYT 8MP foram similares para todas as características, exceto para DMC, LeRet e NHP. Esses resultados indicam o potencial de incorporar essa abordagem em programas de melhoramento genético, pois pode acelerar o desenvolvimento de novas variedades de mandioca, deduzindo o tempo necessário.

3.3 Distribuição das características de crescimento, vigor e produtividade de clones de mandioca

As Figuras 3 e 4 exibem boxplots ilustrando as melhores predições lineares não viesadas (BLUPs) combinadas com a média geral dos testes (denominada BLUP.U) no programa de melhoramento de mandioca. Entre os diferentes ensaios, os ensaios PYT apresentaram a maior variação em BLUP.U

para a maioria das características de crescimento e vigor da planta (PH, PIArc, Stand e StVig) em comparação com os outros ensaios. Por outro lado, os ensaios UYT demonstraram a maior variação em BLUP.U para LeRet, enquanto os ensaios CET mostraram a maior variação para PIArc (Figura 3). Em relação às características produtivas, os testes CET, PYT e UYT apresentaram a maior variação em BLUP.U, nessa ordem, com exceção do DMC (Figura 4).

De modo geral, a distribuição de BLUP.U para ensaios com diferentes tratamentos (16 cm x 8 MP) plantados lados a lado na mesma área experimental apresentaram notável similaridade entre as diversas características avaliadas. Esse achado está de acordo com os resultados obtidos a partir da análise de componentes de variância e da estimativa de herdabilidade para as características medidas. Por outro lado, os dois ensaios adicionais com PYT 8 MP (BR.PYT.21.Candial.8MP e BR.PYT.21.PP1.8MP), conduzidos em ambientes distintos de BR.PYT.21.SJ.16cm e BR.PYT.21.SJ.8MP, apresentaram variações significativas no desempenho agrônomo para quase todas as características de crescimento, vigor e produtividade (Figuras 3 e 4). Essas diferenças podem ser atribuídas à interação GxA, visto que esses ensaios foram conduzidos em áreas experimentais contrastantes, com diferentes pressões de patógenos e condições de solo.

Figura 3. Boxplot da melhor predição linear não viesada + a média geral (BLUP.U) em diferentes genótipos de mandioca avaliados para características de crescimento e vigor da planta (altura da planta – PH, número de hastes por planta – NHP, arquitetura da planta – PIArc, retenção foliar – LeRet, estande – Stand, vigor do caule – StVig) nos diferentes testes do programa de melhoramento de mandioca (ensaio de avaliação clonal – CET, ensaio de rendimento preliminar – PYT e ensaio de rendimento uniforme – UYT, considerando estacas de sementes de tamanho padrão (16 cm) e tamanho reduzido com tratamento agroquímico (8MP).

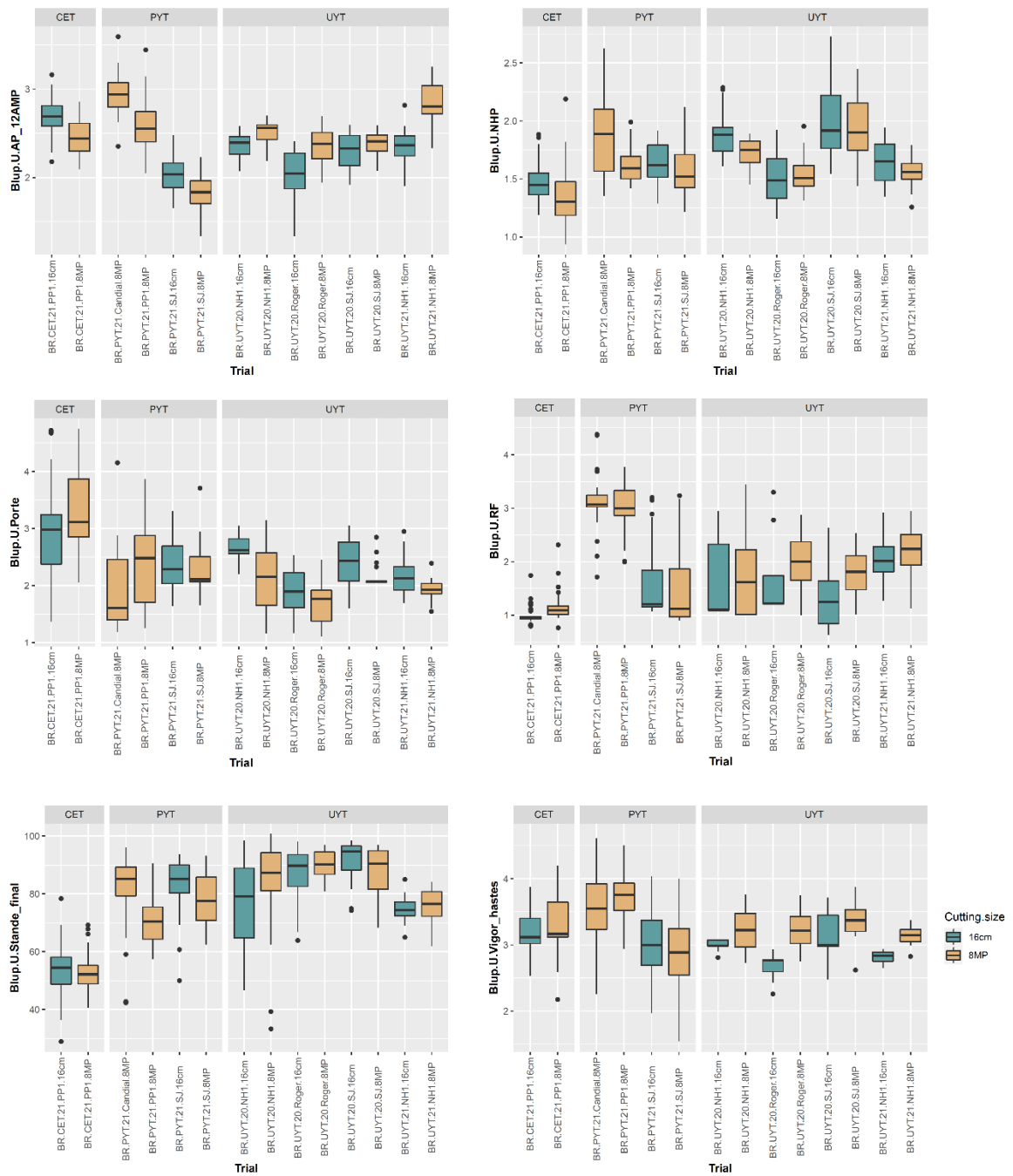
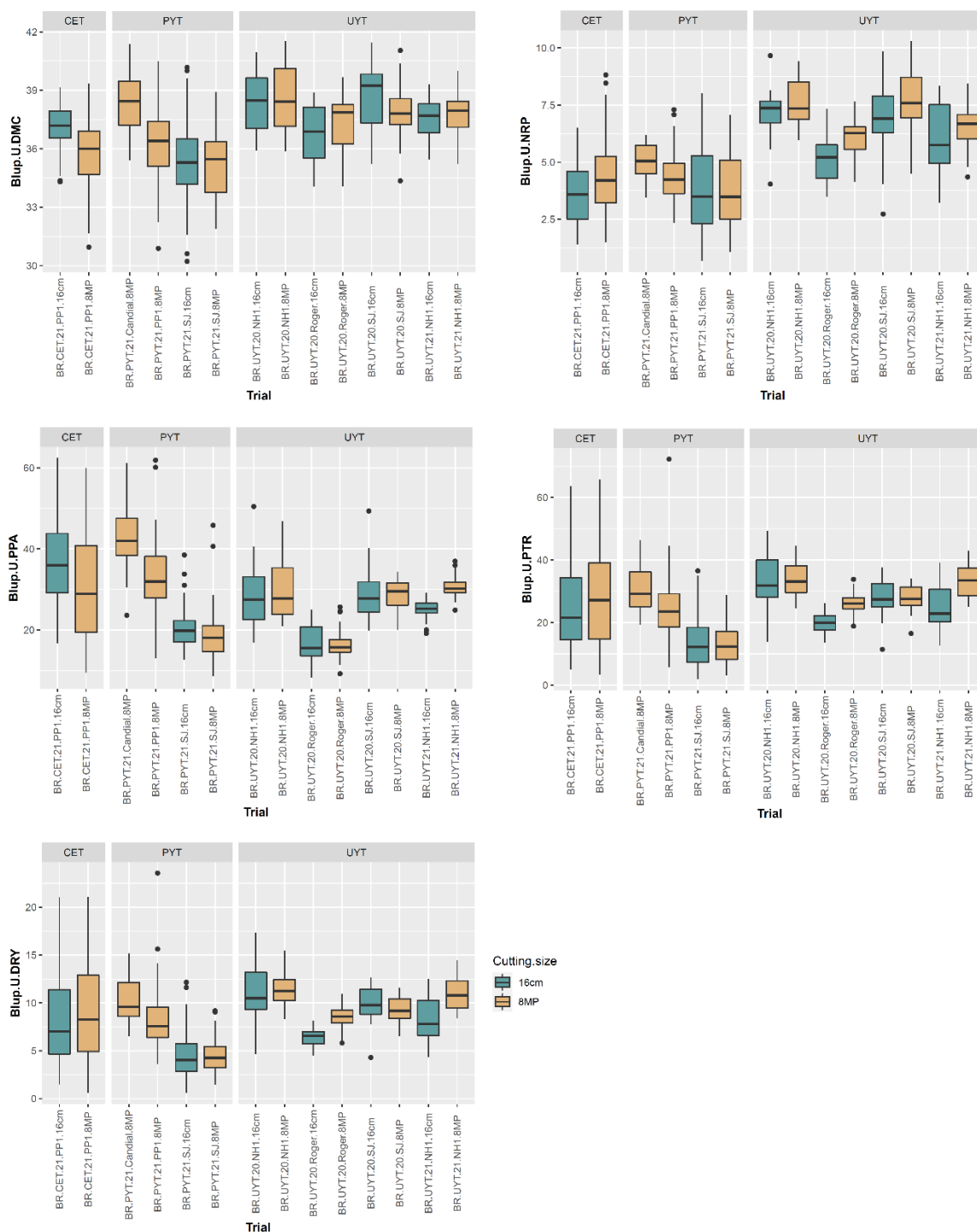


Figura 4. Boxplot da melhor predição linear não viesada + a média geral (BLUP.U) em diferentes genótipos de mandioca avaliados para características de rendimento (teor de matéria seca nas raízes - DMC, número médio de raízes por planta - NRP, rendimento da parte aérea - ShY, rendimento de raiz fresca - FRY e rendimento de raiz seca - DRY) nos diferentes testes do programa de melhoramento de mandioca (ensaio de avaliação clonal - CET, ensaio de rendimento preliminar - PYT e ensaio de rendimento uniforme - UYT, considerando estacas de sementes de tamanho padrão (16 cm) e tamanho reduzido com tratamento agroquímico (8MP).



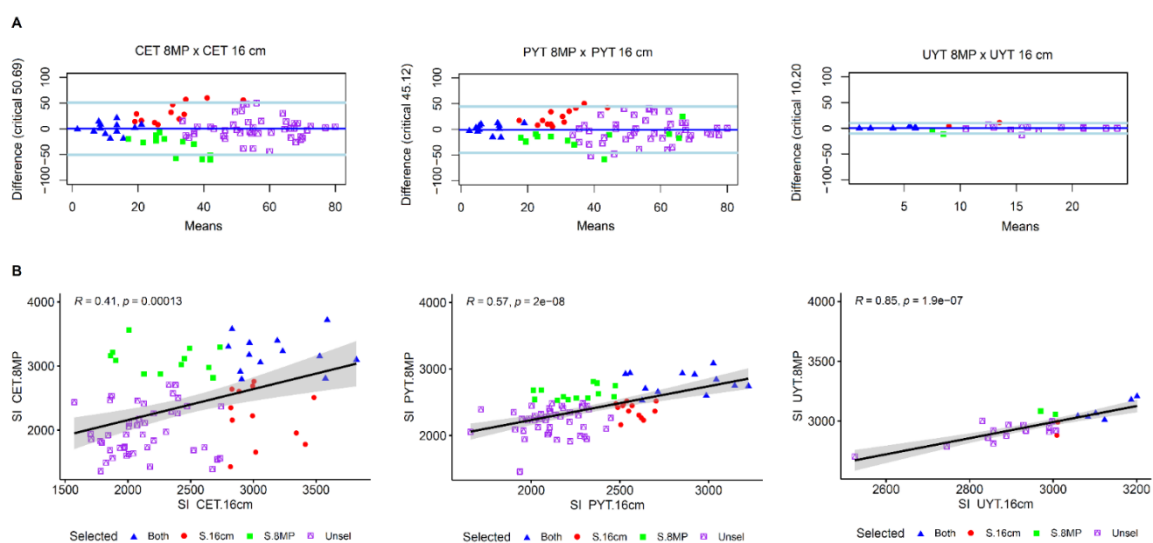
3.4 Coincidência na classificação dos clones de mandioca nas diferentes fases de seleção

A análise de coincidência de clones de mandioca teve como objetivo comparar o desempenho de clones sob diferentes tratamentos, especificamente estaquia padrão (16 cm) e estaquia de tamanho reduzido com tratamento agroquímico (8MP). A análise focou na classificação dos clones com base em diversos critérios de seleção, como características de crescimento e vigor da planta, nos testes CET, PYT e UYT. Nos testes CET, uma análise de correlação entre os índices de seleção (IS) dos tratamentos de 16 cm e 8MP revelou uma correlação moderada ($R = 0,41^{***}$), indicando alguma concordância na classificação dos clones. Dos 82 clones avaliados, 13 (53%) foram selecionados em ambos os tratamentos, enquanto 12 foram selecionados em apenas um dos tratamentos, e os clones restantes não foram selecionados em nenhum dos tratamentos. A análise de Bland-Altman confirmou ainda a concordância entre os dois tratamentos, mostrando que os clones com melhor classificação com base no IS foram consistentemente selecionados tanto no tratamento de 16 cm quanto no de 8MP. Além disso, os clones classificados entre os 14^a e 42^a posições foram selecionadas por qualquer tratamento, enquanto clones acima da última classificação não foram selecionados por nenhum tratamento.

No PYT, a comparação foi feita entre o SI do teste de 16 cm e o BLUP.U da análise conjunta dos três ensaios 8MP. A análise de correlação indicou uma correlação de magnitude média ($R = 0,57^{***}$), sugerindo uma melhor concordância na seleção de clones entre esses dois tipos de ensaios. Dos clones selecionados, 12 (48%) foram escolhidos tanto nos ensaios de 16 cm quanto nos de 8MP, enquanto 13 foram selecionados em apenas um dos tratamentos, e os clones restantes não foram selecionados. A análise de Bland-Altman corroborou a concordância entre os dois tratamentos, com os clones de melhor classificação sendo selecionados consistentemente tanto nos ensaios de 16 cm quanto nos de 8 MP. Além disso, clones classificados da 13^a à 40^a posição foram selecionados por um ou mais tratamentos, indicando alguma variabilidade na seleção de clones entre os diferentes ensaios. Notavelmente, os ensaios PYT 8MP selecionaram cinco clones adicionais além da 40^a posição, o que pode ser atribuído à avaliação desses clones em múltiplos ambientes.

Nos ensaios UYT, os clones de mandioca também foram comparados com base no BLUP.U obtido a partir da análise combinada dos tratamentos de 16 cm e 8 MP. Ao contrário dos testes CET e PYT, houve uma forte correlação entre os índices de seleção (IS) desses dois conjuntos de ensaios ($R = 0,85^{***}$), indicando padrões de seleção consistentes (Figura 5). As taxas de seleção apresentaram pouca dispersão, com alta concordância entre os clones selecionados nos ensaios de 16 cm e 8 MP. Dos 24 clones avaliados nos ensaios CET, 7 clones foram selecionados (com intensidade de seleção de 30%) e, entre eles, 6 clones (83%) foram selecionados tanto nos ensaios de 16 cm quanto nos de 8 MP, enquanto apenas 2 clones foram selecionados exclusivamente em um dos tratamentos. A análise de Bland-Altman demonstrou uma diferença menor na classificação dos clones de mandioca entre os ensaios PYT 16cm e 8MP em comparação com os ensaios CET e UYT (Figura 5). No entanto, em consistente com os outros testes, os clones com melhor classificação nos ensaios padrão de 16cm também apresentaram bom desempenho nos tratamentos de 8MP. Apenas quatro clones classificados entre 8^a e 10^a nos ensaios UYT 16 cm ou UYT 8MP foram selecionados, com dois clones de cada tratamento.

Figura 5. Concordância na classificação de clones de mandioca (A) e correlação de Pearson entre os índices de seleção (B) obtidos em diversos ensaios do programa de melhoramento de mandioca. Esses ensaios incluem ensaios de avaliação clonal (CET), ensaios preliminares de rendimento (PYT) e ensaios de rendimento uniforme (UYT). A análise considera mudas de tamanho padrão (16 cm) e de tamanho reduzido com tratamento agroquímico (8MP). Os gráficos representam os índices de seleção derivados do BLUP.U da análise conjunta, considerando avaliações em diferentes ambientes e anos, como os ensaios EPR 8MP e ERU 16 cm e 8MP. Nos gráficos de correlação, a linha preta representa a curva de regressão linear e a faixa cinza representa o intervalo de confiança de 95%. A análise de Bland-Altman avalia a concordância na classificação dos clones, onde a linha azul escura contínua representa o viés estimado e as duas linhas azuis claras representam os limites superior e inferior de confiança com 95% de concordância.



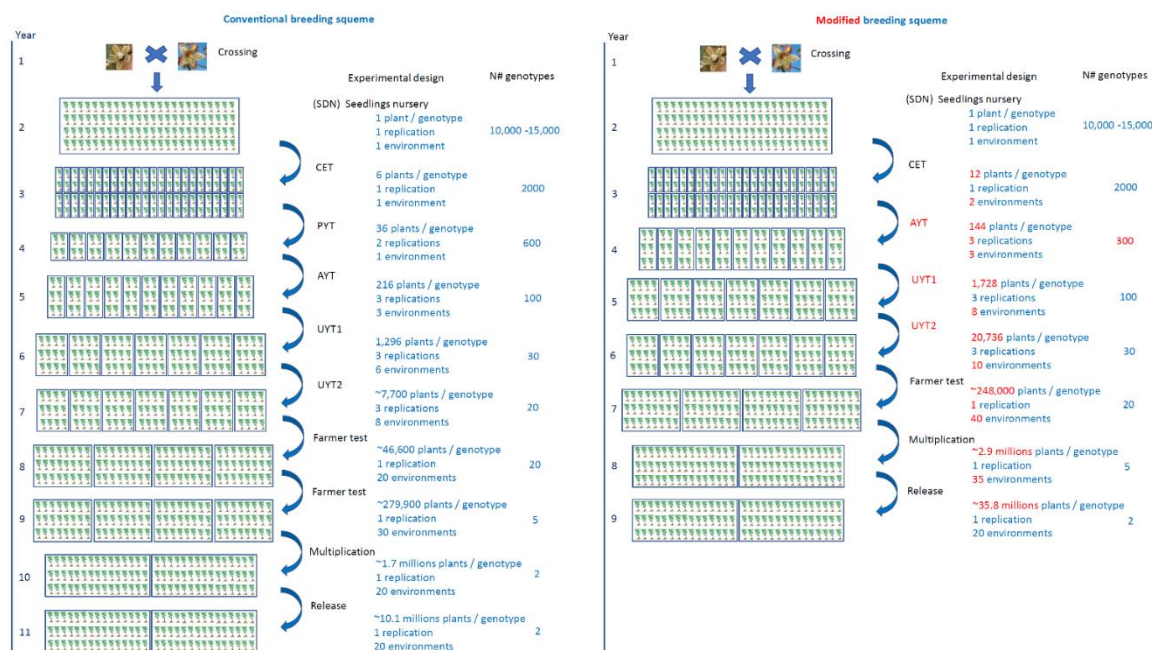
3.5 Utilização da abordagem 8MP no esquema de seleção no melhoramento da mandioca

Para acelerar o desenvolvimento de novas cultivares de mandioca, a utilização de mudas de mandioca tratadas com agroquímicos com tamanho reduzido (8MP) em vários estágios do programa de melhoramento, comparável ao sistema e ao padrão comercial do material de propagação (16 cm), pode gerar benefícios significativos. Essa abordagem é promissora para a redução do tempo necessário para o desenvolvimento de novas cultivares de mandioca. Para capitalizar as vantagens da estratégia 8MP, propomos um esquema de melhoramento revisado que incorpora seu uso desde o estágio de seleção clonal inicial (CET). Ao implementar esse esquema, pretendemos analisar o impacto

potencial da abordagem 8MP na aceleração do desenvolvimento da mandioca (Figura 6).

No esquema de melhoramento convencional da mandioca, o número de plantas dentro de uma parcela, o número de repetições dentro de um ensaio número de ambientes e anos de cultivo analisados em cada etapa dependem da quantidade de material de propagação gerado na fase seletiva precedente. Essa quantidade está intimamente ligada à taxa de propagação da mandioca, que normalmente varia de 1:5 a 1:10 para a maioria dos clones (Oliveira et al., 2020). Para fins comparativos, consideramos uma taxa média de multiplicação de 1:6, que é bastante realista para a maioria dos clones de mandioca. Tipicamente, o processo de seleção envolve um teste SET, um CET, um PYT, três AYT e aproximadamente 14 testes UYT conduzidos ao longo de dois anos de cultivo (para gerar informações essenciais sobre o valor de cultivo e uso - VCU - para registro e proteção da variedade). Posteriormente, testes com agricultores são conduzidos para validar agronomicamente os clones em um mínimo de 40 ambientes, com pelo menos 2.000 plantas por local. Uma vez obtidos e validados os dados de VCU com os usuários finais das novas cultivares, inicia-se a fase de multiplicação das novas cultivares em colaboração com viveiros licenciados, com duração de mais um ano. A fase final envolve o lançamento da variedade. Conseqüentemente, todo esse processo normalmente se estende por pelo menos 11 anos, considerando o tempo necessário para o cruzamento e a geração das progênes segregantes (Figura 6).

Figura 6. Esquema convencional de melhoramento genético da mandioca (esquerda) utilizando estacas de 16 cm e esquema alternativo utilizando estacas-semente de 8 cm tratadas com agroquímicos (direita). O esquema representa as principais etapas do programa de melhoramento genético da mandioca, que são: SDN, viveiro de mudas; CET, ensaio de avaliação clonal; PYT, ensaio preliminar de rendimento; AYT, ensaio avançado de rendimento; UYT, ensaio uniforme de rendimento; teste com agricultores; multiplicação; lançamento. No esquema alternativo (direita), as principais modificações em comparação com o sistema convencional estão destacadas em vermelho.



Ao implementar a abordagem 8MP no CET, a primeira mudança significativa é a realização dos ensaios em dois ambientes em vez de apenas um (Figura 6). Essa modificação permite a exploração das interações G×E em um estágio inicial do programa de melhoramento. Ela não só auxilia no processo de seleção, como também aumenta a produção de material de propagação. Após a colheita do CET e a seleção dos melhores clones, a segunda mudança importante é a eliminação dos testes PYT, visto que já há material de propagação suficiente disponível para a realização dos testes AYT com três repetições e três ambientes. Os testes UYT, conduzidos no primeiro e segundo anos, prosseguiriam normalmente, servindo ao propósito de gerar informações fenotípicas para registro e proteção de cultivares de mandioca. A única diferença nos testes UYT seria o maior número de plantas disponíveis para cada clone, permitindo avaliações em 18 ambientes em vez dos 14 convencionais (Figura 6 e Tabela 3).

Tabela 3. Comparação de esquemas convencionais de multiplicação e seleção (plântulas não tratadas de 16 cm a 16 cm) e plântulas de 8 cm de comprimento tratadas com agroquímicos e alternativas (8MP) de programas de melhoramento de mandioca.

Breeding stage	Esquema convencional de melhoramento de mandioca (16cm)							
	N# total manivas	N# manivas / rep	Rep	Env	N# genótipos		Total Area (ha)	N# manivas / genótipo
SET	1	1	1	1	10.000	15.000	1	1
CET	6	6	1	1	2.000		1	6
PYT	36	18	2	1	600		2	36
AYT	216	24	3	3	100		2	216
UYT	1.296	72	3	6	30		3	1.296
UYT	7.776	324	3	8	20		11	7.776
Farmer test	46.656	2.333	1	20	20		67	46.656
Farmer test	279.936	9.331	1	30	5		101	279.936
Multiplication	1.679.616	83.981	1	20	2		242	1.679.616
Release	10.077.696	503.885	1	20	2		1.451	10.077.696
Breeding stage	Esquema alternativo de melhoramento genético com a abordagem 8MP							
SET	1	1	1	1	10.000	15.000	1	1
CET	12	6	1	2	2.000		2	12
AYT	144	16	3	3	300		3	144
UYT	1.728	72	3	8	100		12	1.728
UYT	20.736	691	3	10	30		45	20.736
Farmer test	248.832	6.221	1	40	20		358	248.832
Multiplication	2.985.984	85.314	1	35	5		1.075	2.985.984
Release	35.831.808	1.791.590	1	20	2		5.160	35.831.808

SDN: seedlings nurse; CET: clonal evaluation trial; PYT: Preliminar yield trial; AYT: Advanced yield trial; UYT: Uniformed yield trial; Farmer test; Multiplication; Release. No esquema alternativo (direita), as principais modificações em comparação com o sistema convencional estão destacadas em vermelho.

A fase de testes em campo envolve a realização de testes de validação agrônômica em um mínimo de 40 ambientes, com um mínimo de 2.000 plantas, o que normalmente é alcançado por meio de dois ciclos de avaliação no sistema convencional. No entanto, com a abordagem 8MP, seria possível reduzir o período de validação dos testes em campo em um ano. Após um ano dos testes UYT, mais de 6.000 plantas de cada clone estariam disponíveis para a realização dos 40 testes em campo. Na fase de multiplicação para os agricultores, surge outra

mudança, pois torna-se possível trabalhar com mais de 35 agentes multiplicadores registrados, em vez dos 20 do procedimento convencional. Além disso, a abordagem 8MP permite a produção de mais de 2,9 milhões de plantas, em comparação com os 1,7 milhão da estratégia convencional. Esse aumento na capacidade de produção impacta significativamente a difusão de novas variedades de mandioca (Figura 6 e Tabela 3).

O layout esquemático (Figura 6) foi cuidadosamente projetado para se alinhar às regulamentações brasileiras que regem a proteção e o registro de novas cultivares de mandioca. Esta estrutura abrangente foi adaptada para cumprir o mandato específico de conduzir um mínimo de dois ensaios UYT, garantindo a conformidade com os rigorosos critérios para avaliar o VCU dessas novas cultivares. Isso engloba considerações como o número mínimo estipulado de plantas por ensaio e a inclusão imprescindível de diversos ambientes de teste. No entanto, vale a pena considerar abordagens alternativas, mais simplificadas, que podem potencialmente acelerar o processo, tais como: Ano 1: cruzamento; Ano 2: viveiro de mudas; Ano 3: ensaio de avaliação clonal; Ano 4: ensaio avançado de rendimento, multilocal; Ano 5: ensaio de rendimento uniforme, multilocal; Ano 6: testes e validação em campo; Ano 7: lançamento oficial da variedade. Embora esse plano alternativo necessite de validação, nossos dados compilados sugerem fortemente uma alta probabilidade de se alcançar esse elevado nível de otimização dentro do programa de melhoramento genético da mandioca.

4 DISCUSSÃO

4.1 Componentes de variância e parâmetros genéticos em ensaios com estacas de tamanho padrão e reduzido.

Os programas de melhoramento genético visam desenvolver genótipos superiores com características desejáveis que proporcionem vantagens competitivas em relação às variedades existentes. O sucesso da seleção desses genótipos superiores depende da presença de variabilidade genética e da compreensão da influência ambiental na expressão das características. O potencial genético das populações de melhoramento genético pode ser avaliado pela estimativa de parâmetros genéticos e fenotípicos, permitindo a seleção de características favoráveis. Características com maior variância genética permitem

a seleção precoce, independentemente dos efeitos ambientais. No entanto, apesar da ampla adaptabilidade da mandioca a diversas condições ambientais, a maioria das variedades apresenta adaptabilidade limitada e apresenta efeitos significativos de interação G×E (Tumuhimbise et al., 2014; Bakare et al., 2022). Isso fica evidente no cultivo de mais de 80 variedades locais e melhoradas de mandioca em todo o Brasil, abrangendo do norte ao sul.

Para a maioria das características agronômicas avaliadas, os efeitos ambientais e as interações G×E predominaram, exceto para características como PIArc e DMC, onde as variâncias genéticas desempenharam um papel mais proeminente, particularmente em ensaios multiambientais. Estudos anteriores também relataram uma menor influência do ambiente e da interação G×E nessas características (Okeke et al., 2018; Rabbi et al., 2022). Curiosamente, as variâncias observadas nos ensaios de 8MP (tamanho reduzido) e 16cm (tamanho padrão) foram bastante semelhantes entre os diferentes ensaios, indicando que os efeitos genéticos foram capturados de forma similar e que houve uma forte associação entre os valores fenotípicos e genotípicos de magnitude semelhante.

Dentre os parâmetros genéticos avaliados, a herdabilidade é considerada um índice importante, pois quantifica a proporção da variação fenotípica atribuída às diferenças genéticas entre os indivíduos (Falconer e Mackay, 1996). Em geral, a H^2 e H_c^2 os valores foram maiores em ensaios com replicações, como PYT e UYT, para a maioria das características. Isso pode ser atribuído à maior precisão das estimativas devido à inclusão de replicações e à avaliação de um número maior de ambientes diversos nos ensaios UYT. Um estudo de Freitas et al. (2018), que comparou parâmetros genéticos e ganhos genéticos em estágios iniciais do melhoramento da mandioca utilizando famílias de irmãos completos (F_1) e autopolinizadas (S_1) também encontraram estimativas de herdabilidade mais altas para características como teor de matéria seca e produção de raízes frescas e secas em ensaios replicados (PYT) em comparação com ensaios não replicados em um único ambiente (CET). Os autores enfatizaram a baixa concordância na seleção de clones entre os ensaios CET e PYT e recomendaram o aumento do número de clones por família e o uso de intensidade de seleção moderada, particularmente no CET, para descartar clones de baixo desempenho nos estágios iniciais da seleção.

Embora a herdabilidade tenha aumentado com os melhores delineamentos experimentais nos ensaios PYT e UYT, as diferenças em H^2 e H_c^2 os parâmetros entre os tratamentos de 16 cm e 8 MP foram geralmente baixos, especialmente na análise conjunta de cada fase do programa de melhoramento. Isso indica que ambos os tratamentos capturaram proporções semelhantes da variância genética nos dados. Portanto, é importante implementar ensaios com repetições em campo e avaliações em diversos ambientes, mesmo nos estágios iniciais dos programas de melhoramento da mandioca, para obter estimativas mais precisas dos parâmetros genéticos, que são frequentemente utilizados na seleção de clones para melhoramento. De acordo com Grüneberg et al. (2009), aumentar o número de ensaios (locais e anos) é crucial para aumentar a herdabilidade das características, e incorporar a interação G×E na predição dos valores genéticos em um estágio inicial aumenta o potencial de ganho genético por unidade de tempo.

4.2 Classificação da capacidade dos clones em ensaios com estacas de tamanho padrão e reduzido.

O progresso dos clones de mandioca em diferentes estágios do programa de melhoramento (CET, PYT, AYT e UYT) depende fortemente da qualidade dos ensaios experimentais e da precisão da fenotipagem das características selecionadas. Isso é particularmente verdadeiro para características com baixa herdabilidade, como produtividade de raízes frescas, teor de amido e resistência a doenças (Diniz e Oliveira, 2019). Normalmente, essas características são avaliadas em estágios avançados de seleção com ensaios replicados conduzidos em múltiplos ambientes. Após a fenotipagem, os melhoristas de mandioca classificam os genótipos utilizando índices de seleção que consideram os pesos econômicos atribuídos às diversas características analisadas. Isso possibilita a tomada de decisões quanto ao avanço ou eliminação de genótipos nas etapas subsequentes de seleção. No presente estudo, a classificação de clones de mandioca usando a abordagem convencional (16 cm) e tamanho reduzido do material de propagação (8 MP) mostrou resultados promissores.

As classificações variaram de magnitudes moderadas nos ensaios CET ($R = 0,41^{***}$) e PYT ($R = 0,57^{***}$) a altas nos ensaios UYT ($R = 0,85^{***}$). Em termos

práticos, isso significa que, com uma intensidade de seleção de 30% dos clones, mais da metade deles foram selecionados utilizando ambas as abordagens (16 cm e 8 MP) nos ensaios CET e PYT. No ensaio UYT, mais de 80% dos clones foram selecionados utilizando ambas as abordagens. Além disso, ao empregar uma intensidade de seleção menor (<30%), a concordância na classificação dos clones de mandioca seria ainda maior, visto que os melhores clones foram selecionados consistentemente por ambas as abordagens.

Embora o aumento do número de ensaios nos estágios iniciais dos programas de melhoramento de mandioca tenha o potencial de melhorar as estimativas de herdabilidade, a consideração da interação G×E pode complicar a seleção, alterando a classificação dos genótipos em diferentes ambientes de cultivo. No entanto, a modelagem da estabilidade fenotípica e a identificação dos genótipos mais estáveis tornaram-se cruciais para o desenvolvimento de cultivares de mandioca bem-sucedidas (Jiwuba et al., 2020; Bakare et al., 2022). A avaliação da interação G×E é essencial para o desenvolvimento de uma estratégia de melhoramento otimizada, visando a obtenção de genótipos que se adaptem bem aos ambientes-alvo. A introdução desse componente em estágios iniciais dos programas de melhoramento permite uma seleção mais rápida de genitores para novos ciclos de melhoramento e, principalmente, reduz o tempo necessário para o desenvolvimento de novas variedades de mandioca.

4.3 Novo esquema de seleção baseado no tamanho reduzido de corte (8MP) para acelerar o desenvolvimento de cultivares de mandioca

Tanto o sistema de produção comercial quanto o sistema de plantio convencional em programas de melhoramento genético dependem da multiplicação clonal por meio de estacas de mandioca, que são plantadas diretamente no campo. No entanto, o sistema comercial frequentemente utiliza materiais de plantio de baixa qualidade, frequentemente contaminados com pragas e doenças, comprometendo a germinação, o estabelecimento e rentabilidade das culturas. Em programas de melhoramento genético, a qualidade das estacas é mantida para garantir a identificação do máximo potencial genético de novos genótipos. Contudo, ambos os sistemas são limitados pela taxa de propagação da mandioca, que geralmente varia de 1:5 a 1:10, dependendo da

variedade (Oliveira et al., 2020). Consequentemente, a produção de material de plantio em larga escala leva vários anos.

Diversas técnicas para a propagação rápida da mandioca têm sido descritas na literatura. A micropropagação *in vitro* é uma dessas técnicas, capaz de produzir material de plantio de alta qualidade em larga escala e em curto período (Aladele e Kuta, 2008; Feyisa, 2023). No entanto, a principal desvantagem da micropropagação *in vitro* é o alto custo de produção das mudas, principalmente devido às sofisticadas exigências laboratoriais e aos procedimentos de manejo pós-embalagem, que muitas vezes representam um desafio para os usuários (Legg et al., 2022). Consequentemente, essa metodologia geralmente se limita à produção de material básico para outras técnicas de propagação rápida de menor custo.

Outra técnica envolve o uso de materiais de plantio mais curtos, como miniestacas de 5 cm de comprimento contendo 2 a 3 gemas, que são plantadas em câmaras de crescimento. Esse método tem demonstrado alta eficiência na rápida multiplicação e preservação de variedades locais ameaçadas por problemas climáticos, como secas severas em certas regiões do Brasil. Recentemente, Neves et al. (2020) aprimoraram uma técnica de multiplicação rápida baseada em gemas foliares imaturas, que pode atingir uma taxa de multiplicação anual de 1:72. Além disso, o método hidropônico semiautotrófico (SAH), que aproveita a capacidade autotrófica da planta para crescer em ambientes com trocas gasosas aprimoradas e condições mais naturais (Rigato et al., 2000), foi adaptado para a rápida propagação da mandioca. No entanto, todas as metodologias mencionadas focam principalmente na produção de mudas que necessitam de aclimatização como produto final, o que representa um desafio para sua adoção prática. Usuários finais, como produtores, cooperativas e agroindústrias, muitas vezes não possuem a expertise necessária para o plantio de mudas de mandioca, principalmente em larga escala. Além disso, o plantio de mudas acarreta custos adicionais, principalmente devido ao aumento da necessidade de mão de obra para o plantio e a manutenção das plantas no campo, bem como à necessidade de manejo especializado de herbicidas.

Recentemente, Oliveira et al. (2020) desenvolveram uma estratégia para a multiplicação rápida de mandioca no campo utilizando agroquímicos que protegem e estimulam o crescimento, conhecidos como agroquímicos protetores

e estimulantes de crescimento. Essa técnica permitiu a redução do tamanho do material de propagação da mandioca para 8 cm sem comprometer a germinação e o estabelecimento da cultura, mantendo rendimentos comparáveis aos do material de propagação convencional não tratado (16 cm). Embora essa tecnologia mostre grande potencial para aumentar a taxa de multiplicação em sistemas de produção de sementes de mandioca, sua aplicação em programas de melhoramento genético é atualmente limitada. No entanto, os resultados do nosso estudo demonstram que o uso da abordagem 8MP em testes CET possibilitaria a inclusão de testes em diferentes ambientes durante a fase inicial do programa de melhoramento. Isso permite a avaliação do desempenho do clone e da interação G×E em um estágio mais precoce, em comparação com o esquema de melhoramento atual, no qual a avaliação da interação G×E ocorre tipicamente durante os testes AYT e, em alguns casos, durante os testes PYT. Assim, uma mudança significativa neste novo esquema de melhoramento envolveria a eliminação dos ensaios PYT, enquanto os ensaios AYT seriam conduzidos com um número reduzido de plantas, mas com o mesmo número de repetições e ambientes de avaliação que os métodos convencionais.

Ambos os métodos incorporariam testes UYT ao longo de dois anos consecutivos para gerar as informações mínimas necessárias para o registro e proteção de cultivares de mandioca. No entanto, com o esquema de multiplicação 8MP, seria possível avaliar os clones em pelo menos 8 ambientes no primeiro ano e 10 ambientes no segundo ano, enquanto o sistema convencional normalmente inclui a avaliação de clones em aproximadamente 6 e 8 ambientes durante o primeiro e segundo ano dos ensaios UYT, respectivamente. Essa abordagem de avaliação aprimorada permite uma avaliação mais abrangente do desempenho dos clones sob diversas condições ambientais.

No sistema convencional, são implementados dois anos de avaliação em ensaios de campo, resultando na geração de aproximadamente 1,7 milhão de mudas-semente. Em contraste, o sistema de multiplicação de estacas 8MP introduz uma mudança significativa ao implementar apenas um ano de avaliação em ensaios de campo em cerca de 40 ambientes de cultivo diferentes. Essa abordagem produziria um número substancialmente maior de mudas-semente (aproximadamente 2,9 milhões) para a etapa subsequente de multiplicação, destinada à distribuição aos usuários finais. A introdução da abordagem 8MP e a

modificação do esquema de melhoramento proposto neste estudo representam avanços importantes na multiplicação e no melhoramento da mandioca. Essas mudanças têm o potencial de aprimorar a avaliação de clones em diversos ambientes em um estágio inicial, acelerar o ciclo de melhoramento e aumentar a disponibilidade de material de plantio de alta qualidade para os agricultores. Ao integrar essas inovações, podemos acelerar o desenvolvimento de variedades de mandioca melhoradas, beneficiando, em última análise, tanto os melhoristas quanto os usuários finais.

Nos últimos anos, os melhoristas de mandioca têm demonstrado crescente interesse na exploração de métodos alternativos de seleção. Ceballos et al. (2007) propuseram uma série de alterações no esquema de melhoramento adotado pelo CIAT, que apresenta similaridades com as alterações propostas em nosso estudo. Essas mudanças se concentraram principalmente nos estágios iniciais da seleção e incluíram a eliminação de um estágio de multiplicação após a avaliação das mudas (F1C1), a implementação de testes CET com 8 plantas em vez das 6 convencionais e a condução de testes PYT com três repetições em vez de uma única repetição de campo. Ao adotar esse novo esquema de seleção, o tempo necessário para atingir os testes foi reduzido de 66 para 58 meses após a germinação botânica das sementes. Em nosso estudo, a abordagem 8MP, quando integrada ao programa de melhoramento de mandioca, poderia potencialmente levar a uma redução ainda mais significativa no tempo necessário para atingir os ensaios AYT (36 meses). Essa abordagem também poderia impactar o tempo total necessário para o desenvolvimento de cultivares, potencialmente reduzindo-o para 9 anos em comparação com o procedimento convencional de 11 anos. Além disso, teria implicações na quantidade final de material de propagação disponível para distribuição aos agricultores.

Embora o foco da nossa apresentação de resultados tenha sido principalmente a classificação e o comportamento dos clones à medida que progridem no programa de melhoramento, as mudanças propostas introduziriam alterações importantes no melhoramento de populações de mandioca. Tradicionalmente, o melhoramento tem sido baseado no desempenho dos clones, e não nos valores genéticos individuais. Somente recentemente esse paradigma foi alterado com a implementação da seleção genômica em diversos programas de melhoramento de mandioca (Oliveira et al., 2012; Wolfe et al., 2016; Wolfe et

al., 2017; Andrade et al., 2019; Torres et al., 2019). A seleção genômica envolve a seleção de genitores com base nos valores genômicos estimados de melhoramento (GEBV) previstos na fase de plântula, sem incorporar dados fenotípicos da geração atual. Embora essa estratégia reduza o ciclo de melhoramento da mandioca para 24 meses (incluindo as fases de cruzamento), características complexas com influência significativa de efeitos não aditivos, como rendimento de raiz fresca, rendimento de raiz seca e resistência a doenças como a estria marrom da mandioca (CBSD), apresentam baixa acurácia preditiva (Wolfe et al., 2017; Andrade et al., 2022; Ozimati et al., 2022). Isso provavelmente se deve ao fato de os modelos de predição genômica não terem sido atualizados com dados fenotípicos das gerações atuais. No entanto, com o novo esquema de seleção proposto neste estudo, os valores genéticos reais dos clones de mandioca, juntamente com sua capacidade geral de combinação, poderiam ser obtidos por meio dos ensaios AYT, que durariam até 36 meses, incluindo as fases de cruzamento. Isso permitiria que a predição genômica fosse realizada após a obtenção dos dados AYT, possibilitando a atualização dos modelos de predição e a melhoria da acurácia preditiva com a inclusão de mais um ano no ciclo de melhoramento.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A urgência de abordar as mudanças climáticas e seu impacto na produção global de alimentos exige o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis. A mandioca, por ser uma cultura resiliente e versátil, possui grande potencial como alimento, ração animal e cultura industrial diante dos cenários climáticos adversos previstos. No entanto, o melhoramento genético da mandioca tem sido mais lento em comparação com outras culturas, como os cereais, principalmente devido ao seu longo ciclo reprodutivo e baixa taxa de multiplicação. Portanto, há necessidade de inovar os programas tradicionais de melhoramento genético para acelerar a disponibilidade de variedades melhoradas que apresentem resistência a doenças e estresses associados ao aumento das temperaturas e à escassez de água, atendendo também aos requisitos de qualidade dos usuários finais.

Neste estudo, propomos um novo esquema de melhoramento que permite a implementação precoce de testes multiambientais em programas de

melhoramento, utilizando estacas-semente menores tratadas com uma formulação contendo agroquímicos protetores e estimulantes de crescimento. Essa abordagem permite a estimativa de parâmetros genéticos e a classificação de clones de mandioca de maneira semelhante aos esquemas de seleção convencionais. No entanto, a principal vantagem da nossa abordagem é a incorporação da avaliação da interação G×E no estágio final de teste (CET), eliminando a necessidade de etapas separadas de multiplicação e seleção. Além disso, aumenta a disponibilidade de material de propagação para cultivares a serem distribuídas aos usuários finais nas etapas finais do programa de melhoramento e reduz o tempo necessário para o desenvolvimento de novas cultivares de 11 para 9 anos. Essa redução de tempo também se traduz em economia de custos nos programas de melhoramento genético.

Ao implementar este novo programa, pretendemos acelerar o melhoramento genético da mandioca, permitindo o desenvolvimento de variedades mais produtivas com maior resistência a doenças e estresses associados às mudanças climáticas. Essas inovações contribuirão para garantir a segurança alimentar e atender às demandas dos consumidores finais, ao mesmo tempo que enfrentam os desafios impostos pelas mudanças climáticas.

Contribuições do autor

LC: Análise formal, Investigação, Metodologia, Validação, Visualização, Redação – rascunho original. DC: Investigação, Metodologia, Software, Supervisão, Validação, Redação – revisão e edição. DK: Conceitualização, Administração do projeto, Recursos, Redação – revisão e edição. MR: Conceitualização, Recursos, Supervisão, Redação – revisão e edição. EO: Conceitualização, Obtenção de financiamento, Metodologia, Administração do projeto, Supervisão, Redação – revisão e edição.

Financiamento

Os autores declaram ter recebido apoio financeiro para a pesquisa, autoria e/ou publicação deste artigo. LC: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB). Número da concessão: 501/2022. DC: Funarbe

(Fundação Arthur Bernardes). Número da bolsa: 4390. EO: CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico). Número da bolsa: 409229/2018-0, 442050/2019-4 e 303912/2018-9; FAPESB (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia). Número da concessão: Pronem 15/2014; Fundação Syngenta para Agricultura Sustentável (SFSA). Concessão:1020019/0051-9. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo Foreign, Commonwealth & Development Office (FCDO) do Reino Unido e pela Fundação Bill & Melinda Gates. Subvenção INV-007637. De acordo com as condições da subvenção da Fundação, uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Genérica já foi atribuída à versão do Manuscrito Aceito pelo Autor que possa surgir desta submissão. A entidade financiadora forneceu apoio na forma de bolsa e financiamento para a pesquisa, mas não teve qualquer participação adicional no planejamento do estudo, coleta e análise dos dados, decisão de publicação ou preparação do manuscrito.

Material suplementar

O material suplementar deste artigo pode ser encontrado online em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2023.1258101/full#supplementary-material>

5. REFERÊNCIAS

ALADELE, S. E.; KUTA, D. D. Environmental and genotypic effects on the growth rate of *in vitro* cassava plantlet (*Manihot esculenta*). **African Journal of Biotechnology**, v. 7, p. 381–385, 2008.

ANDRADE, L. R. B.; SOUSA, M. B.; OLIVEIRA, E. J.; RESENDE, M. D. V.; AZEVEDO, C. F. Cassava yield traits predicted by genomic selection methods. **PLOS One**, v. 14, n. 11, e0224920, 2019. DOI: 10.1371/journal.pone.0224920.

ANDRADE, L. R. B.; SOUSA, M. B. E.; WOLFE, M.; JANNINK, J. L.; RESENDE, M. D. V.; AZEVEDO, C. F. et al. Increasing cassava root yield: additive-dominant genetic models for selection of parents and clones. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, 2022. DOI: 10.3389/fpls.2022.1071156.

BAKARE, M. A.; KAYONDO, S. I.; AGHOGHO, C. I.; WOLFE, M. D.; PARKES, E. Y.; KULAKOW, P. et al. Parsimonious genotype by environment interaction covariance models for cassava (*Manihot esculenta*). **Frontiers in Plant Science**, v. 13, 2022. DOI: 10.3389/fpls.2022.978248.

- BATES, D.; MÄCHLER, M.; BOLKER, B.; WALKER, S. Fitting linear mixed-effects models using lme4. **Journal of Statistical Software**, v. 67, n. 1, p. 1–48, 2015. DOI: 10.18637/jss.v067.i01.
- BLAND, J. M.; ALTMAN, D. G. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. **The Lancet**, v. 327, p. 307–310, 1986.
- BRADSHAW, J. **Plant breeding: past, present and future**. Cham: Springer, 2016.
- CEBALLOS, H.; PÉREZ VELÁSQUEZ, J. C.; CALLE, F.; JARAMILLO, G.; LENIS CALDERÓN, J. I.; MORANTE, N. et al. A new evaluation scheme for cassava breeding at CIAT. In: **HOWELER, R. H. (ed.). Cassava research and development in Asia: exploring new opportunities for an ancient crop**. Cali: CIAT, 2007. p. 125–135.
- CEBALLOS, H.; ROJANARIDPICHED, C.; PHUMICHAJ, C.; BECERRA, L. A.; KITTIPADAKUL, P.; IGLESIAS, C. et al. Excellence in cassava breeding: perspectives for the future. **Crop Breeding, Genetics and Genomics**, v. 2, n. 2, e200008, 2020. DOI: 10.20900/cbgg20200008.
- CULLIS, B. R.; SMITH, A. B.; COOMBES, N. E. On the design of early generation variety trials with correlated data. **Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics**, v. 11, n. 4, p. 381–393, 2006. DOI: 10.1198/108571106x154443.
- DINIZ, R. P.; OLIVEIRA, E. J. Genetic parameters, path analysis and indirect selection of agronomic traits of cassava germplasm. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 91, n. 3, e20180387, 2019. DOI: 10.1590/0001-3765201920180387.
- FALCONER, D. S.; MACKAY, T. F. C. **Introduction to quantitative genetics**. 4. ed. Harlow: Pearson Prentice Hall, 1996.
- FAOSTAT. **Production, cassava, all countries**. Rome: FAO, 2020. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat>.
- FEYISA, A. S. Protocol optimization for rapid multiplication of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) using the nodal segment. **Agricultural Science Digest**, v. 43, n. 1, p. 18–23, 2023. DOI: 10.18805/ag.DF-397.
- FREITAS, J. P. X.; DINIZ, R. P.; SANTOS, V. S.; OLIVEIRA, E. J. Genetic parameters and selection gains in early clonal evaluation trials: implications for cassava breeding. **Euphytica**, v. 214, 127, 2018. DOI: 10.1007/s10681-018-2209-0.
- GAUCH, H. G.; ZOBEL, R. W. AMMI analysis of yield trials. In: **KANG, M. S.; GAUCH JUNIOR, H. G. (eds.). Genotype-by-environment interaction**. Boca Raton: CRC Press, 1996. p. 85–122.

GRÜNEBERG, W. J.; DIAZ, F.; EYZAGUIRRE, R.; ESPINOZA, J.; BURGOS, G.; FELDE, T. Z. et al. Heritability estimates for an accelerated breeding scheme (ABS) in clonally propagated crops. In: **Proceedings of the 15th ISTRC Symposium**. Lima, 2009.

HOWELER, R.; LUTALADIO, N.; THOMAS, G. **Save and grow cassava: a guide to sustainable production intensification**. Rome: FAO, 2013.

JIWUBA, L.; DANQUAH, A.; ASANTE, I.; BLAY, E.; ONYEKA, J.; DANQUAH, E. et al. Genotype by environment interaction on resistance to cassava green mite. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 2020. DOI: 10.3389/fpls.2020.572200.

KAWANO, K.; GONÇALVES FUKUDA, W. M.; CENPUKDEE, U. Genetic and environmental effects on dry matter content of cassava root. **Crop Science**, v. 27, p. 69–74, 1987. DOI: 10.2135/cropsci1987.0011183X002700010018x.

IITA. **First SAH originated cassava stems harvested in Nigeria**. Ibadan: International Institute of Tropical Agriculture, 2017.

LEGG, J. P.; DIEBIRU-OJO, E.; EAGLE, D.; FRIEDMANN, M.; KANJU, E.; KAPINGA, R. et al. Commercially sustainable cassava seed systems in Africa. In: **THIELE, G.; FRIEDMANN, M.; CAMPOS, H.; POLAR, V.; BENTLEY, J. W. (eds.). Root, tuber and banana food system innovations**. Cham: Springer, 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-92022-7_15.

MULAMBA, N. N.; MOCK, J. J. Improvement of yield potential of the Eto Blanco maize (*Zea mays*) population by breeding for plant traits. **Egyptian Journal of Genetics and Cytology**, v. 7, p. 40–57, 1978.

NEVES, R. L.; SOUZA, L. S.; OLIVEIRA, E. J. A leaf bud technique for rapid propagation of cassava (*Manihot esculenta* Crantz). **Scientia Agricola**, v. 77, n. 2, e20180005, 2020. DOI: 10.1590/1678-992X-2018-0005.

OKEKE, U. G.; AKDEMIR, D.; RABBI, I.; KULAKOW, P.; JANNINK, J. L. Regional heritability mapping provides insights into dry matter content in African white and yellow cassava populations. **The Plant Genome**, v. 11, 170050, 2018. DOI: 10.3835/plantgenome2017.06.0050.

OLIVEIRA, E. J.; OLIVEIRA, S. A. S.; OTTO, C.; ALICAI, T.; FREITAS, J. P. X.; CORTES, D. F. M. et al. A novel seed treatment-based multiplication approach for cassava planting material. **PLOS One**, v. 15, n. 3, e0229943, 2020. DOI: 10.1371/journal.pone.0229943.

OLIVEIRA, E. J.; RESENDE, M. D. V.; SILVA, F.; SANTOS, V.; FERREIRA, C. F.; OLIVEIRA, G. A. F. et al. Genome-wide selection in cassava. **Euphytica**, v. 187, n. 2, p. 263–276, 2012. DOI: 10.1007/s10681-012-0722-0.

OZIMATI, A. A.; ESUMA, W.; MANZE, F.; IRAGABA, P.; KANAABI, M.; ANO, C. U. et al. Utility of Ugandan genomic selection cassava breeding populations for prediction of cassava viral disease resistance and yield in West African clones. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, 2022. DOI: 10.3389/fpls.2022.1018156.

PATIL, I. Visualizations with statistical details: The “ggstatsplot” approach. **Journal of Open Source Software**, v. 6, n. 61, 3167, 2021. DOI: 10.21105/joss.03167.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2020. Disponível em: <https://www.R-project.org>. Acesso em: ano de acesso.

RIGATO, S.; GONZALEZ, A.; HUARTE, M. Producción de plántulas de papa a partir de técnicas combinadas de micropropagación e hidroponía para la obtención de semilla prebásica. In: **XIX Congreso de la Asociación Latinoamericana de la Papa**. La Habana, 2000.

SCHMIDT, P.; HARTUNG, J.; RATH, J.; PIEPHO, H. Estimating broad-sense heritability with unbalanced data from agricultural cultivar trials. **Crop Science**, v. 59, p. 525–536, 2019. DOI: 10.2135/cropsci2018.06.0376.

SOUZA, L. S.; FARIAS, A. R. N.; MATTOS, P. L. P.; FUKUDA, W. M. G. **Aspectos socioeconômicos e agronômicos da mandioca**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 2006.

STAPLETON, G. Global starch market outlook and competing starch raw materials. In: **Cassava starch world 2012**. Phnom Penh: Centre for Management Technology, 2012.

TORRES, L. G.; RESENDE, M. D. V.; AZEVEDO, C. F.; FONSECA E SILVA, F.; OLIVEIRA, E. J. Genomic selection for yield traits in biparental cassava breeding populations. **PLOS One**, v. 14, n. 7, e0220245, 2019. DOI: 10.1371/journal.pone.0220245.

TUMUHIMBISE, R.; MELIS, R.; SHANAHAN, P. Diallel analysis of early storage root yield and disease resistance traits in cassava (*Manihot esculenta* Crantz). **Field Crops Research**, v. 167, p. 86–93, 2014. DOI: 10.1016/j.fcr.2014.07.006.

WOLFE, M. D.; DEL CARPIO, D. P.; ALABI, O.; EZENWAKA, L. C.; IKEOGU, U. N.; KAYONDO, I. S. et al. Prospects for genomic selection in cassava breeding. **The Plant Genome**, v. 10, n. 3, 2017. DOI: 10.3835/plantgenome2017.03.0015.

WOLFE, M. D.; KULAKOW, P.; RABBI, I. Y.; JANNINK, J. L. Marker-based estimates reveal significant non-additive effects in clonally propagated cassava (*Manihot esculenta*). **G3: Genes, Genomes, Genetics**, v. 6, n. 11, p. 3497–3506, 2016. DOI: 10.1534/g3.116.033332.

Capítulo 2

DESENVOLVIMENTO DE SEMENTES SINTÉTICAS COMO ESTRATÉGIA PARA AUMENTO DA TAXA MULTIPLICATIVA EM MANDIOCA

DEZEMBRO/2025

Desenvolvimento de sementes sintéticas como estratégia para aumento da taxa multiplicativa em mandioca

RESUMO: A mandioca é uma espécie de segurança alimentar global, embora sua propagação vegetativa convencional por manivas impõe baixas taxas de multiplicação e riscos fitossanitários. Este estudo investigou o desenvolvimento de um sistema de sementes sintéticas, analisando como as propriedades físico-funcionais da matriz de alginato de sódio (0,8–6%) influenciam a morfogênese *ex vitro* de gemas axilares. Investigamos a dualidade entre estabilidade mecânica e biocompatibilidade utilizando dois agentes reticulantes: CaCl_2 e Ca(OH)_2 . Nossos resultados revelaram uma dicotomia estrutural crítica, tendo em vista que o CaCl_2 promoveu uma gelificação instantânea via modelo *egg-box*, resultando em redes poliméricas densas com baixa solubilidade (41–55%). Essa rigidez excessiva criou barreiras físicas e possivelmente hipóxicas, reduzindo a germinação para 11,1% em baixas concentrações e inibindo-a completamente em níveis $\geq 4\%$. Em contrapartida, o uso de Ca(OH)_2 alterou a cinética de reticulação, gerando matrizes mais permeáveis e hidratadas. Esta configuração otimizou a troca gasosa e a disponibilidade de água, alcançando 80,6% de emergência com vigor vegetativo superior e maior acúmulo de biomassa. Identificamos que a faixa de 1–2% de alginato de sódio representa o equilíbrio ideal entre proteção física e emissão do broto. A análise mecanística demonstra que a porosidade da matriz é o fator determinante para o sucesso da semente sintética, superando a necessidade de suporte nutricional imediato. Este trabalho estabelece as bases para o escalonamento da biotecnologia de sementes sintéticas na mandioca, oferecendo uma solução viável para a rápida disseminação de cultivares superiores. Perspectivas futuras incluem o enriquecimento da matriz com agentes de proteção osmótica e o teste de escalonabilidade em sistemas automatizados de plantio, visando integrar esta tecnologia às cadeias produtivas industriais.

Palavras chaves: *Manihot esculenta* Crantz, Polímeros, Propagação vegetativa, Encapsulamento, Biotecnologia vegetal, Micropropagação

Development of synthetic seeds as a strategy to enhance multiplication rates in cassava

Abstract: Cassava is a crop of major global importance for food security; however, its conventional vegetative propagation through stem cuttings is constrained by low multiplication rates and significant phytosanitary risks. In this study, we developed a synthetic seed system and examined how the physicofunctional properties of sodium alginate matrices (0.8–6%) influence the *ex vitro* morphogenesis of axillary buds. We specifically investigated the trade-off between mechanical stability and biological permissiveness using two distinct crosslinking agents, CaCl_2 and $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Our results revealed a critical structural dichotomy. CaCl_2 induced rapid gelation through the egg-box mechanism, generating densely crosslinked polymer networks with low solubility (41–55%). This excessive rigidity imposed physical and potentially hypoxic constraints, reducing germination to 11.1% at low polymer concentrations and completely suppressing emergence at concentrations $\geq 4\%$. In contrast, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ modified crosslinking kinetics, producing more hydrated and permeable matrices. These conditions improved gas exchange and water availability, resulting in 80.6% emergence, enhanced vegetative vigor, and greater biomass accumulation. We identified the 1–2% sodium alginate range as the optimal balance between physical protection and shoot emergence. Mechanistic analysis further demonstrated that matrix porosity, rather than immediate nutritional support, is the primary determinant of synthetic seed performance. Collectively, these findings establish a foundation for scaling synthetic seed biotechnology in cassava and highlight its potential as a practical tool for the rapid dissemination of elite cultivars. Future work will focus on matrix enrichment with osmoprotective agents and on evaluating scalability in automated planting systems to facilitate integration into industrial production chains.

Keywords: *Manihot esculenta* Crantz; polymers; vegetative propagation; encapsulation; plant biotechnology; micropropagation

1. INTRODUÇÃO

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) constitui um dos pilares da segurança alimentar e do desenvolvimento socioeconômico nas regiões tropicais, servindo como fonte primária de carboidratos para aproximadamente um bilhão de indivíduos e representando uma cadeia produtiva de relevância estratégica para o Brasil, um dos maiores produtores mundiais (FAO, 2023; IBGE, 2024). Sua alta resiliência a solos de baixa fertilidade e a condições de estresse hídrico a posiciona como cultura-chave para a agricultura sustentável em um cenário de mudanças climáticas. No entanto, como espécie predominantemente propagada por via vegetativa, a mandioca enfrenta barreiras intrínsecas ao estabelecimento inicial das plântulas, incluindo a sensibilidade à compactação do solo, à formação de crostas superficiais e ao acúmulo de resíduos vegetais, fatores que comprometem a uniformidade e o vigor do estande (REICHE et al., 2021; OCAÑA-REYES et al., 2024). A principal limitação para a aceleração do melhoramento genético e a difusão rápida de cultivares superiores reside na baixa taxa de multiplicação vegetativa inerente ao método convencional, baseado no uso de estacas caulinares (manivas) (CEBALLOS; KULAKOW; HERSHEY, 2012). Este sistema é ineficiente, demandando grande volume de material propagativo por área, apresentando alta perecibilidade pós-colheita, vulnerabilidade ao dessecação e atuando como vetor para a disseminação de patógenos sistêmicos, como vírus e bactérias (CEBALLOS; PAREDES; JARAMILLO, 2021). Tais restrições resultam em ciclos de melhoramento prolongados, elevado custo logístico e lenta substituição varietal nos campos dos produtores, perpetuando a vulnerabilidade a doenças e limitando os ganhos de produtividade (XIAO; WANG; LI, 2025).

Esforços recentes têm buscado otimizar o protocolo de propagação através da redução do tamanho das estacas. Estudos demonstram que miniestacas tratadas com formulações agroquímicas protetoras e bioestimulantes podem apresentar desempenho agrônômico comparável ou superior ao das estacas padrão de 16 cm, com vantagens significativas em parâmetros genéticos como herdabilidade e ganho genético esperado (CONCEIÇÃO et al., 2023). Esta estratégia permite a antecipação de avaliações multiambientais e a ampliação da disponibilidade de material propagativo nas fases finais dos programas de

melhoramento, reduzindo potencialmente a duração do ciclo de desenvolvimento de novas cultivares e gerando economia operacional.

Paralelamente, a biotecnologia vegetal oferece soluções disruptivas, com destaque para a tecnologia de sementes sintéticas. Esta abordagem consiste no encapsulamento de propágulos somáticos (como gemas axilares, ápices caulinares ou embriões somáticos) em matrizes poliméricas hidratadas, mimetizando a função de uma semente botânica (AHMAD; SHAHZAD, 2019). As sementes sintéticas apresentam potencial revolucionário para a multiplicação clonal em massa, conservação *ex situ* de germoplasma, e distribuição internacional de material vegetal com alta garantia fitossanitária (FAISAL; ALATAR, 2019; SAHU et al., 2025). O sucesso da técnica já foi validado em diversas culturas de propagação vegetativa, incluindo batata (*Solanum tuberosum*) (GHANBARALI et al., 2016), beterraba (*Beta vulgaris* subsp. *maritima*) (KHABBAZI; YÜKSEL OZMEN; ERGÜL, 2019) e batata-doce (*Ipomoea batatas*) (TADDA et al., 2021).

A viabilidade econômica e operacional da tecnologia depende criticamente da possibilidade de implantação direta no campo (*ex vitro*), eliminando as custosas e demoradas etapas de aclimação em casa de vegetação (RIHAN et al., 2017). Protocolos bem-sucedidos de conversão *ex vitro* já foram estabelecidos para culturas como a cana-de-açúcar (SILVA et al., 2018; PITALOKA; WIDODO; HARTONO, 2021). O êxito desta etapa está intrinsecamente ligado às propriedades físico-químicas da matriz de encapsulamento, que deve conciliar duas funções antagônicas: fornecer proteção mecânica e estabilidade microbiológica ao propágulo durante o armazenamento e transporte, e permitir uma germinação rápida e sincronizada com mínimo esforço para a emergência da plântula (KAUR et al., 2019).

O biopolímero mais amplamente utilizado para este fim é o alginato de sódio, um polissacarídeo natural extraído de algas marinhas, que forma hidrogéis estáveis e biocompatíveis através de reticulação iônica com cátions divalentes, como o Ca^{2+} (COLIVET; CARVALHO, 2017; DONATI; CHRISTENSEN, 2023). A arquitetura da rede de hidrogel, determinada pela concentração de alginato, natureza e concentração do agente reticulador, e tempo de gelificação, governa propriedades fundamentais como módulo de elasticidade, porosidade, permeabilidade à água e aos gases, e taxa de degradação (BUSTAMANTE-

TORRES et al., 2021; JI et al., 2022). Portanto, a otimização da formulação é essencial para superar a dualidade entre robustez mecânica e permeabilidade fisiológica, um desafio central no desenvolvimento de sementes sintéticas (MICHELI; REGNI; DA SILVA, 2022).

Estratégias para modular essas propriedades incluem a formulação de compósitos poliméricos, como a combinação de alginato com amidos, que podem atuar como cargas acessórias, modificadores de viscosidade ou fontes de carbono de liberação lenta (IQBAL et al., 2019). Da mesma forma, a escolha do agente reticulador, cloreto de cálcio (CaCl_2) ou hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), influencia a cinética de gelificação, a homogeneidade da rede e a liberação de íons cálcio, afetando diretamente a fisiologia do propágulo encapsulado (SCANAVACA JÚNIOR; CARVALHO; SOUSA, 2007; LÓPEZ-SANTIAGO; CASTILLO, 2025). A incorporação de bioativos, como reguladores de crescimento ou agentes de enraizamento, dentro da matriz polimérica transforma a cápsula em um sistema de liberação inteligente, potencializando o vigor e a taxa de estabelecimento das plântulas (NANDA et al., 2025).

O presente estudo teve como objetivo desenvolver e caracterizar filmes poliméricos à base de alginato de sódio, amido e diferentes agentes reticuladores (CaCl_2 e Ca(OH)_2), e aplicar a formulação otimizada no encapsulamento de gemas maduras de mandioca. Buscou-se avaliar as propriedades físico-mecânicas das cápsulas e a resposta fisiológica dos propágulos encapsulados quanto à taxa de germinação e ao vigor inicial *ex vitro*, visando estabelecer uma base técnica robusta para a produção de sementes sintéticas como ferramenta biotecnológica para acelerar o ciclo de melhoramento e a multiplicação clonal desta cultura de grande importância global.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Produção de filmes poliméricos e delineamento experimental

Para o desenvolvimento de sementes sintéticas, adotamos uma estratégia experimental bifásica e complementar. A Fase 1 consistiu na produção e caracterização físico-química de filmes poliméricos modelo, permitindo a avaliação intrínseca e isolada das propriedades da matriz de encapsulamento. A

Fase 2 compreendeu a aplicação biotecnológica dessas formulações no encapsulamento de gemas de mandioca e a subsequente avaliação agrônômica. Esta abordagem dissocia os efeitos das propriedades materiais da matriz (Fase 1) da resposta fisiológica do propágulo (Fase 2), identificando relações de causa e efeito cruciais para a otimização do sistema.

2.1.1. Formulação e produção de filmes poliméricos

A produção e caracterização dos filmes foram conduzidas em um delineamento inteiramente casualizado (DIC). Foram avaliados 12 tratamentos (Tabela 1), incluindo 10 combinações de alginato de sódio (0,8 a 6% m/v) com dois agentes de reticulação iônica (cloreto de cálcio - CaCl_2 e hidróxido de cálcio - Ca(OH)_2 , ambos a 10% m/v), um tratamento à base de amido de milho (10% m/v) e um controle negativo. Cada tratamento foi replicado quatro vezes, sendo a unidade experimental composta por cinco placas de Petri (100 x 15 mm), totalizando 240 unidades experimentais.

Para cada repetição, 10 mL da solução de alginato de sódio na concentração designada foram depositados homoganeamente no fundo de placas de Petri estéreis, utilizando uma micropipeta de precisão. A gelificação foi induzida pela adição lenta e uniforme de 10 mL da solução do agente reticulador (CaCl_2 ou Ca(OH)_2 a 10%). As placas foram imediatamente transferidas para uma mesa agitadora orbital e mantidas a 90 rpm por 5 minutos, assegurando uma difusão iônica homogênea e a formação de um hidrogel com espessura constante, conforme princípios estabelecidos para a reticulação de alginatos (DRAGET et al., 2009). Os géis formados foram lavados sequencialmente por três vezes com água destilada ultra pura (Milli-Q®) para remover íons excedentes e polímero não reticulado. Em seguida, foram desidratados em estufa com circulação de ar a 35 ± 1 °C por 16 horas. Finalmente, os filmes foram acondicionados em uma câmara do tipo B.O.D. a 27 ± 1 °C e $56 \pm 5\%$ de umidade relativa por 72 horas, para equalização da umidade residual e estabilização das propriedades mecânicas antes das análises, seguindo práticas padronizadas para biomateriais (ASTM D882-18, 2018).

Tabela 1. Formulações experimentais para produção de filmes poliméricos e sementes sintéticas.

Tratamento (T)	Descrição da Formulação (Concentrações % m/v)
T1	Alginato de Sódio 0.8% + Cloreto de Cálcio 10%
T2	Alginato de Sódio 1.0% + Cloreto de Cálcio 10%
T3	Alginato de Sódio 2.0% + Cloreto de Cálcio 10%
T4	Alginato de Sódio 4.0% + Cloreto de Cálcio 10%
T5	Alginato de Sódio 6.0% + Cloreto de Cálcio 10%
T6	Alginato de Sódio 0.8% + Hidróxido de Cálcio 10%
T7	Alginato de Sódio 1.0% + Hidróxido de Cálcio 10%
T8	Alginato de Sódio 2.0% + Hidróxido de Cálcio 10%
T9	Alginato de Sódio 4.0% + Hidróxido de Cálcio 10%
T10	Alginato de Sódio 6.0% + Hidróxido de Cálcio 10%
T11	Amido de Milho (Maizena®) 10%
T12	Controle (Gema não encapsulada)

2.1.2. Caracterização físico-química dos filmes poliméricos

A caracterização dos filmes visou prever seu desempenho funcional como matriz de encapsulamento. Os parâmetros avaliados, seus fundamentos e metodologias são detalhados na Tabela 2:

Tabela 2. Parâmetros e metodologias para caracterização de filmes poliméricos.

Variável	Sigla / Unidade	Procedimento analítico
Aspecto Visual	–	Avaliação qualitativa de homogeneidade, transparência, presença de defeitos (bolhas, fissuras), flexibilidade ao dobrar manualmente em 180°, e integridade ao manuseio.
Teor de umidade	TU (%)	Indica o conteúdo de água livre após condicionamento, afetando a estabilidade e a taxa de hidratação inicial. Para isso, discos de 4 cm ² foram secos em estufa a 105 ± 2 °C até massa constante (≈24 h).
Índice de intumescimento	HI (%)	Mede a capacidade do hidrogel de absorver água e inchar, propriedade crítica para a disponibilização hídrica à gema encapsulada no solo. Amostras (2,5 x 2,5 cm) foram imersas em 50 mL de água destilada a 25 °C por 40 min. Após secagem superficial com papel filtro, pesou-se o peso final.

Variável	Sigla / Unidade	Procedimento analítico
Biodegradabilidade em substrato	BD (%)	Avalia a taxa de degradação da matriz no solo, determinando a janela de tempo de proteção física ao propágulo. Para isso, filmes desidratados (4 cm ²) foram acondicionados em sacos de rede de náilon e enterrados a 2 cm de profundidade em substrato úmido (capacidade de campo a 70%), mantido a 27 °C por 15 dias.
Solubilidade em água	em S (%)	Quantifica a fração solúvel da matriz, refletindo a estabilidade da rede polimérica reticulada em meio aquoso. Amostras secas (2,7 cm ²) foram imersas em 50 mL de água destilada sob agitação orbital (130 rpm) a 25 °C por 24 h. O resíduo insolúvel foi filtrado (membrana de 0,45 µm), seco a 105 °C e em seguida pesado.

2.2. Produção e avaliação de sementes sintéticas de mandioca

2.2.1. Material vegetal e preparação do explante

Foram utilizadas gemas axilares maduras da cultivar de mandioca BRS Novo Horizonte, selecionada por seu ciclo precoce, alto potencial produtivo e ampla adaptação, características que a tornam um modelo genético relevante. As gemas foram coletadas do terço médio de hastes lignificadas de plantas-matrizes com 10–12 meses de idade, cultivadas sob condições padronizadas na Estação Experimental da Embrapa. Esta região da haste é reconhecida por apresentar gemas com maior vigor fisiológico e reservas energéticas. As hastes foram seccionadas com uma serra circular de precisão para obter segmentos uninodais com comprimento padronizado de $2,5 \pm 0,1$ cm (Figura 1). Após o corte, os explantes foram submetidos a desinfestação superficial por imersão em solução de amônia quaternária (Benzalcônio) a 0,2% (v/v) por 10 minutos, seguida de três enxágues estéreis em água destilada e secagem à sombra em ambiente laminar por 10 minutos.

O ensaio biológico foi conduzido em delineamento em blocos casualizados (DBC), apropriado para controlar gradientes ambientais como luz e umidade dentro da casa de vegetação. Os 12 tratamentos da Tabela 1 foram arranjados em quatro blocos (repetições). Cada unidade experimental consistiu em um vaso plástico de 4 L contendo quatro sementes sintéticas, totalizando 48 vasos (12 tratamentos × 4 blocos) e 192 sementes sintéticas avaliadas. Os

tratamentos T4 e T5 (alginato 4% e 6% + CaCl_2) não induziram a brotação, indicando possível fitotoxicidade ou barreira física intransponível. Conseqüentemente, foram excluídos das análises estatísticas dos parâmetros agrônômicos, restando 10 tratamentos válidos. Os vasos foram preenchidos com substrato inerte (areia lavada:vermiculita, proporção 3:1 v/v) e mantidos em casa de vegetação com temperatura controlada (25–27 °C), fotoperíodo natural e irrigação automatizada por microaspersão (cinco ciclos diários de 5 min cada).

Figura 1. Processo de obtenção e padronização de gemas axilares maduras da cultivar BRS Novo Horizonte. Corte de precisão com serra circular para obtenção de segmentos uninodais padronizados (2,5 cm) prontos para o processo de encapsulamento.



2.2.2. Protocolo de produção das sementes sintéticas

O encapsulamento foi baseado na técnica de gelificação iônica externa, que consistiu na preparação das soluções de alginato de sódio em água destilada nas concentrações da Tabela 1, sob agitação magnética até completa dissolução e desaeração. Os géis de CaCl_2 e Ca(OH)_2 a 10% foram preparados similamente. O gel de amido (T11) foi preparado por gelatinização a 85 °C e resfriado a 25 °C.

Para o encapsulamento, as gemas dos tratamentos T1-T10 foram imersas na solução de alginato por 3 min para revestimento completo. Em seguida, foram transferidas individualmente para o banho de reticulação (CaCl_2 ou Ca(OH)_2) por 5 min, permitindo a formação do hidrogel de alginato de cálcio ("modelo egg-box"). Para o T11, as gemas foram imersas no gel de amido por 3 min. O controle (T12) foi imerso em água. No pós-processamento, as cápsulas (T1-T10) foram lavadas três vezes em água para remover excesso de íons e secas à sombra por 1 h. As gemas de todos os tratamentos foram então plantadas imediatamente em baldes

de 4 L, no esquema de quatro sementes por balde, contendo substrato de areia e vermiculita na proporção de 3:1, em casa de vegetação sob irrigação controlada.

2.2.3. Parâmetros agrônômicos avaliados

A avaliação do desempenho das sementes sintéticas foi realizada aos 20 dias após o plantio (DAP) para parâmetros de estabelecimento e vigor inicial, e aos 30 DAP para parâmetros de biomassa e crescimento consolidado (Tabela 3).

Tabela 3. Características morfológicas medidas em plântulas de mandioca oriundas de sementes sintéticas

Característica	Sigla	Unidade	Descrição / Critério de Avaliação
Taxa de estabelecimento	Stand	%	Porcentagem de gemas que emitiram broto \geq 1 cm de comprimento por unidade experimental
Diâmetro do caule	DC	cm	Diâmetro do caule na base da planta, medido com paquímetro digital ($\pm 0,01$ mm). Escala: 1 (plântula atrofiada / necrosada); 3 (crescimento moderado, 1-2 folhas); 5 (plântula vigorosa, ≥ 3 folhas expandidas, caule espesso).
Índice de vigor visual	StVig	1–5	
Altura da planta	PH	cm	Distância do colo ao ápice do broto principal.
Massa fresca da parte aérea	SFW	g	Biomassa aérea fresca total por vaso.
Massa seca da parte aérea	SDW	g	SFW seca em estufa de ventilação forçada a 60 ± 2 °C até massa constante.
Massa fresca do sistema radicular	RFW	g	Biomassa radicular fresca total por vaso, cuidadosamente lavada.
Massa seca do sistema radicular	RDW	g	RFW seca em estufa a 60 ± 2 °C até massa constante.

2.3. Análise dos dados

Todas as análises foram realizadas no ambiente estatístico R (R Development Core Team, 2025). Tanto para a Fase I (filmes, CRD) quanto para a Fase II (bioensaio, RCBD), as premissas da análise de variância (ANOVA), incluindo homocedasticidade (teste de Levene) e normalidade dos resíduos (teste de Shapiro-Wilk), foram verificadas. Para cada variável de resposta, foi realizada uma ANOVA e, quando um efeito significativo do tratamento foi detectado ($p \leq 0,05$), as médias dos tratamentos foram agrupadas utilizando o teste de agrupamento de Scott-Knott ($\alpha = 0,05$). As análises estatísticas foram conduzidas

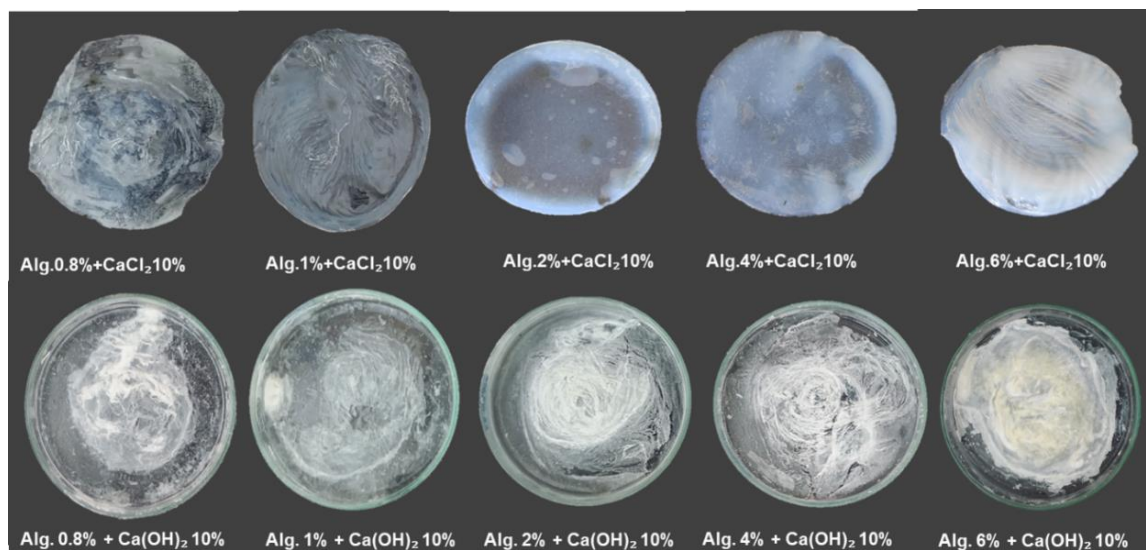
utilizando o pacote ScottKnott (Jelihovschi et al., 2014) e as representações gráficas foram geradas utilizando o pacote ggplot2 (Kassambara, 2022).

3. RESULTADOS

3.1. Caracterização físico-funcional de matrizes de alginato reticuladas com CaCl_2

A formação e as propriedades de filmes poliméricos para encapsulamento são determinadas pela interação entre a concentração do biopolímero e a eficiência do agente reticulante. Neste estudo, filmes à base de alginato de sódio nas concentrações de 0,8%, 1%, 2%, 4% e 6% foram reticulados com CaCl_2 . Formulações alternativas utilizando hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) como agente de *crosslinking* não geraram filmes contínuos, apresentando-se visualmente opacos, quebradiços e com total aderência ao substrato, o que inviabilizou sua caracterização físico-mecânica (Figura 2). Portanto, as análises subsequentes concentraram-se exclusivamente nas matrizes reticuladas com CaCl_2 , que exibiram integridade, uniformidade superficial e desmoldagem adequadas.

Figura 2. Aparência e estabilidade estrutural dos filmes de alginato de sódio em função da concentração e exposição aos reticulantes, cloreto de cálcio (CaCl_2), e hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2).



3.1.1. Umidade dos filmes

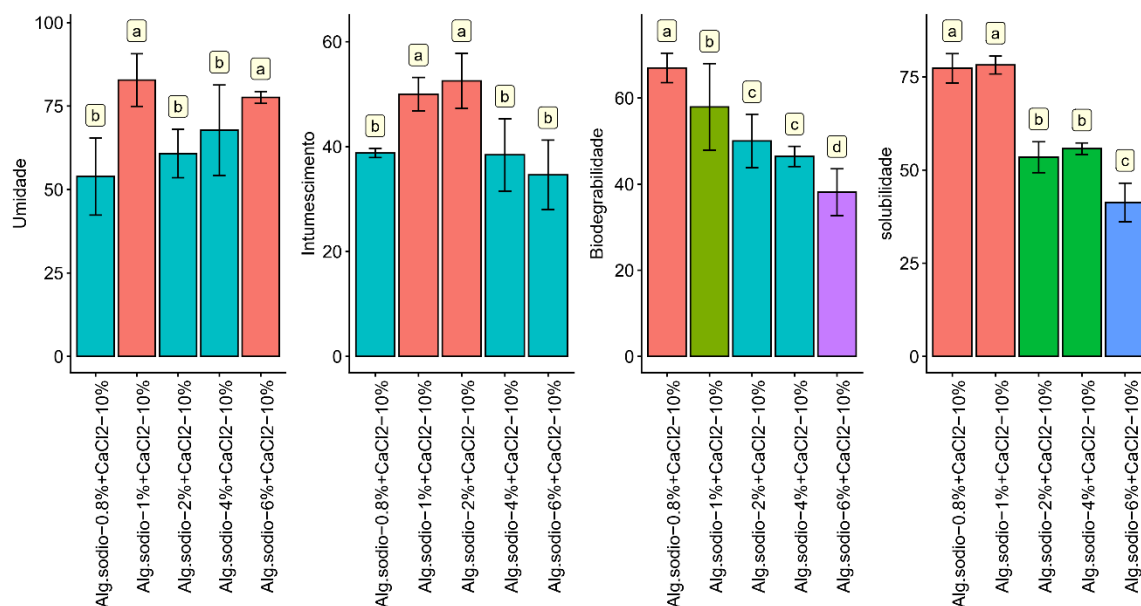
O teor de umidade, parâmetro crítico que influencia a permeabilidade e a taxa de degradação da matriz, variou significativamente ($p \leq 0,05$) entre as diferentes concentrações de alginato (Tabela 4). O valor máximo foi observado no filme com 1% de alginato (82,8%), seguido pelos de 6% (77,58%) e 4% (67,76%). As concentrações de 2% e 0,8% resultaram nos menores teores de umidade (60,78% e 53,86%, respectivamente) (Figura 3). A retenção de água em hidrogéis de alginato é função direta da densidade de grupos carboxílicos livres e do grau de reticulação da rede. A ausência de uma relação linear entre concentração e umidade sugere um equilíbrio complexo, pois concentrações muito baixas limitam os sítios hidrofílicos, enquanto redes excessivamente densas (altas concentrações) podem restringir fisicamente a absorção e retenção de água no interior da matriz.

Tabela 4. ANOVA dos parâmetros físicos e funcionais dos filmes para sementes sintéticas de mandioca.

FV	GL	UMD	INT	BIO	SLD
Tratamento	4	4,02*	1,03ns	4,68**	22,64***
Resíduo	20	325,11	320,98	97,09	47,85
CV (%)		29,62	55,31	19,82	11,73

*= $p \leq 0.05$; ns = não significativo; **= $p \leq 0.01$; ***= $p \leq 0.001$. UMD- Solubilidade; INT- Intumescimento/hidratação; BIO- Biodegradabilidade; SLD- Solubilidade.

Figura 3 Influência da concentração de alginato na umidade, intumescimento, biodegradabilidade e solubilidade de filmes reticulados com cloreto de cálcio.



Médias seguidas pela mesma letra pertencem ao mesmo grupo pelo critério de agrupamento de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

3.1.2. Índice de Intumescimento

A capacidade de inchamento, que reflete o potencial de hidratação e expansão da matriz em meio aquoso, também apresentou diferenças estatisticamente significativas ($p \leq 0,05$, Tabela 4). Os filmes com concentrações intermediárias de 2% e 1% exibiram os maiores índices de intumescimento (52,52% e 50,0%, respectivamente). Em contraste, os filmes com 0,8%, 4% e 6% apresentaram menor capacidade de absorção de água (38,78%, 38,42% e 34,60%, respectivamente) (Figura 3). Esses resultados indicam que concentrações intermediárias de alginato favorecem maior hidratação da matriz, resultando em filmes mais permeáveis e flexíveis. Por outro lado, concentrações muito baixas ou muito altas produzem estruturas menos hidratáveis, seja pela baixa disponibilidade de grupos hidrofílicos (0,8%), seja pela formação de redes poliméricas excessivamente densas (4% e 6%).

3.1.3. Biodegradabilidade

A biodegradabilidade, avaliada pela perda de massa da matriz em condições biológicas ativas, demonstrou uma dependência clara da concentração do polímero ($p \leq 0,01$). Uma maior taxa de degradação foi observada para os

filmes menos concentrados: 0,8% (66,98%), 1% (57,92%) e 2% (50,02%). As formulações com 4% e 6% de alginato mostraram-se significativamente mais resistentes à degradação, com índices de 46,42% e 38,12%, respectivamente (Figura 3). Esses resultados indicam que filmes mais diluídos apresentam maior tendência à degradação, favorecendo a ruptura da matriz e, conseqüentemente, a germinação da gema. Em contrapartida, concentrações mais elevadas formam filmes mais estáveis e resistentes, o que pode dificultar a emergência da plântula e explicar a baixa ou nula germinação observada nas formulações com 4% e 6% de alginato.

3.1.4. Solubilidade em água

A solubilidade da matriz encapsulante em água é um parâmetro funcional importante, pois determina a cinética de liberação da gema e sua exposição ao meio germinativo. A análise de variância revelou o efeito mais pronunciado e altamente significativo ($p \leq 0,001$; CV = 6,00%) da concentração de alginato sobre este parâmetro (Tabela 4). Os filmes formulados com 1% e 0,8% de alginato exibiram os maiores percentuais de solubilidade, atingindo 78,2% e 77,28%, respectivamente. Em contraste, um declínio acentuado foi observado nas concentrações superiores, com valores de 53,42% para 2%, 55,72% para 4% e 41,3% para 6% de alginato (Figura 3).

A baixa disponibilidade de polímero compromete a formação de uma rede tridimensional contínua; assim, o filme tende a inchar, romper-se e liberar fragmentos, mas parte desses fragmentos permanece insolúvel, reduzindo o valor final de solubilidade medido. Dessa forma, filmes extremamente diluídos podem ser mais frágeis, porém apresentar menor dissolução total, enquanto a concentração de 1% fornece uma matriz suficientemente coesa para garantir uma solubilização mais completa.

3.2. Efeito das formulações de encapsulamento na germinação e no desempenho agrônômico inicial

A avaliação do sucesso da tecnologia de sementes artificiais reside na capacidade do hidrogel de proteger a unidade propagativa sem comprometer sua viabilidade fisiológica. A ANOVA indicou um efeito altamente significativo ($p < 0,001$) de todas as formulações encapsulantes sobre as variáveis

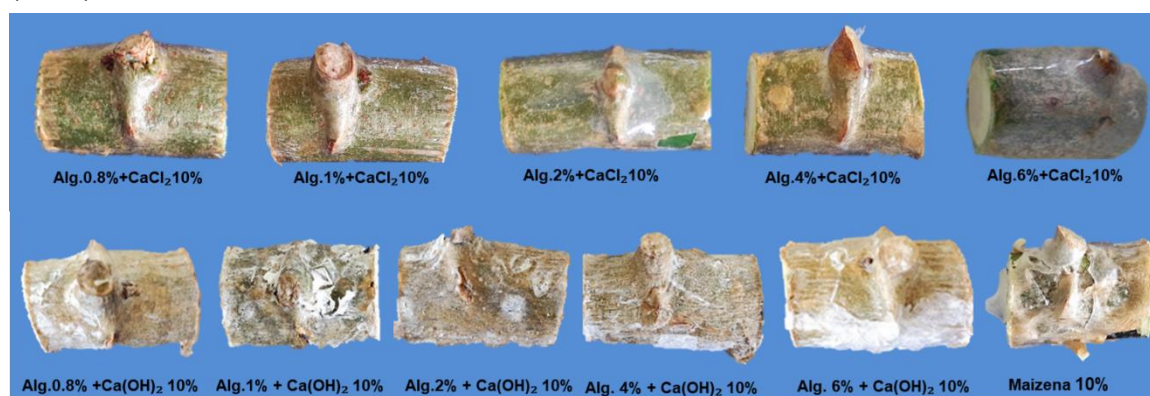
morfofisiológicas analisadas (Tabela 5), demonstrando que as propriedades da matriz exercem influência direta e mensurável desde a germinação até o estabelecimento inicial da plântula. A Figura 4 ilustra o encapsulamento das gemas únicas de mandioca, permitindo observar a integridade e a uniformidade das sementes sintéticas produzidas para cada tratamento.

Tabela 5. Análises de variância para as características morfológicas em gemas únicas de mandioca submetidas a diferentes formulações de encapsulamento.

FV	GL	Germ	AP	DC	Vigor	PFR	PSR	PFPA	PSPA	IQD
Tratamento	9	3513,30***	23,46***	0,94***	0,86*	16,74***	0,41***	446,32***	17,82***	0,23***
Bloco	3	484,50 ^{ns}	2,20 ^{ns}	0,59*	0,14 ^{ns}	2,62 ^{ns}	0,04 ^{ns}	120,23*	4,22*	0,03 ^{ns}
Resíduo	24	318,10	4,52	0,19	0,28	1,64	0,03	36,18	1,26	0,02
CV (%)		39,33	24,7	15	17,33	45,2	41,2	47,9	48,11	41,8

ns = não significativo; * = $p < 0,05$; ** = $p < 0,01$; *** = $p < 0,001$. Germ= Germinação; AP= Altura da Planta; DC= Diâmetro do caule; PFPA = peso fresco da parte aérea; PSPA = peso seco da parte aérea; PFRA = peso fresco de raízes; PSRA = peso seco de raízes.

Figura 4. Gemas maduras encapsuladas com alginato de sódio (0,8; 1; 2; 4 e 6%), reticulada com cloreto de cálcio (10%), hidróxido de cálcio (10%) e amido de milho (10%), no desenvolvimento de sementes sintéticas de mandioca.

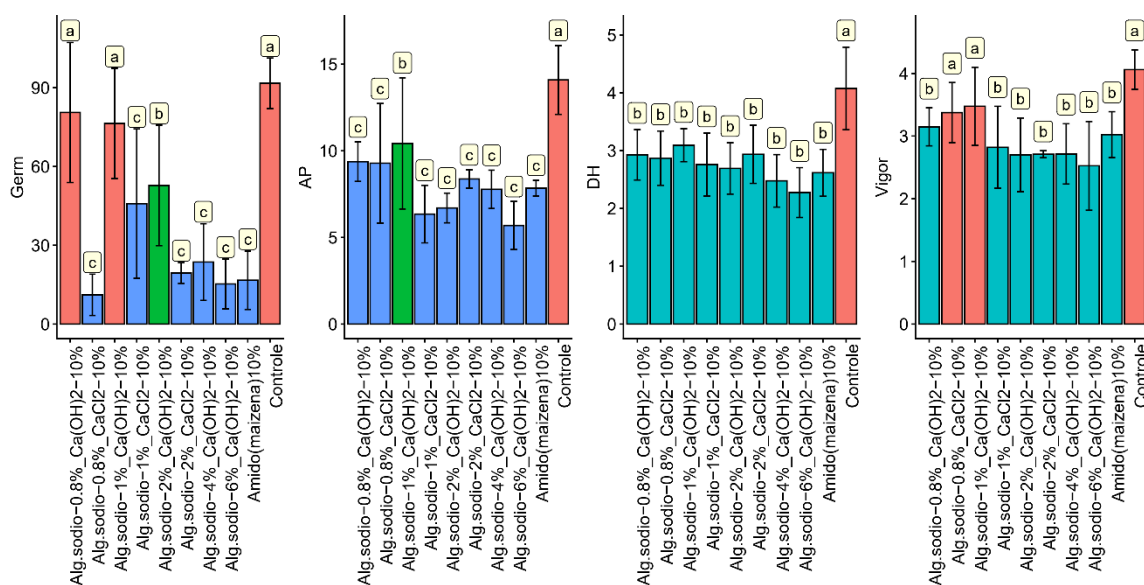


Aos 20 dias após a semeadura, observou-se um efeito pronunciado na taxa de germinação, intimamente ligado ao agente reticulante e à concentração de alginato (Figura 5). O tratamento-controle (gema não encapsulada) atingiu a máxima germinação (91,7%). Entre as sementes sintéticas, as formulações reticuladas com Ca(OH)_2 associadas a baixas concentrações de polímero destacaram-se, com Alg 0,8% + Ca(OH)_2 e Alg 1% + Ca(OH)_2 alcançando 80,6% e 76,4% de germinação, respectivamente. Em marcante contraste, as

formulações reticuladas com CaCl_2 inibiram drasticamente o processo, sendo Alg 0,8% + CaCl_2 a menos eficaz (11,1%). Concentrações de alginato iguais ou superiores a 4% suprimiram completamente a germinação, independentemente do reticulante.

O vigor das plântulas, um parâmetro que integra uniformidade e rapidez de desenvolvimento, refletiu a mesma tendência. Os valores mais elevados foram verificados no controle (4,06), seguido por Alg 1% + Ca(OH)_2 (3,48) e Alg 0,8% + CaCl_2 (3,38), enquanto as demais formulações apresentaram vigor significativamente reduzido (Figura 5).

Figura 5. Efeito de formulações encapsulantes na germinação, crescimento (altura da planta e diâmetro do caule) e vigor de gemas maduras de mandioca.



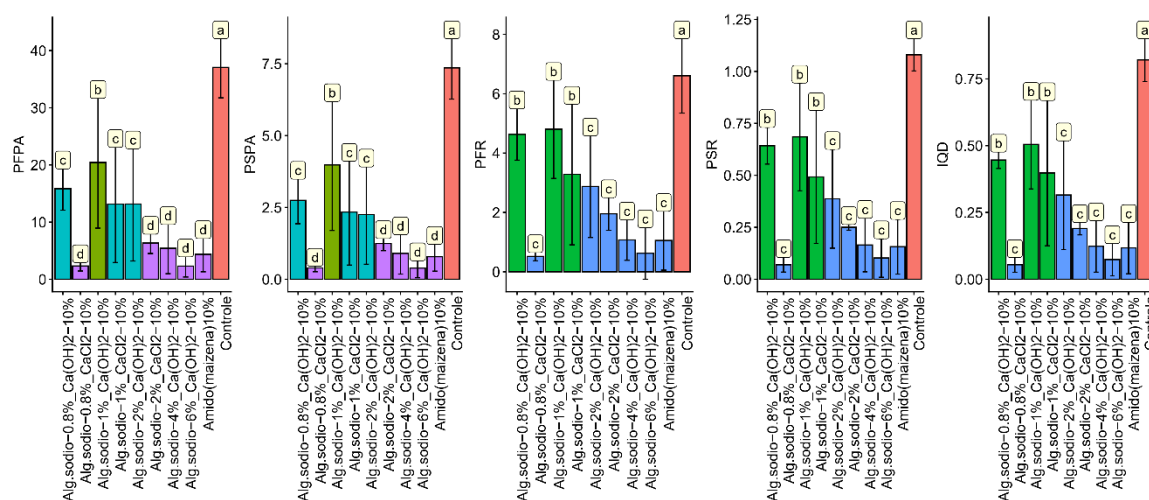
Médias seguidas pela mesma letra pertencem ao mesmo grupo pelo critério de agrupamento de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

O crescimento pós-germinativo, avaliado pela altura da planta e diâmetro do caule, foi bastante modulado pelo encapsulamento (Figura 5). Como esperado, o controle exibiu os valores máximos (14,09 cm de altura e 4,08 mm de diâmetro). As formulações sintéticas que permitiram germinação, notadamente Alg 1% + Ca(OH)_2 e Alg 0,8% + Ca(OH)_2 , produziram plântulas com desenvolvimento inferior, porém mais robusto, com alturas de 10,43 cm e 9,37 cm, e diâmetros de 3,10 mm e 2,93 mm, respectivamente. O tratamento Alg. 0,8% + CaCl_2 10% proporcionou altura de planta de 9,28 cm. A restrição ao crescimento observada

mesmo nas melhores formulações sugere um custo energético associado à emergência através da matriz ou uma modulação inicial no transporte de água e nutrientes. O vigor das plântulas variou significativamente entre os tratamentos ($p = 0,021$). O controle (4,06), seguido de Alg. 1% + $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 10% (3,48) e Alg. 0,8% + CaCl_2 10% (3,38) apresentaram os maiores valores (Figura 5). Os demais tratamentos apresentaram vigor inferior, variando entre 2,52 e 3,15.

Em relação à produção de biomassa, parâmetro que reflete a eficiência fotossintética e a capacidade de absorção radicular, confirmou a superioridade do controle e o gradiente de desempenho das formulações (Figura 6). A massa fresca da parte aérea (PFPA) do controle foi de 37,06 g. As formulações com $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e baixo teor de alginato produziram os melhores resultados entre os encapsulados, como Alg 1% + $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (20,44 g) e Alg 0,8% + $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (15,84 g). Em contraste, formulações com CaCl_2 (Alg 2% + CaCl_2 : 6,34 g) ou com altas concentrações de alginato (Alg 6% + $\text{Ca}(\text{OH})_2$: 2,30 g) resultaram em uma redução drástica, frequentemente abaixo de 25% do controle.

Figura 6. Efeito de diferentes formulações encapsulantes em características associadas à produção de biomassa da parte aérea e raízes em gemas maduras de mandioca.



Médias seguidas pela mesma letra pertencem ao mesmo grupo pelo critério de agrupamento de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

O sistema radicular seguiu padrão idêntico, sendo que a massa fresca de raízes (PFR) do controle foi de 6,61 g, enquanto as melhores formulações sintéticas atingiram valores próximos a 4,8 g. As formulações com CaCl_2

produziram os sistemas radiculares menos desenvolvidos (e.g., Alg 2% + CaCl₂: 1,95 g). A massa seca, tanto da parte aérea (PSPA) quanto das raízes (PSR), reforçou este padrão, indicando que o efeito não se deve apenas a diferenças no teor de água, mas no acúmulo real de matéria orgânica (Figura 6).

O Índice de Qualidade de Dickson (IQD), um indicador que relaciona a biomassa total com o equilíbrio entre a parte aérea e o sistema radicular (robustez), sintetizou bem o desempenho das plântulas (Figura 6). O controle apresentou o maior IQD (0,82). Entre as sementes sintéticas, os índices mais elevados foram observados para Alg 1% + Ca(OH)₂ (0,50), Alg 0,8% + Ca(OH)₂ (0,45) e Alg 1% + CaCl₂ (0,39). Formulações com altas concentrações de alginato produziram plântulas de qualidade inferior, com IQDs frequentemente inferiores a 0,19. Matrizes muito rígidas ou pouco permeáveis não apenas comprometem a germinação, mas também prejudicam o desenvolvimento inicial, resultando em plântulas com menor massa seca total e menor relação entre a robustez e o crescimento, características que podem impactar negativamente seu estabelecimento em condições de campo.

4. DISCUSSÃO

4.1. Interação entre matriz polimérica, cinética de reticulação iônica e desempenho fisiológico das sementes sintéticas de mandioca

Os resultados obtidos demonstram que o desempenho fisiológico das sementes sintéticas de mandioca é resultado direto da interação entre a arquitetura físico-química da matriz de encapsulamento, a cinética de liberação e difusão dos íons Ca²⁺ e a organização espacial das cadeias de alginato durante o processo de gelificação. Esses fatores definem simultaneamente a integridade estrutural da cápsula e a permissividade fisiológica necessária para a emergência e o estabelecimento inicial das plântulas, corroborando o modelo clássico de reticulação iônica do alginato descrito por Grant et al. (1973) e revisitado à luz de evidências experimentais recentes (BESIRI et al., 2023).

No contexto das sementes sintéticas, a matriz encapsulante atua como um microambiente artificial que precisa atender a demandas contraditórias, ou seja, fornecer proteção mecânica adequada ao propágulo durante o manuseio e, ao mesmo tempo, permitir rápida hidratação, difusão gasosa e expansão celular.

Estudos recentes indicam que pequenas variações na densidade de reticulação e no tamanho médio de poros do gel resultam em diferenças expressivas na emergência e no vigor inicial, especialmente em espécies propagadas vegetativamente (BUSTAMANTE-TORRES et al., 2021; DUTRA et al., 2024). Essa sensibilidade estrutural foi claramente observada no presente estudo, no qual ajustes relativamente modestos na concentração de alginato e na fonte de Ca^{2+} resultaram em respostas fisiológicas contrastantes.

O alginato permanece como um dos biopolímeros mais utilizados em sistemas de sementes sintéticas devido à sua elevada biocompatibilidade, baixa toxicidade e capacidade de gelificação sob condições suaves (LEE; MOONEY, 2012). Entretanto, seu comportamento funcional depende criticamente da cinética de reticulação, que é fortemente influenciada pela solubilidade e mobilidade do sal de cálcio empregado. Diferentes fontes de Ca^{2+} originam redes com graus distintos de rigidez, porosidade, heterogeneidade estrutural e estabilidade temporal (KAUR et al., 2019). Nesse sentido, Sarker et al. (2018), destacam que, embora o alginato seja altamente eficiente como matriz encapsulante, a escolha da fonte de Ca^{2+} é determinante para o sucesso biológico do sistema.

Essa dependência estrutural reflete-se diretamente na fisiologia da mandioca, cujo estabelecimento inicial, seja por gemas, brotações ou estacas, requer microcondições permissivas de umidade, oxigenação e baixa resistência mecânica (CAVALIERI POLIZELI et al., 2024). Esse padrão é amplamente reconhecido na literatura de sementes sintéticas, que demonstra que pequenas variações na formulação da matriz alteram profundamente a difusão hídrica, a permeabilidade gasosa e a resistência mecânica do gel (PATEL et al., 2000; FAISAL; ALATAR, 2019; KAUR et al., 2019; SAHU et al., 2025).

No presente estudo, formulações com menores concentrações de alginato e cloreto de cálcio resultaram em matrizes mais solúveis, biodegradáveis e com maior capacidade de intumescimento. Essas características favoreceram a hidratação inicial e reduziram a oposição física ao crescimento radicular, efeito semelhante ao relatado em sistemas encapsulados de *Plumbago rosea* L., batata (*Solanum tuberosum* L.) e outras espécies vegetais (GHANBARALI et al., 2016; PRAKASH et al., 2018; HATZILAZAROU et al., 2021). Entretanto, filmes preparados com 0,8% de alginato apresentaram película excessivamente fina e elevada fragilidade, comprometendo sua aplicabilidade tecnológica. Em contraste,

concentrações mais elevadas de alginato originaram filmes densos, pouco solúveis e rigidamente reticulados, reforçando o papel do Ca^{2+} na formação de redes compactas do tipo *egg-box*. Essas redes altamente rígidas restringem a difusão de água e dificultam a emergência das brotações, fenômeno amplamente documentado em sistemas encapsulados reticulados com CaCl_2 (IQBAL et al., 2019; DUTRA et al., 2024). A ausência completa de germinação nas maiores concentrações confirma que a mandioca é particularmente sensível a barreiras mecânicas impostas pela matriz, exigindo microambientes mais leves e hidratados para que o tecido meristemático consiga romper o filme encapsulante.

Dessa forma, a formulação contendo 1% de alginato e cloreto de cálcio configurou-se como o ponto ótimo entre integridade física e permissividade fisiológica, garantindo estabilidade estrutural suficiente para manipulação e, simultaneamente, condições adequadas para o alongamento celular e a brotação das gemas. Esse equilíbrio já foi destacado como essencial para o sucesso da tecnologia de sementes sintéticas em diferentes espécies vegetais (PRAKASH et al., 2018; DUTRA et al., 2024). Em geral, os resultados reforçam que a tecnologia de sementes sintéticas não deve ser tratada como um sistema estático, mas como um sistema dinâmico e responsivo, no qual a matriz evolui estruturalmente ao longo do tempo em resposta à hidratação, à atividade microbiana e ao crescimento do propágulo. Essa perspectiva dinâmica é particularmente relevante para a mandioca, cuja fisiologia inicial depende fortemente de microambientes permissivos, com elevada disponibilidade hídrica e baixa resistência mecânica (CAVALIERI POLIZELI et al., 2024; FAISAL; ALATAR, 2019).

4.2. Propriedades físico-funcionais das matrizes e implicações na emergência das gemas

Os dados de intumescimento, solubilidade e biodegradabilidade demonstram que matrizes formuladas com menores concentrações de alginato e Ca^{2+} apresentam maior mobilidade estrutural, favorecendo a rápida absorção de água e a redução da resistência física à protrusão radicular. Esse comportamento é consistente com observações feitas em sementes sintéticas de *Plumbago rosea*, *Solanum tuberosum* e *Gardenia jasminoides*, nas quais matrizes mais hidratáveis e menos densas promoveram maior taxa de emergência e vigor inicial

(GHANBARALI et al., 2016; PRAKASH et al., 2018; HATZILAZAROU et al., 2021). Por outro lado, concentrações elevadas de alginato e CaCl_2 resultaram em matrizes densas, pouco solúveis e com reduzida biodegradabilidade, indicando a formação de redes fortemente reticuladas. Essa condição, embora tecnologicamente desejável para transporte e armazenamento, mostrou-se biologicamente restritiva. Estudos de difusão em hidrogéis de alginato demonstram que o aumento da densidade de crosslinks reduz drasticamente a permeabilidade a água e oxigênio, criando microambientes hipóxicos e limitantes à respiração celular (DRAGET, 2009; SANCHEZ-BALLESTER et al., 2021).

A ausência de germinação observada nas formulações mais rígidas confirma que a mandioca é particularmente sensível a barreiras mecânicas iniciais. Esse comportamento já foi descrito em estudos de estabelecimento de estacas e brotações, nos quais solos compactados ou com baixa macroporosidade reduzem significativamente o enraizamento e o vigor inicial (SCHOFFEL et al., 2021).

4.3. A dicotomia do agente reticulante: CaCl_2 versus Ca(OH)_2

Um dos achados centrais deste estudo foi a divergência marcante entre cápsulas reticuladas com CaCl_2 e aquelas formadas com Ca(OH)_2 , mesmo sob concentrações equivalentes de alginato. O CaCl_2 , por sua elevada solubilidade, promove uma gelificação rápida por difusão externa, resultando na formação de uma camada superficial densamente reticulada, frequentemente descrita como *skin layer*. Essa estrutura cria um gradiente mecânico entre a superfície e o interior da cápsula, fenômeno amplamente documentado em sistemas de alginato gelificados por imersão (BLANDINO et al., 1999; BESIRI et al., 2023).

Essa camada superficial rígida funciona como a principal barreira à emergência, exigindo forças de ruptura superiores à capacidade de alongamento inicial das gemas de mandioca. Além disso, redes super-reticuladas podem limitar a difusão gasosa, exacerbando estresses hipóxicos no interior da cápsula, como já descrito para hidrogéis classificados como *superstiff* (Ji et al., 2022).

Em contraste, as cápsulas formadas com Ca(OH)_2 apresentaram estrutura frágil, baixa coesão e fácil desintegração, sobretudo nas menores concentrações de alginato. A menor solubilidade do hidróxido e sua liberação

lenta de Ca^{2+} resultam em redes menos densas, com menor número de zonas de junção e maior porosidade. Tal configuração favorece a germinação, o vigor e o desenvolvimento radicular, como também reportado para sistemas com baixa rigidez e elevada deformabilidade (DUTRA et al., 2024). Embora essas cápsulas sejam inadequadas para transporte ou armazenamento, sua elevada permissividade fisiológica evidencia que a eficácia biológica não necessariamente coincide com a estabilidade tecnológica.

Esse comportamento encontra paralelo direto com a fisiologia da mandioca em condições naturais de propagação. Estudos sobre enraizamento de brotos demonstram que a cultura apresenta desempenho inicial superior em microambientes permissivos, com maior difusão hídrica e ausência de barreiras mecânicas. Ambientes com menor densidade física e maior porosidade, associados a adequada disponibilidade hídrica, favorecem significativamente a formação radicular e o vigor das brotações. (SCHOFFEL et al., 2021). Estudos em outras espécies, (*Plumbago rosea* L., *Gardenia jasminoides*, *Daucus carota*, *Solanum tuberosum*), encapsulados com CaCl_2 , demonstram efeito análogo, maior rigidez estrutural limita a emergência inicial, reforçando a consistência interespecies do *trade-off* entre estabilidade mecânica e permissividade fisiológica (PATEL et al., 2000; PRAKASH et al., 2018; IQBAL et al., 2019; HATZILAZAROU et al., 2021).

4.4. Análise dos filmes poliméricos como modelos de encapsulamento de gemas de mandioca

A caracterização dos filmes preparados com as mesmas formulações utilizadas nas cápsulas forneceu informações relevantes sobre o desenvolvimento físico e estrutural das matrizes de encapsulamento. Filmes produzidos com maiores concentrações de alginato e CaCl_2 apresentaram elevada umidade, maior intumescimento, baixa solubilidade e reduzida biodegradabilidade, confirmando a formação de redes poliméricas densas, altamente reticuladas e com baixa mobilidade estrutural (SAHU et al., 2025; LÓPEZ-SANTIAGO; CASTILLO, 2025).

Estudos recentes com filmes e géis biopoliméricos demonstram que variações na composição da matriz influenciam diretamente propriedades-chave

como rigidez, permeabilidade, absorção de água e estabilidade estrutural, reforçando a utilidade desses sistemas bidimensionais como modelos experimentais para prever o comportamento de cápsulas vegetais tridimensionais (LIU et al., 2020; ZHANG et al., 2025). Nesse contexto, os resultados obtidos neste estudo corroboram a hipótese de que os filmes podem ser utilizados como ferramentas preditivas para a avaliação inicial do desempenho estrutural e funcional das matrizes encapsulantes. Por outro lado, filmes formulados com apenas 0,8% de alginato apresentaram-se extremamente finos, altamente solúveis e mecanicamente frágeis, indicando uma rede polimérica insuficientemente estruturada. A forte correspondência observada entre as propriedades físico-funcionais dos filmes e o desempenho fisiológico das cápsulas reforça a aplicabilidade desses modelos para avaliar tendências de intumescimento, estabilidade mecânica e degradação da matriz. Embora a extrapolação direta de sistemas bidimensionais para cápsulas tridimensionais apresente limitações inerentes, a exemplo da ausência de gradientes internos e efeitos de curvatura, os filmes oferecem um referencial experimental robusto para a otimização de formulações e para a compreensão dos efeitos da concentração de polissacarídeos, do grau de reticulação e da presença de aditivos na matriz encapsulante (LIU et al., 2020; SAHU et al., 2025; LÓPEZ-SANTIAGO; CASTILLO, 2025; ZHANG et al., 2025).

4.5. Sensibilidade fisiológica e o custo do encapsulamento

Mesmo nas formulações consideradas mais eficientes, as plântulas oriundas de sementes sintéticas apresentaram desempenho inferior ao do controle não encapsulado, evidenciando a existência de um custo fisiológico associado ao encapsulamento. Esse efeito tem sido amplamente relatado na literatura e pode ser atribuído a múltiplos mecanismos inter-relacionados, incluindo: (i) desvio de energia metabólica para a ruptura ou degradação da matriz polimérica; (ii) atraso na hidratação completa dos tecidos meristemáticos; e (iii) restrições iniciais à difusão de água, nutrientes e oxigênio no microambiente da cápsula (FAISAL; ALATAR, 2019; SAHU et al., 2025).

No caso da mandioca, esse custo é potencializado pela elevada dependência da espécie de um rápido estabelecimento radicular para assegurar

a sobrevivência e o vigor inicial das plântulas. Assim, o principal desafio tecnológico da encapsulação não reside em eliminar completamente esse custo, o que é improvável em sistemas baseados em matrizes poliméricas, mas em minimizá-lo por meio do desenho de matrizes bio-responsivas, capazes de degradar-se, solubilizar-se ou deformar-se de forma sincronizada com o crescimento do propágulo. Essa abordagem permite conciliar proteção inicial e permissividade fisiológica, ampliando o potencial de aplicação das sementes sintéticas de mandioca em sistemas de propagação clonal, conservação e logística de material vegetal.

4.6. Dualidades fundamentais da tecnologia de sementes sintéticas

A dualidade entre rigidez estrutural e emergência fisiológica observada neste estudo não é exclusiva da mandioca, tendo sido relatada em diferentes espécies vegetais encapsuladas, como *Mentha spicata* (MICHELI; REGNI; DA SILVA, 2022) e *Brassica oleracea* (AL-HARDAN et al., 2022). Essa recorrência interespecies sugere que a dificuldade em conciliar estabilidade mecânica e permeabilidade não está associada a particularidades fisiológicas específicas, mas constitui uma característica estrutural inerente aos sistemas encapsulantes à base de alginato.

De fato, os resultados evidenciam uma dualidade intrínseca às matrizes formuladas com alginato reticulado por CaCl_2 ou $\text{Ca}(\text{OH})_2$, pois redes mais rígidas apresentam elevada estabilidade tecnológica, porém impõem restrições físicas e difusivas que comprometem a emergência; em contraste, matrizes menos densas e mais deformáveis favorecem a germinação e o vigor inicial, mas são tecnologicamente frágeis. Essa dicotomia tem sido amplamente discutida na literatura como uma limitação central da tecnologia de sementes sintéticas, uma vez que a eficiência do sistema depende do equilíbrio entre proteção mecânica e permissividade fisiológica (HUSSIEN et al., 2023).

Essa limitação torna-se ainda mais crítica em espécies propagadas vegetativamente, como a mandioca, cuja fase inicial de estabelecimento é altamente sensível a impedimentos físicos e requer microambientes que favoreçam a expansão celular, elevada disponibilidade hídrica e crescimento radicular sem restrições mecânicas (CAVALIERI POLIZELI et al., 2024;

SCHOFFEL et al., 2021). Assim, o desempenho inferior observado em matrizes excessivamente rígidas reflete não apenas uma inadequação estrutural da cápsula, mas também a elevada sensibilidade fisiológica da espécie a condições que mimetizam solos compactados ou ambientes com baixa macroporosidade.

Embora o presente estudo tenha avaliado exclusivamente matrizes produzidas com alginato associado a CaCl_2 ou Ca(OH)_2 , reconhece-se que essas combinações representam apenas uma fração das possibilidades tecnológicas disponíveis. Essa limitação restringe a generalização dos resultados para sistemas encapsulantes mais complexos ou funcionalmente híbridos, reforçando a necessidade de investigações futuras que explorem novas composições, arquiteturas e estratégias de encapsulamento capazes de mitigar a dualidade estrutural identificada.

4.7. Direções futuras para superar a dualidade estrutural

A dualidade entre estabilidade mecânica e permissividade fisiológica evidenciado neste estudo constitui uma limitação estrutural recorrente em sistemas baseados exclusivamente na gelificação iônica do alginato (KAUR et al., 2019; AL-HARDAN et al., 2022). Superar essa limitação exigirá a incorporação de abordagens avançadas de engenharia de materiais, capazes de dissociar resistência mecânica global e deformabilidade local, permitindo que a cápsula atenda simultaneamente às demandas tecnológicas e fisiológicas.

Entre as estratégias potencialmente promissoras para novos testes incluem-se: i) redes interpenetrantes (IPNs), combinando reticulação iônica do alginato com reticulação covalente suave (por exemplo, gelatina ou outros biopolímeros), capazes de aumentar a tenacidade e a resistência à fratura sem comprometer significativamente a permeabilidade da matriz (Hurtado et al., 2022); ii) nanocompósitos biopoliméricos, reforçados com celulose nanofibrilar, nanoargilas ou outros nanomateriais, que permitem reduzir a concentração de alginato mantendo resistência mecânica adequada, além de modular propriedades como porosidade e biodegradação; e iii) sementes sintéticas funcionais (“smart seeds”), incorporando reguladores de crescimento, microrganismos benéficos ou nutrientes, transformando a cápsula de um invólucro

passivo em um sistema ativo de modulação fisiológica, capaz de compensar parcialmente o custo metabólico associado ao encapsulamento.

Nesse contexto, o presente estudo estabelece um marco conceitual e experimental ao delimitar os limites de desempenho das formulações clássicas de alginato para sementes sintéticas de mandioca. Ao mesmo tempo, aponta caminhos claros para o desenvolvimento da próxima geração de sistemas encapsulantes, com maior sofisticação estrutural e funcional, ampliando o potencial da tecnologia para aplicações em propagação clonal, conservação de germoplasma e logística de material vegetativo em larga escala.

5. CONCLUSÃO

Este estudo demonstra que o desempenho das sementes sintéticas de mandioca é governado pela arquitetura físico-química das matrizes de encapsulamento, definida pela interação entre o alginato e a fonte de Ca^{2+} utilizada na reticulação. A modulação da rigidez, da permeabilidade e da integridade estrutural das cápsulas resultou em respostas fisiológicas contrastantes, evidenciando que o encapsulamento atua como um microambiente artificial crítico para a emergência e o estabelecimento inicial das plântulas.

Matrizes reticuladas com CaCl_2 apresentaram elevada estabilidade mecânica, porém impuseram barreiras físicas e difusivas que restringiram severamente a emergência. Em contraste, cápsulas formadas com Ca(OH)_2 geraram redes menos rigidamente reticuladas e mais permissivas ao crescimento inicial, favorecendo a germinação e o vigor, ainda que com menor coesão estrutural. Esses resultados evidenciam uma dualidade estrutural intrínseca às formulações à base de alginato, no qual estabilidade tecnológica e eficiência biológica raramente coexistem.

A eficiência da tecnologia de sementes sintéticas, portanto, depende do ajuste fino entre proteção mecânica e permissividade fisiológica, destacando a necessidade de matrizes dinâmicas e responsivas. O estudo estabelece limites claros para formulações clássicas de alginato e aponta direções futuras baseadas em engenharia de materiais, como matrizes compósitas, arquiteturas funcionais e controle da cinética de gelificação, como caminhos promissores para ampliar a

aplicabilidade da tecnologia na propagação clonal, conservação e logística da mandioca em larga escala.

6. REREFÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AI-HARDAN, G. M. A.; AL-SHAMARI, M.; HANSHIL, M. A. Effect of sodium alginate and calcium chloride on artificial seeds production of red cabbage plants. **Plant Archives**, v. 20, n. 2, p. 5677–5780, 2020.

BESIRI, I. N.; GOUDOULAS, T. B.; FATTAHI, E.; BECKER, T. Experimental advances in the real-time recording of cross-linking alginate in situ gelation: A review. **Polymers**, v. 15, n. 13, p. 2875, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15132875>.

BLANDINO, A.; MACÍAS, M.; CANTERO, D. Formation of calcium alginate gel capsules: Influence of sodium alginate and CaCl₂ concentration on gelation kinetics. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v. 88, n. 6, p. 686–689, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1389-1723\(00\)87103-0](https://doi.org/10.1016/s1389-1723(00)87103-0).

BUSTAMANTE-TORRES, M. et al. Hydrogels classification according to the physical or chemical interactions and as stimuli-sensitive materials. **Gels**, v. 7, n. 4, p. 182, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/gels7040182>.

CAVALIERI POLIZELI, K. et al. Cassava yield and soil physical properties under different tillage systems in Paraná, southern Brazil. **Scientia Agraria**, v. 20, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5380/rsa.v1i1.95003>.

CEBALLOS, H. et al. Fifty years of a public cassava breeding program: Evolution of breeding objectives, methods, and decision-making processes. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 134, n. 8, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00122-021-03852-9>.

CEBALLOS, H.; KULAKOW, P.; HERSHEY, C. Cassava breeding: Current status, bottlenecks and the potential of biotechnology tools. **Tropical Plant Biology**, v. 5, n. 1, p. 73–87, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12042-012-9094-9>.

COLIVET, J.; CARVALHO, R. A. Hydrophilicity and physicochemical properties of chemically modified cassava starch films. **Industrial Crops and Products**, v. 95, p. 599–607, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.11.018>.

CONCEIÇÃO, L. V. et al. New protocol for rapid cassava multiplication in field conditions: A perspective on speed breeding. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1258101, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1258101>.

DONATI, I.; CHRISTENSEN, B. E. Alginate-metal cation interactions: Macromolecular approach. **Carbohydrate Polymers**, v. 321, p. 121280, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121280>.

DRAGET, K. Alginates. In: PHILLIPS, G. O.; WILLIAMS, P. A. (ed.). **Handbook of Hydrocolloids**. 2. ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2009. p. 807–828. DOI: <https://doi.org/10.1533/9781845695873.807>.

DUTRA, F. B. et al. Seeds technologies: Performance of sodium alginate and calcium chloride as seed coating. **Acta Biológica Catarinense**, v. 11, n. 4, p. 34–43, 2024. DOI: <https://doi.org/10.21726/abc.v11i4.2390>.

FAISAL, M.; ALATAR, A. A. (ed.). **Synthetic Seeds: Germplasm Regeneration, Preservation and Prospects**. Cham: Springer, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-24631-0>.

FAO. **Statistics**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023. Disponível em: <http://www.fao.org/statistics/en>.

GHAMBARALI, S. et al. Optimization of the conditions for production of synthetic seeds by encapsulation of axillary buds derived from minituber sprouts in potato. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture**, v. 126, p. 449–458, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11240-016-1013-6>.

GRANT, G. T. et al. Biological interactions between polysaccharides and divalent cations: The egg-box model. **FEBS Letters**, v. 32, n. 1, p. 195–198, 1973. DOI: [https://doi.org/10.1016/0014-5793\(73\)80770-7](https://doi.org/10.1016/0014-5793(73)80770-7).

HATZILAZAROU, S. et al. Conservation, regeneration and genetic stability of regenerants from alginate-encapsulated shoot explants. **Polymers**, v. 13, n. 10, p. 1666, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13101666>.

HURTADO, A. et al. Alginate: Enhancement strategies for advanced applications. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 9, p. 4486, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms23094486>.

HUSSIEN, E. T. et al. Synthesis and characterization of artificial seeds plantlets of in vitro male *Populus alba*. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture**, v. 156, n. 2, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11240-023-02664-7>.

IBGE. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2024.

IQBAL, M. et al. Evaluation of sodium alginate and calcium chloride on development of synthetic seeds. **Pakistan Journal of Botany**, v. 51, n. 5, 2019. DOI: [https://doi.org/10.30848/PJB2019-5\(36\)](https://doi.org/10.30848/PJB2019-5(36)).

JELIHOVSCHI, E. G.; FARIA, J. C.; ALLAMAN, I. B. ScottKnott: A package for performing the Scott-Knott clustering algorithm in R. **Tema**, v. 15, n. 1, p. 3–17, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5540/tema.2014.015.01.0003>.

Jl, D. et al. Superstrong, superstiff, and conductive alginate hydrogels. **Nature Communications**, v. 13, p. 3019, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30691-z>.

KASSAMBARA, A. Authors and citation. **Ggpubr: 'Ggplot2' Based Publication Ready Plots**, 2022. Disponível em: <https://rpkgs.datanovia.com/ggpubr/authors.html>.

KAUR, R.; SHARMA, S.; KAUR, S. Synthetic seeds: Imminent technology for plant propagation. In: **Advances in Biotechnology and Bioscience**. New Delhi: Akinik Publications, 2019. p. 106–124.

KHABBAZI, S. D.; YÜKSEL ÖZMEN, C.; ERGÜL, A. Synthetic seeds of wild beet: Basic concepts and related methodologies. In: FAISAL, M.; ALATAR, A. A. (ed.). **Synthetic Seeds: Germplasm Regeneration, Preservation and Prospects**. Cham: Springer, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-24631-0_18.

LEE, K. Y.; MOONEY, D. J. Alginate: Properties and biomedical applications. **Progress in Polymer Science**, v. 37, n. 1, p. 106–126, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.06.003>.

LIU, Y. et al. Comparison of the structural, physical and functional properties of κ -carrageenan films incorporated with pomegranate extracts. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 147, p. 1076–1088, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.075>.

LÓPEZ-SANTIAGO, R. F.; CASTILLO, R. Alginate biopolymer viscoelasticity from sol to gel. **Physics of Fluids**, v. 37, n. 1, p. 013110, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0245878>.

MICHELI, M.; REGNI, L.; SILVA, D. F. Encapsulation in calcium alginate of nodes from stolons of *Mentha spicata*. **Horticulturae**, v. 8, n. 5, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae8050456>.

NANDA, D. et al. Advances in natural polymer-based hydrogels. **Discover Polymers**, v. 2, n. 1, p. 6, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44347-025-00017-5>.

OCAÑA-REYES, J. A. et al. Tillage systems modify soil properties and cassava physiology during drought. **Agronomy**, v. 14, n. 12, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14123041>.

PATEL, A. V. et al. A novel encapsulation technique for the production of artificial seeds. **Plant Cell Reports**, v. 19, n. 9, p. 868–874, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1007/s002990000223>.

PITALOKA, D. et al. Application of sodium alginate on encapsulation sugarcane bud chips. **Natural Volatiles & Essential Oils**, v. 8, n. 5, p. 3736–3747, 2021.

PRAKASH, A. V. et al. Calcium alginate encapsulated synthetic seed production in *Plumbago rosea*. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 24, n. 5, p. 963–971, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12298-018-0559-7>.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025.

REICHERT, J. M. et al. Is cassava yield affected by soil tillage? **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, 2021. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200134>.

RIHAN, H. Z. et al. Artificial seeds: Principle, aspects and applications. **Agronomy**, v. 7, n. 4, p. 71, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy7040071>.

SAHU, S. et al. Exploring the potential of synthetic seeds: Influence of explant, encapsulating agent and matrix, advantages and challenges. **Plant Science Today**, v. 12, n. 1, 2025. DOI: <https://doi.org/10.14719/pst.3931>.

SANCHEZ-BALLESTER, N.; BATAILLE, B.; SOULAIROL, I. Sodium alginate and alginic acid as pharmaceutical excipients for tablet formulation. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 270, p. 118399, 2021. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34364633/>.

SARKER, M. et al. Influence of ionic crosslinkers on the mechanical and biological properties of hydrogel scaffolds. **Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition**, v. 29, n. 10, p. 1126–1154, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/09205063.2018.1433420>.

SCANAVACA JÚNIOR, L.; FONSECA, N.; PEREIRA, M. E. C. Uso de fécula de mandioca na pós-colheita de manga “Surpresa”. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 29, n. 1, p. 67–71, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-29452007000100015>.

SCHOFFEL, A. et al. Adaptation of the rapid multiplication method for cassava seedling production. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 43, p. e50289, 2021. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v43i1.50289>.

SILVA, J. et al. Sugarcane bud chip encapsulation for ex vitro synthetic seed formation. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, n. 4, p. 104, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5539/jas.v10n4p104>.

TADDA, S. A. et al. Response of vegetable sweet potato nodes to encapsulation agent concentrations. **Agronomy**, v. 12, n. 1, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12010019>.

XIAO, L. et al. Advancements and strategies of genetic improvement in cassava. **Horticulture Research**, v. 12, n. 3, p. uhae341, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1093/hr/uhae341>.

ZHANG, X. et al. pH-responsive antibacterial emulsion gel based on cinnamaldehyde. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 291, p. 139062, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.139062>.

Capítulo 3

DESAFIOS E AVANÇOS NA FORMULAÇÃO DE SEMENTES SINTÉTICAS DE MANDIOCA: EVIDÊNCIAS ESTRUTURAIS E FISIOLÓGICAS

DEZEMBRO/2025

Desafios e avanços na formulação de sementes sintéticas de mandioca: evidências estruturais e fisiológicas

RESUMO: A propagação vegetativa da mandioca, baseada no uso de manivas-semente, enfrenta limitações intrínsecas de ordem logística, fitossanitária e multiplicativa, constituindo um gargalo para a difusão de cultivares melhoradas. Como alternativa estratégica, este estudo avaliou o desempenho estrutural e fisiológico de matrizes biopoliméricas híbridas para o encapsulamento *ex vitro* de gemas maduras, visando ao desenvolvimento de sementes sintéticas funcionais. Foram investigadas formulações combinando alginato de sódio (1% e 2%), látex natural de seringueira (25% e 50%), fibra de coco e cloreto de cálcio como agente reticulante. A caracterização físico-mecânica revelou que as formulações à base de látex e fibra (Látex 50% + Fibra e Látex 25% + Fibra) apresentaram melhor cobertura (80–85%), maior resistência à penetração (21,42–21,52 N) e permeabilidade hídrica balanceada, atribuídas à sinergia entre a elasticidade do látex e o efeito estruturante da fibra. Em contraste, matrizes com alginato a 2% produziram filmes excessivamente rígidos e pouco permeáveis, comprometendo a difusão de O₂ e a hidratação da gema. Nos ensaios agrônômicos, as formulações com látex e fibra alcançaram taxas de germinação (60–62%) e escala de vigor (3,7–3,9) estatisticamente equivalentes ao controle não encapsulado, além de assegurarem pleno desenvolvimento radicular e aéreo. Em oposição, as formulações com alto teor de alginato (2%) resultaram em germinação reduzida (18–20%), vigor mínimo (~1,0) e severa limitação do acúmulo de biomassa, evidenciando a incompatibilidade fisiológica de matrizes muito densas com as exigências respiratórias e hídricas da mandioca. Portanto, biocompósitos de látex natural reforçados com fibra vegetal representam a arquitetura mais promissora para sementes sintéticas de mandioca, equilibrando proteção mecânica, permeabilidade seletiva e funcionalidade fisiológica. Esses achados representam um avanço relevante no desenvolvimento de sementes sintéticas *ex vitro* de mandioca, com potencial para ampliar a eficiência do material propagativo, reduzir entraves logísticos e favorecer o intercâmbio seguro de germoplasma com maior integridade fitossanitária.

Palavras-chave: Biopolímeros, *Manihot esculenta* Crantz, Germinação *ex vitro*, Permeabilidade seletiva.

Challenges and advances in synthetic cassava seed formulation: structural and physiological insights

ABSTRACT: Cassava vegetative propagation, traditionally based on stem cuttings, faces inherent logistical, phytosanitary, and multiplication constraints, representing a major bottleneck for the large-scale dissemination of improved cultivars. As a strategic alternative, this study evaluated the structural and physiological performance of hybrid biopolymeric matrices for the *ex vitro* encapsulation of mature buds, aiming to develop functional synthetic seeds. Formulations combining sodium alginate (1% and 2%), natural rubber latex (25% and 50%), coconut fiber, and calcium chloride as a crosslinking agent were assessed. Physicomechanical characterization showed that latex–fiber formulations (50% Latex + Fiber and 25% Latex + Fiber) provided superior coverage (80–85%), greater penetration resistance (21.42–21.52 N), and balanced water permeability, reflecting the synergistic interaction between latex elasticity and the structural reinforcement provided by the fiber. In contrast, matrices containing 2% alginate formed excessively rigid, low-permeability films, restricting oxygen diffusion and bud hydration. In agronomic evaluations, latex–fiber formulations achieved germination rates (60–62%) and vigor scores (3.7–3.9) statistically comparable to the non-encapsulated control, while also supporting normal root and shoot development. Conversely, high-alginate formulations (2%) resulted in markedly reduced germination (18–20%), minimal vigor (~1.0), and severe ограничения in biomass accumulation, demonstrating the physiological incompatibility of overly dense matrices with the respiratory and water requirements of cassava. In general, natural rubber latex–based biocomposites reinforced with plant fiber represent the most promising structural framework for cassava synthetic seeds, effectively balancing mechanical protection, selective permeability, and physiological functionality. These findings constitute a significant advance in the development of *ex vitro* synthetic cassava seeds, with the potential to improve propagule efficiency, reduce logistical barriers, and facilitate the safe exchange of germplasm with enhanced phytosanitary integrity.

Keywords: Biopolymers; *Manihot esculenta* Crantz; *Ex vitro* germination; Selective permeability.

1. INTRODUÇÃO

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é uma das culturas agrícolas mais relevantes para a segurança alimentar global, desempenhando papel central na subsistência de milhões de pessoas em regiões tropicais e subtropicais. Como fonte primária de carboidratos, a espécie sustenta populações vulneráveis e, simultaneamente, integra cadeias agroindustriais estratégicas voltadas à produção de alimentos, féculas, amidos modificados e bioenergia (FAO, 2023; KONGSIL et al., 2024). Além de sua expressiva importância socioeconômica, a mandioca distingue-se pela elevada plasticidade ambiental, constituindo um recurso-chave para a resiliência dos sistemas produtivos frente à variabilidade climática.

Apesar dessas vantagens, a expansão e a modernização do cultivo são fortemente limitadas pelo sistema convencional de propagação vegetativa, baseado no uso de manivas-semente. Esse material propagativo é volumoso, perecível e logisticamente oneroso para transporte e armazenamento, sobretudo em longas distâncias, além de atuar como vetor eficiente de patógenos sistêmicos. Como consequência, há restrições ao intercâmbio seguro de germoplasma e atraso na adoção de cultivares melhoradas em diferentes regiões produtoras (IMAKUMBILI et al., 2021). Esse conjunto de limitações logísticas e fitossanitárias tem impulsionado o desenvolvimento de estratégias alternativas de multiplicação, com foco no aumento da taxa multiplicativa, redução de custos e garantia da sanidade do material de plantio (OLIVEIRA et al., 2020; SHEAT et al., 2024).

Avanços recentes demonstram que a redução e padronização das unidades propagativas, aliadas a tratamentos pré-plantio, podem aumentar significativamente o vigor e a eficiência de multiplicação da mandioca, indicando que a miniaturização do material propagativo representa um caminho promissor para a intensificação sustentável da cultura (OLIVEIRA et al., 2020). Nesse contexto, tecnologias capazes de converter propágulos vegetativos em unidades compactas, padronizadas, seguras e de fácil manuseio tornam-se particularmente estratégicas. Entre essas inovações, a tecnologia de sementes sintéticas *ex vitro* emerge como uma alternativa promissora para a propagação clonal, conservação e disseminação segura de germoplasma. Essa abordagem baseia-se no

encapsulamento de propágulos vegetativos, como embriões somáticos, ápices caulinares, gemas axilares ou microestacas, em matrizes poliméricas que mimetizam funcionalmente as sementes verdadeiras (JAVED et al., 2017; AHMAD; SHAHZAD, 2019). Ao combinar a uniformidade genética inerente à propagação clonal com a padronização, a manejabilidade e o potencial de mecanização associados às sementes, essa tecnologia oferece vantagens logísticas e sanitárias relevantes, cuja viabilidade comercial já vem sendo explorada em culturas perenes de grande escala, como a cana-de-açúcar (CEEDS, 2023).

O sucesso das sementes sintéticas em condições *ex vitro* depende criticamente das propriedades físico-químicas, estruturais e funcionais da matriz encapsulante. Idealmente, essa matriz deve conciliar resistência mecânica suficiente para proteger o propágulo durante o manuseio, transporte e implantação no solo, com permeabilidade adequada à água e ao oxigênio, biodegradabilidade compatível com as demandas fisiológicas do tecido vegetal e elevada biocompatibilidade (KHAN et al., 2022; DURGA DEVI et al., 2025; SAHU et al., 2025). Estudos recentes descrevem a matriz encapsulante como um microambiente artificial inicial, cujo desenho estrutural condiciona a hidratação, as trocas gasosas, a proteção física e a liberação controlada de aditivos, elementos determinantes para a conversão eficiente do propágulo em plântula sob condições não estéreis.

Entre os biopolímeros amplamente utilizados, o alginato destaca-se pela facilidade de gelificação e elevada biocompatibilidade. Contudo, sua reticulação iônica pode resultar em estruturas excessivamente rígidas e densas, com baixa elasticidade e porosidade limitada, o que pode restringir a expansão dos tecidos, dificultar a difusão gasosa e comprometer a emergência de raízes e brotos (SÁNCHEZ-BALLESTER et al., 2021; JIMÉNEZ-ARIAS et al., 2022; MOURA-ALVES et al., 2023; LÓPEZ-SANTIAGO; CASTILLO, 2025).

Nesse sentido, biopolímeros naturais à base de látex têm despertado crescente interesse como matrizes alternativas ou complementares. O látex natural apresenta elevada elasticidade, resistência mecânica, biocompatibilidade e capacidade de formar filmes contínuos e coesos, atuando como barreira semipermeável capaz de modular a perda hídrica, reduzir danos físicos e estabilizar o microambiente da gema encapsulada (BHATIA, 2020; POKHAREL

et al., 2022). A funcionalidade desses filmes depende fortemente de sua integridade estrutural, estabilidade físico-química e das condições de secagem e polimerização adotadas (BERTHELOT et al., 2014; SRIRING et al., 2020; MOORHEAD; FRANCIS, 2025).

A incorporação de fibras vegetais naturais, como fibras de coco ou carnaúba, aos sistemas à base de látex tem demonstrado ganhos expressivos em termos de reforço mecânico, coesão e resistência à fissuração, características essenciais para a proteção das gemas durante transporte e manuseio (SANTOS, 2015; UJIANTO et al., 2017; ADENIYI et al., 2019; CHANDRAN et al., 2024). Além do reforço estrutural, essas fibras contribuem para o aumento da porosidade da matriz, favorecendo a difusão de gases e reduzindo o risco de microambientes hipóxicos (BHATIA, 2020; POKHAREL et al., 2022). Evidências adicionais oriundas de estudos com adesivos naturais e filmes híbridos reforçam o potencial desses compósitos para aplicações agrícolas e ambientais mais complexas (AGUIRRE et al., 2020; FANG et al., 2025; SALAZAR et al., 2023).

No caso específico da mandioca, a fisiologia da brotação e do enraizamento a partir de gemas ou segmentos caulinares revela elevada sensibilidade a barreiras físicas e à limitação de oxigênio, exigindo formulações de sementes sintéticas que priorizem permeabilidade e porosidade sem comprometer a integridade estrutural durante a implantação no solo. Protocolos recentes baseados em nós isolados reforçam a viabilidade de estratégias que utilizem unidades propagativas pequenas, padronizadas e de fácil manuseio, cenário no qual as sementes sintéticas podem oferecer ganhos logísticos, sanitários e operacionais substanciais (SHEAT et al., 2024).

Diante desse panorama, torna-se estratégico explorar matrizes poliméricas híbridas capazes de integrar flexibilidade, resistência mecânica, controle de rigidez e permeabilidade em um único sistema funcional. Assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar, de forma integrada e em condições *ex vitro*, o desempenho de diferentes matrizes poliméricas, incluindo variações na concentração de alginato e no tipo de fonte de Ca^{2+} , na formulação de sementes sintéticas de mandioca, bem como investigar o papel de aditivos e componentes compósitos na otimização do trade-off entre proteção mecânica e permissividade fisiológica. Ao fornecer subsídios mecanísticos e aplicados, este trabalho busca contribuir para a transição da tecnologia de sementes sintéticas do laboratório

para sistemas produtivos escaláveis, reduzindo gargalos de multiplicação e promovendo a disseminação segura de cultivares superiores.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Local de condução dos experimentos e material vegetal

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Práticas Culturais de Mandioca e na Casa de Vegetação da Embrapa Mandioca e Fruticultura, localizada no município de Cruz das Almas, Bahia, Brasil (12°40'45,2" S; 39°05'25,2" W). A cultivar de mandioca BRS Novo Horizonte foi utilizada como fonte de material vegetal, em função de sua ampla adoção comercial, estabilidade agrônômica e desempenho consistente em sistemas de multiplicação vegetativa. As gemas axilares foram coletadas de plantas matrizes maduras, com idade entre 10 e 12 meses, selecionadas com base em critérios rigorosos de sanidade e vigor, incluindo ausência de sintomas de doenças e pragas, raízes tuberosas plenamente desenvolvidas e caules fisiologicamente maduros, com diâmetro da medula superior a 50% do diâmetro total da haste, conforme recomendações para propagação eficiente da cultura.

O material propagativo foi obtido preferencialmente do terço médio das hastes, região reconhecida por apresentar maior viabilidade fisiológica e reserva energética das gemas. Os segmentos uninodais foram padronizados para 2,5 cm de comprimento, utilizando serra elétrica circular adaptada, garantindo cortes uniformes e minimizando danos mecânicos. Após o preparo, as gemas foram submetidas à desinfestação superficial por imersão em solução de amônia quaternária (2 mL L⁻¹) por 10 minutos, seguida de secagem à sombra, à temperatura ambiente, pelo mesmo período.

2.2. Delineamento experimental e concepção geral do estudo

O estudo foi estruturado em três experimentos sequenciais e complementares, com o objetivo de desenvolver, caracterizar e validar sistemas de encapsulamento biopolimérico para a produção de sementes sintéticas de mandioca em condições *ex vitro*.

2.2.1. Experimento 1: formulação e aplicação de revestimentos biopoliméricos

O desenvolvimento das matrizes encapsulantes seguiu uma abordagem multifatorial, avaliando sinergias entre diferentes biopolímeros. As formulações foram baseadas em: (i) alginato de sódio, um polissacarídeo aniônico amplamente utilizado na encapsulação vegetal, capaz de formar hidrogéis por reticulação iônica com Ca^{2+} via modelo “egg-box”; (ii) látex natural de seringueira (*Hevea brasiliensis*), utilizado como agente filmogênico elástico e resistente à fissuração; e (iii) fibra de coco (*Cocos nucifera* L.), empregada como carga de reforço e moduladora da porosidade da matriz. O agente reticulante utilizado foi cloreto de cálcio (CaCl_2) a 10%.

O látex natural foi previamente diluído em solução de hidróxido de amônio a 2% (pH \approx 10), procedimento adotado para evitar a coagulação prematura e preservar a estabilidade coloidal do polímero durante o manuseio. A fibra de coco foi previamente seca e peneirada em peneira Granutest, malha Tyler 32 (ABNT 35), com abertura de 0,50 mm, assegurando homogeneidade granulométrica. Foram avaliados 15 tratamentos, compostos por diferentes combinações de alginato de sódio (1 e 2%), látex natural (25 e 50%), fibra de coco e cloreto de cálcio, além de um controle sem encapsulamento (Tabela 1).

Tabela 1. Tratamentos contendo combinações de biopolímeros aplicados ao desenvolvimento de sementes sintéticas de mandioca.

Tratamento (T)	Descrição
T1	Alginato de sódio a 1% + cloreto de cálcio a 10%+ Fibra
T2	Alginato de sódio a 2% + cloreto de cálcio a 10%+Fibra
T3	Alginato de sódio a 1% / látex a 25%+ Fibra
T4	Alginato de sódio a 1% / látex a 50%+Fibra
T5	Alginato de sódio a 2% / látex a 25%+ Fibra
T6	Alginato de sódio a 2% / látex a 50%+Fibra
T7	Alginato de sódio a 1% + látex a 25%
T8	Alginato de sódio a 1%+ látex a 50%
T9	Alginato de sódio a 2% + látex a 25%
T10	Alginato de sódio a 2%+ látex a 50%
T11	Látex 25% + Fibra
T12	Látex 50% + Fibra
T13	Látex 25%
T14	Látex 50%
T15	Controle (apenas gemas únicas)

O encapsulamento seguiu protocolos específicos conforme a composição da formulação. Para os tratamentos contendo alginato e CaCl_2 (T1 e T2), as gemas foram imersas em solução de alginato por 3 minutos, recobertas com fibra de coco e posteriormente submetidas à reticulação iônica por imersão em solução de CaCl_2 a 10% por 5 minutos. Para as formulações alginato-látex (T3 a T10), as soluções foram previamente homogeneizadas em agitador magnético (60 rpm), as gemas imersas por 3 minutos e, quando aplicável, recobertas com fibra de coco. Nos tratamentos contendo apenas látex, com ou sem fibra (T11 a T14), as gemas foram imersas em soluções de látex diluído por 3 minutos e submetidas à secagem.

Após o encapsulamento, todas as gemas foram mantidas para secagem à temperatura ambiente por 72 horas, visando à estabilização estrutural do revestimento e à formação das sementes sintéticas. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com quatro repetições por tratamento e parcelas compostas por 20 sementes sintéticas, totalizando 1.200 unidades experimentais.

A eficiência da cobertura dos filmes biopoliméricos foi avaliada por meio de uma escala visual ordinal de cinco níveis (Tabela 2, Figura 1), considerando critérios de integridade física, uniformidade, presença de rupturas, ressecamento e capacidade de proteção da gema.

As propriedades físico-mecânicas dos filmes e das sementes sintéticas encapsuladas foram avaliadas por meio de ensaios de resistência à penetração e de absorção de água. Para cada tratamento, foram analisadas quatro repetições, sendo cada repetição composta por cinco sementes sintéticas. A resistência mecânica dos revestimentos foi determinada utilizando-se um penetrômetro digital acoplado a suporte de bancada, equipado com sonda cilíndrica de 2 mm de diâmetro. As sementes sintéticas encapsuladas foram posicionadas sobre a plataforma do equipamento, e o ensaio foi realizado no centro de cada unidade. A perfuração foi conduzida até a ruptura do revestimento, sendo registrada a força máxima necessária para a ruptura, expressa em newtons (F_{max} , N).

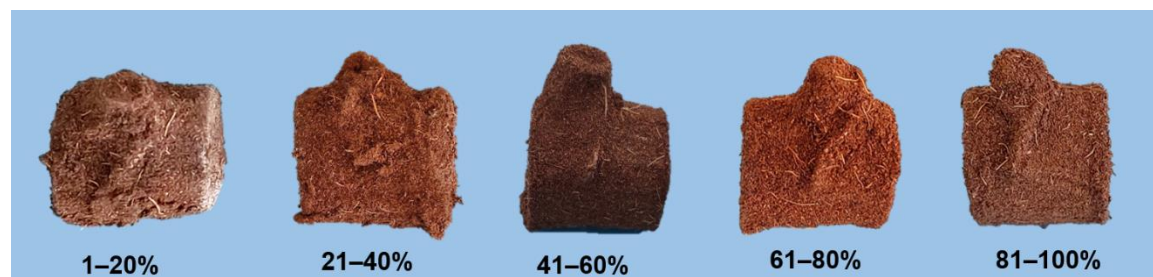
A capacidade de absorção de água das sementes sintéticas encapsuladas foi avaliada por meio de ensaio gravimétrico. Inicialmente, as amostras foram pesadas para determinação da massa inicial (w_i , g) e, em seguida, imersas em 50 mL de água destilada por 40 minutos, à temperatura

ambiente. Após a imersão, as sementes foram secas superficialmente com papel filtro e novamente pesadas para obtenção da massa final (w_f, g). A absorção de água foi calculada de acordo com a seguinte equação: $Absorção\% = \frac{w_f - w_i}{w_i} \times 100$.

Tabela 2. Escala visual para avaliação da eficiência da cobertura dos filmes biopoliméricos.

Nota	Percentual de Cobertura	Descrição da eficiência do filme
1	1–20%	Cobertura muito ineficiente: presença de rupturas, aspecto quebradiço ou ressecado, deformidades acentuadas.
2	21–40%	Cobertura ineficiente: filme frágil, com rupturas parciais ou zonas estruturalmente comprometidas.
3	41–60%	Cobertura mediana: revestimento contínuo, sem áreas quebradiças ou deformações, porém com espessura irregular.
4	61–80%	Cobertura eficiente: filme com espessura homogênea, sem ressecamento, boa integridade estrutural.
5	81–100%	Cobertura muito eficiente: filme uniforme, sem rupturas ou ressecamento, preservando totalmente a integridade da gema.

Figura 1. Modelo de escala empregada para avaliação de cobertura dos filmes biopolimérico em manivas sintéticas de mandioca.



2.2.2. Experimento 2: Caracterização estrutural e funcional de filmes biopoliméricos

O Experimento 2 foi conduzido com o objetivo de aprofundar a caracterização estrutural, físico-mecânica e funcional das formulações biopoliméricas previamente selecionadas no Experimento 1, restringindo-se àquelas capazes de formar filmes contínuos, homogêneos e estruturalmente estáveis. Essa etapa teve caráter confirmatório e analítico, visando compreender de forma integrada os efeitos das combinações entre alginato de sódio, látex

natural, fibra de coco e cloreto de cálcio sobre as propriedades dos filmes, considerando sua aplicabilidade como matrizes de encapsulamento para sementes sintéticas.

Foram selecionadas oito formulações (Tabela 3), representativas de diferentes estratégias de estruturação polimérica: sistemas reticulados ionicamete à base de alginato de sódio e CaCl_2 , matrizes híbridas alginato-látex e sistemas compósitos constituídos exclusivamente por látex e fibra vegetal. A escolha dessas formulações baseou-se na capacidade de formar filmes íntegros, manuseáveis e com potencial equilíbrio entre resistência mecânica, permeabilidade hídrica e biodegradabilidade, características amplamente reportadas como críticas para sistemas encapsulantes aplicados à propagação vegetal *ex vitro* (LEE; MOONEY, 2012; ANTOV et al., 2020; SÁNCHEZ et al., 2023).

Tabela 3. Formulações de biopolímeros encapsulantes, compostos por alginato de sódio, cloreto de cálcio, látex e fibra de coco.

Tratamento (T)	Descrição
T1	Alginato 1% + CaCl_2 10% + fibra
T2	Alginato 2% + CaCl_2 10% + fibra
T3	Alginato 1% + látex 25% + fibra
T4	Alginato 1% + látex 50% + fibra
T5	Alginato 2% + látex 25% + fibra
T6	Alginato 2% + látex 50% + fibra
T7	Látex 25% + fibra
T8	Látex 50% + fibra

O preparo dos filmes seguiu os mesmos princípios metodológicos adotados no Experimento 1, com ajustes para padronização das amostras e avaliação intrínseca das propriedades dos materiais. Todas as soluções poliméricas foram previamente homogeneizadas por agitação mecânica, garantindo a completa dispersão dos polímeros e da fibra de coco. Em seguida, um volume final de 20 mL de cada formulação foi cuidadosamente transferido para placas de Petri, utilizando micropipetas (1–10 mL), assegurando precisão volumétrica e reprodutibilidade experimental.

As placas contendo as soluções foram dispostas em mesa agitadora orbital a 90 rpm por 5 minutos, etapa fundamental para promover a distribuição uniforme da fibra de coco na matriz polimérica e evitar gradientes estruturais ao

longo do filme. Esse procedimento é recomendado em estudos com filmes compósitos, nos quais partículas fibrosas atuam como agentes de reforço mecânico e moduladores de porosidade.

Nos tratamentos reticulados com cloreto de cálcio (T1 e T2), foi realizada uma etapa adicional de lavagem com água destilada após a formação inicial do filme, com o objetivo de remover o excesso de íons Ca^{2+} não incorporados à rede polimérica. Essa etapa é considerada essencial para evitar rigidez excessiva, fragilidade estrutural e interferências nas propriedades hídricas finais do material (SÁNCHEZ-BALLESTER et al., 2021). As formulações constituídas apenas por alginato, látex ou suas combinações sem agente reticulante não foram submetidas à lavagem, uma vez que requerem maior tempo de cura antes de qualquer manipulação adicional.

Após o preparo, os filmes foram incubados em estufa de circulação de ar forçado a 35 °C por 16 horas para remoção controlada da umidade livre. Em seguida, foram transferidos para câmara do tipo B.O.D., onde permaneceram por 72 horas sob temperatura de 27 °C e umidade relativa de 56%, visando à estabilização e padronização das propriedades físico-mecânicas antes das análises. O experimento foi conduzido em laboratório, à temperatura ambiente (25 °C), em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com oito tratamentos, quatro repetições e parcelas compostas por cinco placas de Petri por tratamento, totalizando 160 unidades experimentais.

As formulações biopoliméricas foram avaliadas quanto a um conjunto de propriedades físico-funcionais e estruturais, considerando tanto os filmes secos quanto hidratados. Essas análises tiveram como finalidade compreender o comportamento dos materiais frente a condições de armazenamento, manuseio e hidratação, bem como sua adequação como matrizes de encapsulamento para gemas de mandioca. Foram avaliados o aspecto visual, teor de umidade, índice de hidratação (intumescimento), solubilidade em água e biodegradabilidade em substrato. A seleção dessas variáveis baseou-se em protocolos amplamente utilizados na caracterização de filmes biodegradáveis à base de polissacarídeos e biopolímeros naturais, os quais indicam que a interação entre resistência mecânica, permeabilidade hídrica e degradação controlada é determinante para o sucesso de sistemas encapsulantes agrícolas (MAGALHÃES et al., 2019; ANTOV et al., 2020; KHAN et al., 2022).

As metodologias empregadas para cada variável, bem como as equações utilizadas nos cálculos, encontram-se detalhadas na Tabela 4.

Tabela 4. Características físico-funcionais avaliadas nos filmes biopoliméricos (alginato de sódio, látex e fibra de coco) secos e hidratados.

Variável	Sigla / Unidade	Procedimento analítico
Aspecto Visual	–	Avaliação qualitativa de homogeneidade, transparência, presença de defeitos (bolhas, fissuras), flexibilidade ao dobrar manualmente em 180°, e integridade ao manuseio.
Teor de umidade	TU (%)	Indica o conteúdo de água livre após condicionamento, afetando a estabilidade e a taxa de hidratação inicial. Para isso, discos de 4 cm ² foram secos em estufa a 105 ± 2 °C até massa constante (≈24 h).
Índice de intumescimento	de HI (%)	Mede a capacidade do hidrogel de absorver água e inchar, propriedade crítica para a disponibilização hídrica à gema encapsulada no solo. Amostras (2,5 x 2,5 cm) foram imersas em 50 mL de água destilada a 25 °C por 40 min. Após secagem superficial com papel filtro, pesou-se o peso final.
Biodegradabilidade em substrato	BD (%)	Avalia a taxa de degradação da matriz no solo, determinando a janela de tempo de proteção física ao propágulo. Para isso, filmes desidratados (4 cm ²) foram acondicionados em sacos de rede de náilon e enterrados a 2 cm de profundidade em substrato úmido (capacidade de campo a 70%), mantido a 27 °C por 15 dias.
Solubilidade em água	em S (%)	Quantifica a fração solúvel da matriz, refletindo a estabilidade da rede polimérica reticulada em meio aquoso. Amostras secas (2,7 cm ²) foram imersas em 50 mL de água destilada sob agitação orbital (130 rpm) a 25 °C por 24 h. O resíduo insolúvel foi filtrado (membrana de 0,45 µm), seco a 105 °C e em seguida pesado.

2.2.3. Experimento 3: Encapsulamento de gemas e avaliação agrônômica *ex vitro* das sementes sintéticas de mandioca

Nesta etapa, as formulações biopoliméricas previamente selecionadas foram empregadas no encapsulamento de gemas únicas de mandioca, com o objetivo de avaliar o desempenho agrônômico das sementes sintéticas em condições controladas de casa de vegetação. O enfoque experimental foi direcionado à verificação da viabilidade fisiológica, da capacidade de emergência e do desenvolvimento inicial das plântulas oriundas de gemas encapsuladas, considerando que a eficiência da tecnologia depende da adequada interação entre proteção mecânica, permeabilidade e biodegradabilidade da matriz

encapsulante, conforme descrito em estudos recentes sobre sementes sintéticas *ex vitro* (JAVED et al., 2017; AHMAD; SHAHZAD, 2019).

As gemas axilares maduras, padronizadas com 2,5 cm de comprimento e previamente sanitizadas conforme descrito na Seção 2.1, foram encapsuladas de acordo com as formulações apresentadas na Tabela 5. Os protocolos específicos de encapsulamento seguiram os procedimentos descritos anteriormente, com adaptações operacionais para aplicação em condições *ex vitro*. De forma geral, o fluxo de encapsulamento compreendeu quatro etapas sequenciais: (i) imersão da gema na matriz filmogênica, (ii) recobrimento com material particulado quando aplicável, (iii) reticulação iônica nos tratamentos à base de alginato e (iv) cura inicial do revestimento.

Tabela 5. Formulações de cobertura biopolimérica selecionadas para o encapsulamento de gemas de mandioca.

Tratamento (T)	Descrição
T1	Alginato de sódio 1% + cloreto de cálcio 10% + fibra
T2	Alginato de sódio 2% + cloreto de cálcio 10% + fibra
T3	Alginato de sódio 1% + látex 25% + fibra
T4	Alginato de sódio 1% + látex 50% + fibra
T5	Alginato de sódio 2% + látex 25% + fibra
T6	Alginato de sódio 2% + látex 50% + fibra
T7	Látex 25% + fibra
T8	Látex 50% + fibra
T9	Controle (gema sem filme)

Para as formulações compostas por alginato de sódio, fibra de coco e cloreto de cálcio (T1 e T2), as gemas foram imersas por 3 minutos em soluções aquosas de alginato de sódio a 1% ou 2% (m/v), seguidas de recobrimento imediato com fibra de coco peneirada em malha de 0,50 mm, assegurando distribuição homogênea do material sobre a superfície. Em seguida, procedeu-se à reticulação por imersão em solução de cloreto de cálcio a 10% (m/v) por 5 minutos, promovendo a gelificação iônica da matriz pelo mecanismo do tipo *egg-box*. Após a reticulação, as gemas encapsuladas foram submetidas a uma lavagem rápida em água destilada para remoção do excesso de íons cálcio não incorporados à matriz e, posteriormente, colocadas para secagem à temperatura ambiente por 1 hora.

Nas formulações constituídas por alginato de sódio, látex natural e fibra de coco (T3 a T6), a matriz de encapsulamento foi preparada pela mistura prévia de soluções de alginato de sódio (1% ou 2%) com látex natural estabilizado nas proporções de 25% ou 50% (v/v), seguida de homogeneização. As gemas foram imersas nessa matriz alginato-látex por 3 minutos e, imediatamente após a retirada, recobertas com fibra de coco padronizada (0,50 mm), formando um revestimento compósito com propriedades híbridas de rigidez e elasticidade, conforme descrito para sistemas biopoliméricos reforçados (ANTOV et al., 2020; CHANDRAN et al., 2024).

Para os tratamentos constituídos exclusivamente por látex natural e fibra de coco (T7 e T8), as gemas foram imersas por 3 minutos em soluções de látex a 25% ou 50% (v/v), seguidas de recobrimento com fibra de coco peneirada. Após o recobrimento, o material foi submetido à cura inicial por secagem à temperatura ambiente durante 1 hora, permitindo a formação de um filme contínuo e aderente à superfície da gema. O tratamento controle (T9) consistiu em gemas não encapsuladas, utilizadas como referência para comparação do desempenho agrônômico em relação às sementes sintéticas.

2.3. Implantação e avaliação das sementes sintéticas

O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados (DBC), composto por nove tratamentos (oito formulações biopoliméricas e um controle), com quatro repetições. Cada parcela experimental foi constituída por 20 gemas únicas, totalizando 720 unidades experimentais. As sementes sintéticas e o tratamento controle foram implantados em tubetes preenchidos com substrato composto por areia e vermiculita na proporção 3:1 (v/v), escolhido por proporcionar adequada aeração, drenagem e suporte físico ao sistema radicular inicial. O cultivo foi realizado em casa de vegetação, sob condições controladas de temperatura e irrigação, garantindo ambiente uniforme para emergência, estabelecimento e crescimento inicial das plântulas, conforme protocolos recomendados para avaliação *ex vitro* de propágulos vegetativos de mandioca (SCHOFFEL et al., 2019). As avaliações foram realizadas aos 20 e 30 dias após o plantio (DAP), considerando parâmetros morfológicos, fisiológicos e biométricos associados ao desempenho inicial das gemas encapsuladas (Tabela 6).

Tabela 6. Características agronômicas avaliadas nos ensaios de desempenho das sementes sintéticas de mandioca.

Variável	Sigla / Unidade	Período de avaliação	Escala / Medida
Emergência de mudas	Stand (%)	20 DAP	Percentual de gemas que originaram plântulas emergidas e visíveis acima da superfície do substrato, em relação ao total de unidades plantadas por parcela Avaliação visual semiquantitativa baseada em escala ordinal de cinco pontos, considerando uniformidade, coloração, arquitetura da parte aérea e robustez geral das plântulas, variando de 1 (desenvolvimento severamente comprometido) a 5 (plântulas vigorosas, uniformes e bem desenvolvidas)
Vigor de muda	StVig (nota)	30 DAP	Comprimento da parte aérea medido a partir do nível do substrato até o meristema apical, utilizando régua graduada
Altura da planta	AP (cm)	30 DAP	Diâmetro do caule medido na região basal da haste, próximo ao nível do substrato, com paquímetro digital de precisão
Diâmetro da haste	DH (cm)	30 DAP	Massa da parte aérea imediatamente após a colheita, determinada em balança analítica, sem prévia desidratação
Peso fresco da parte aérea	PFPA (g)	30 DAP	Massa da parte aérea após secagem em estufa de circulação de ar forçado até peso constante, expressa em gramas
Peso seco da parte aérea	PSPA (g)	30 DAP	Massa fresca do sistema radicular, obtida imediatamente após a lavagem e remoção do substrato, determinada em balança analítica
Peso fresco das raízes	PFR (g)	30 DAP	Massa seca do sistema radicular após secagem em estufa de circulação de ar forçado até peso constante
Peso seco das raízes	PSR (g)	30 DAP	

2.4. Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando identificado efeito significativo pelo teste F, as médias foram comparadas pelo teste de agrupamento de Scott–Knott, adotando-se nível de significância de 5% ($p \leq 0,05$). As análises referentes aos Experimentos 1 e 2 foram conduzidas em delineamento inteiramente casualizado (DIC), enquanto o Experimento 3 foi analisado em delineamento em blocos casualizados (DBC). As análises estatísticas foram realizadas no software R (versão 4.4.1), utilizando os pacotes *AgroR* (SHIMIZU; MARUBAYASHI; GONÇALVES, 2023) e *ExpDes* (FERREIRA; CAVALCANTI; NOGUEIRA, 2018).

3. RESULTADOS

3.1. Propriedades funcionais de matrizes biopoliméricas para encapsulamento de gemas

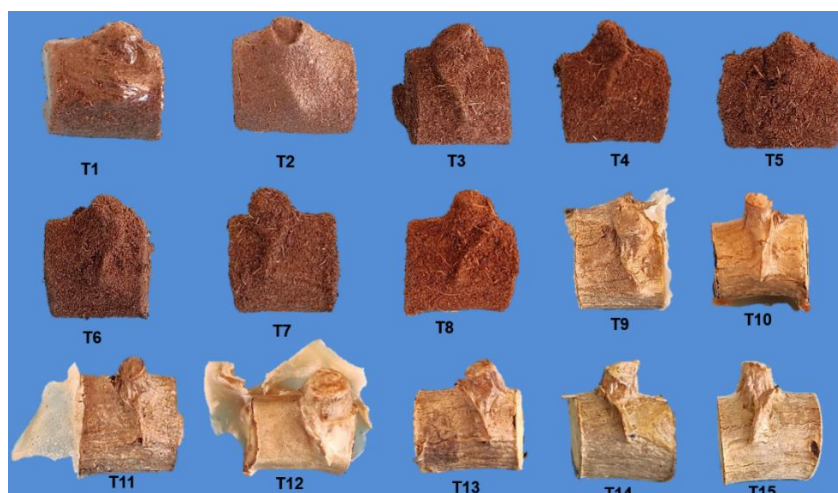
A avaliação preliminar de quinze formulações (Figura 2) revelou que a capacidade de formar um revestimento contínuo e aderente à superfície da gema foi altamente dependente da natureza e sinergia dos componentes. A análise de variância (ANOVA) demonstrou efeito altamente significativo dos tratamentos ($p \leq 0,001$) sobre a eficiência de cobertura, o comportamento reológico e a capacidade de absorção de água (Tabela 7), confirmando que a arquitetura da matriz polimérica é um fator determinante primário para a funcionalidade da semente sintética.

Tabela 7. Análise de variância para as características de cobertura, propriedades reológicas e absorção de água dos filmes biopoliméricos utilizados no encapsulamento de gemas maduras de mandioca.

FV	GL	Cobertura	Reológico	Absorção
Tratamento	9	7,6964e+03 ***	190,59 ***	19,19 ***
Resíduo	312	3,17E-26	1,24	0,0878
CV (%)		0,01	5,89	11,15

*** significativo a 0,1% de probabilidade pelo teste F.

Figura 2. Aspecto das gemas encapsuladas nas formulações biopoliméricas avaliadas.

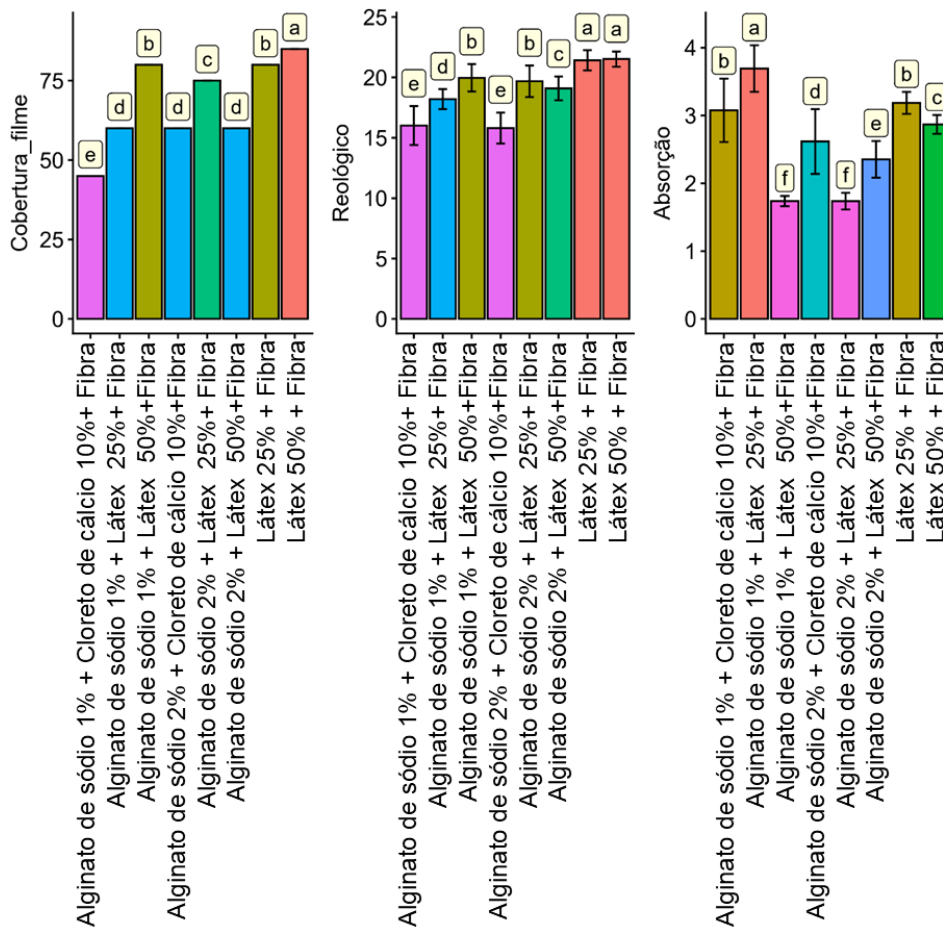


Fonte: Elaboração própria. Tratamentos: T1 Alginato de sódio a 1% + cloreto de cálcio a 10%+ Fibra; T2 Alginato de sódio a 2% + cloreto de cálcio a 10%+Fibra; T3 Alginato de sódio a 1% / látex a 25%+ Fibra; T4 Alginato de sódio a 1% / látex a 50%+Fibra; T5 Alginato de sódio a 2% / látex a 25%+ Fibra; T6 Alginato de sódio a 2% / látex a 50%+Fibra; T7 Alginato de sódio a 1% + látex a 25%; T8 Alginato de sódio a 1%+ látex a 50%; T9 Alginato de sódio a 2% + látex a 25%; T10 Alginato de sódio a 2%+ látex a 50%; T11 Látex 25% + Fibra; T12 Látex 50% + fibra; T13 Látex 25%; T14 Látex 50% ; T15 Controle (gemas s/ cobertura).

3.1.1. Eficiência de cobertura e integridade do filme

A formação de um filme íntegro é um pré-requisito para a proteção física da unidade propagativa. As formulações Látex 50% + Fibra (T12) e Látex 25% + Fibra (T11) apresentaram as maiores eficiências de cobertura, atingindo 85% e 80%, respectivamente, classificadas como "muito eficientes" (Nota 5) na escala visual ordinal utilizada (Figura 3). Este desempenho superior está alinhado com a capacidade do látex natural de formar filmes coesos e elásticos. A presença da fibra de coco atuou sinergicamente, conferindo reforço mecânico e mitigando a fissuração, como observado em compósitos semelhantes.

Figura 3. Desempenho comparativo das formulações biopoliméricas selecionadas quanto à eficiência de cobertura (%), força reológica (N) e porcentagem de absorção de água (%). Barras seguidas pela mesma letra minúscula dentro de cada parâmetro não diferem estatisticamente pelo teste de agrupamento de Scott-Knott a 5% de probabilidade.



Formulações híbridas de alginato e látex associadas à fibra (T3, T4, T5, T6) apresentaram eficiência de cobertura intermediária (60–80%). Em contraste,

formulações contendo alginato de sódio (1% ou 2%) reticuladas com CaCl_2 (T1, T2) produziram revestimentos com menor uniformidade (45–58%) e maior suscetibilidade a falhas estruturais (Figura 3). Esse fenômeno pode ser atribuído à rápida gelificação iônica do alginato, que pode levar à formação de géis com heterogeneidades estruturais e tensões internas, comprometendo a adesão à superfície complexa da gema. Formulações sem fibra ou com alta concentração de alginato sem agente reticulante eficaz (T7 a T10, T13, T14) não formaram películas aderentes, resultando em escoamento total e sendo, portanto, descartadas para etapas subsequentes.

3.1.2. Comportamento reológico e resistência mecânica

A resistência mecânica, avaliada por ensaio de penetração, foi significativamente modulada pela natureza dos biopolímeros. As formulações Látex 50% + Fibra (21,52 N) e Látex 25% + Fibra (21,42 N) apresentaram os maiores valores de força máxima (Figura 3), indicando a formação de redes tridimensionais com elevada elasticidade e resistência à deformação. Esta propriedade é intrínseca aos filmes de látex, que possuem cadeias poliméricas capazes de dissipar energia mecânica através de sua extensibilidade. A fibra de coco, atuando como carga de reforço, contribuiu para limitar a propagação de trincas, aumentando a tenacidade do compósito.

Matrizes combinando alginato e látex exibiram valores de resistência intermediários (18,2–20,0 N), refletindo um equilíbrio entre a rigidez conferida pelo hidrogel de alginato e a elasticidade do látex. Em contraste, as formulações baseadas em alginato reticulado com CaCl_2 apresentaram as menores resistências mecânicas (15,8–16,0 N). A reticulação iônica intensa do alginato, embora confira rigidez, pode resultar em estruturas mais frágeis e menos resistentes a cargas pontuais.

3.1.3. Capacidade de absorção hídrica

A análise de variância indicou efeito significativo dos tratamentos sobre a absorção de água ($p \leq 0,001$) (Tabela 7), evidenciando diferenças marcantes entre as matrizes poliméricas avaliadas. A maior afinidade hídrica foi observada na formulação Alginato 1% + Látex 25% + Fibra (3,69%), seguida por Alginato 1%

+ CaCl₂ 10% + Fibra (3,07%) (Figura 3). Este comportamento é atribuído à natureza altamente hidrofílica do alginato, cujos grupos carboxila livres interagem fortemente com moléculas de água, promovendo o inchamento da matriz.

Formulações constituídas exclusivamente por Látex e Fibra (Alginato de sódio 1% + Látex 25% + Fibra, Alginato de sódio 1% + Cloreto de Cálcio 10% + Fibra, Látex 25% + Fibra e Látex 50% + Fibra) apresentaram valores de absorção moderados (2,86–3,18%), corroborando o caráter hidrofóbico do látex, que atua como uma barreira parcial à difusão de água. A presença do agente reticulante CaCl₂ em combinação com alginato resultou em valores intermediários (2,5–3,0%), sugerindo que a rede polimérica mais organizada e compacta limita a mobilidade das cadeias e a penetração de água.

3.2. Caracterização estrutural e estabilidade físico-química dos filmes

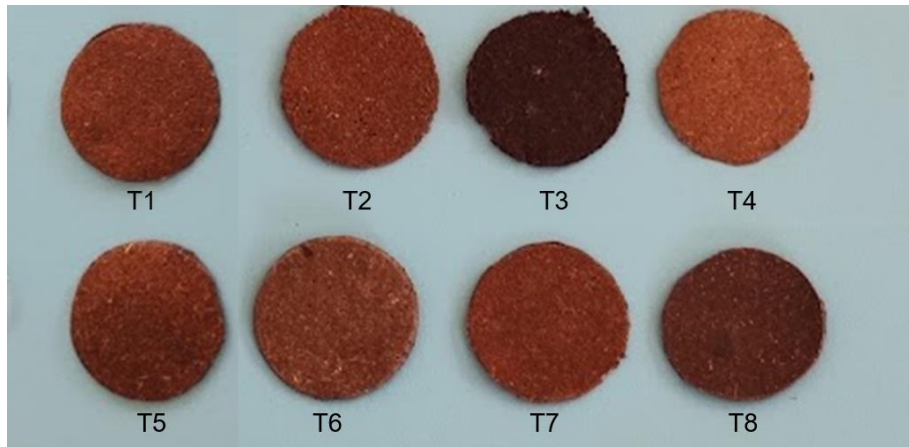
A análise das propriedades físico-estruturais dos filmes evidenciou que a interação entre alginato, látex, fibra de coco e CaCl₂ modulou de maneira significativa os parâmetros de umidade, hidratação, solubilidade e biodegradabilidade (Figura 4). Em todos os casos, a ANOVA indicou diferenças significativas entre as formulações ($p \leq 0,001$) (Tabela 8), demonstrando que pequenas variações na composição dos biopolímeros alteram o comportamento físico-químico dos filmes.

Tabela 8. Análise de variância das propriedades estruturais dos filmes biopoliméricos, para as características UMD (Umidade); HDT(Hidratação); SLD (Solubilidade); BDG (Biodegradabilidade).

FV	GL	UMD	HDT	SLD	BDG
Tratamento	7	3.86 ns	0.082***	386.55 ***	0.19 ***
Resíduo	32	4.94	0.009	4.31	0.003
CV (%)	—	2,24	0,10	2,26	0,06

ns = não significativo; *** significativo a 0,1% de probabilidade pelo teste F.

Figura 4. Aspecto dos filmes biopoliméricos utilizados na formulação de sementes sintéticas de mandioca.



T1 (Alginato de sódio a 1% + cloreto de cálcio a 10%+Fibra); T2; (Alginato de sódio a 2% + cloreto de cálcio a 10%+Fibra); T3 (Alginato de sódio a 1% / látex a 25%+ Fibra); T4 (Alginato de sódio a 1% / látex a 50%+Fibra) T5 (Alginato de sódio a 2% / látex a 25%+ Fibra); T6 (Alginato de sódio a 2% + látex a 50%+Fibra); T7 (Látex 25% + Fibra);T8 (Látex 50% + Fibra).

3.2.1. Propriedades hídricas dos filmes biopoliméricos

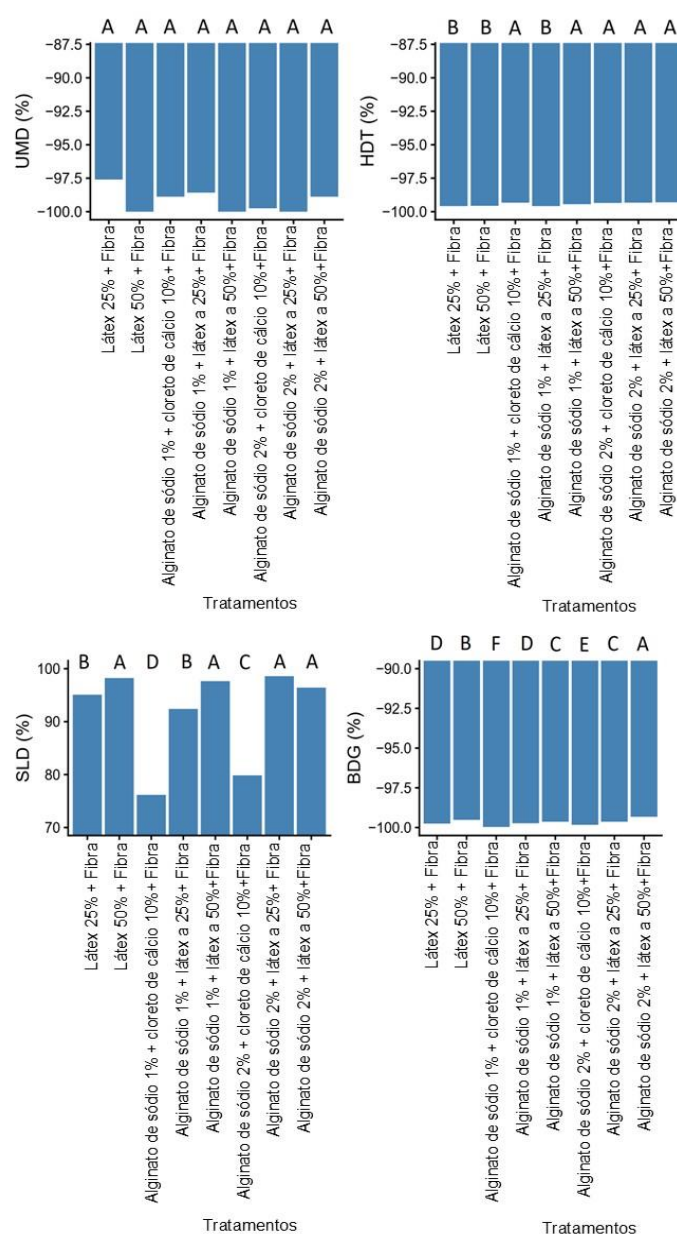
As propriedades hídricas dos filmes biopoliméricos foram avaliadas por meio da determinação do teor de umidade (UMD) e do índice de hidratação (HDT) (Tabela 8; Figura 5). Não foram observadas diferenças significativas entre as formulações quanto ao teor de umidade dos filmes após o período de condicionamento ($p > 0,05$). Conseqüentemente, não houve formação de grupos distintos pelo teste de Scott-Knott para essa variável. Os valores de UMD mantiveram-se próximos entre os tratamentos, variando aproximadamente de -97,5%, registrado na formulação Látex 25% + Fibra, até -100,0%, observado em Látex 50% + Fibra.

Em contraste, o índice de hidratação (HDT) foi significativamente influenciado pela composição das matrizes poliméricas ($p \leq 0,001$), o que evidencia elevada sensibilidade do parâmetro às diferenças estruturais entre as formulações. As matrizes constituídas exclusivamente por látex natural associado à fibra de coco apresentaram os valores mais negativos de HDT, próximos de -99,5% a -100,0%, indicando baixa capacidade de absorção de água e predominância de perda líquida de massa durante o ensaio. Por sua vez, as formulações contendo alginato de sódio, associadas ou não ao látex, exibiram valores de HDT ligeiramente menos negativos, variando aproximadamente entre -98,5% e -99,6%. Esses resultados indicam maior afinidade hídrica e maior

retenção relativa de massa, atribuídas à presença do alginato, um polissacarídeo hidrofílico rico em grupos carboxílicos capazes de estabelecer interações com moléculas de água e promover intumescimento da matriz polimérica.

Os valores negativos observados para o índice de hidratação em todas as formulações indicam que a perda de massa para o solvente superou o ganho por absorção de água, sugerindo solubilização parcial de componentes ou liberação de frações fracamente ligadas à rede polimérica.

Figura 5. Desempenho comparativo das formulações biopoliméricas nos parâmetros de UMD (Umidade); HDT (Hidratação); SLD (Solubilidade); BDG (Biodegradação).



3.2.2. Solubilidade em Água

A solubilidade em água foi bastante influenciada pela presença de agentes reticulantes, considerando que existência de diferenças significativas entre os tratamentos ($p \leq 0,001$; $CV = 2,26\%$) (Tabela 8). Formulações como Látex 50% + Fibra (98,22%) e Alginato 2% + Látex 25% + Fibra (98,58%) apresentaram as maiores taxas de solubilidade (Figura 5). Por outro lado, as formulações Alginato 1% + CaCl_2 10% + Fibra (76,17%) e Alginato 2% + CaCl_2 10% + Fibra (79,85%) exibiram as menores solubilidades. A drástica redução na solubilidade pode ser um efeito direto da reticulação iônica promovida pelos íons Ca^{2+} , que formam pontes estáveis entre as cadeias de guluronato do alginato (modelo "egg-box"), criando uma rede tridimensional coesa e insolúvel em água.

3.2.3. Biodegradabilidade em substrato

Os tratamentos também diferiram para a característica biodegradação em substrato ($p \leq 0,001$) (Tabela 8). A taxa de degradação no solo foi inversamente correlacionada com o caráter hidrofóbico da matriz. Formulações ricas em Látex (Látex 25/50% + Fibra) mostraram os menores índices de biodegradação (aproximadamente -99,5% a -99,7%), denotando alta estabilidade (Figura 5).

As formulações alginato 1% + látex 25% + Fibra; alginato 1% + látex 50% + Fibra; e alginato 2% + látex 25% + Fibra, apresentaram desempenho moderado de biodegradação (variação entre -91,5% a -93,0%). O efeito da adição de alginato, especialmente nas concentrações mais altas, diminuiu a estabilidade dos filmes. As formulações contendo apenas alginato de sódio+ fibra, associadas ao CaCl_2 apresentaram os maiores índices de biodegradação (variação entre -95,0% a -100,0%). De forma geral, os resultados indicam que as matrizes mais hidrofóbicas, com maior concentração de látex, são mais resistentes à biodegradação, enquanto as matrizes à base de alginato, especialmente em combinação com CaCl_2 , são mais propensas à degradação biológica.

3.3. Desempenho agrônômico *ex vitro* das sementes sintéticas

A avaliação final do estabelecimento e crescimento de plântulas demonstrou que a funcionalidade fisiológica da semente sintética é diretamente

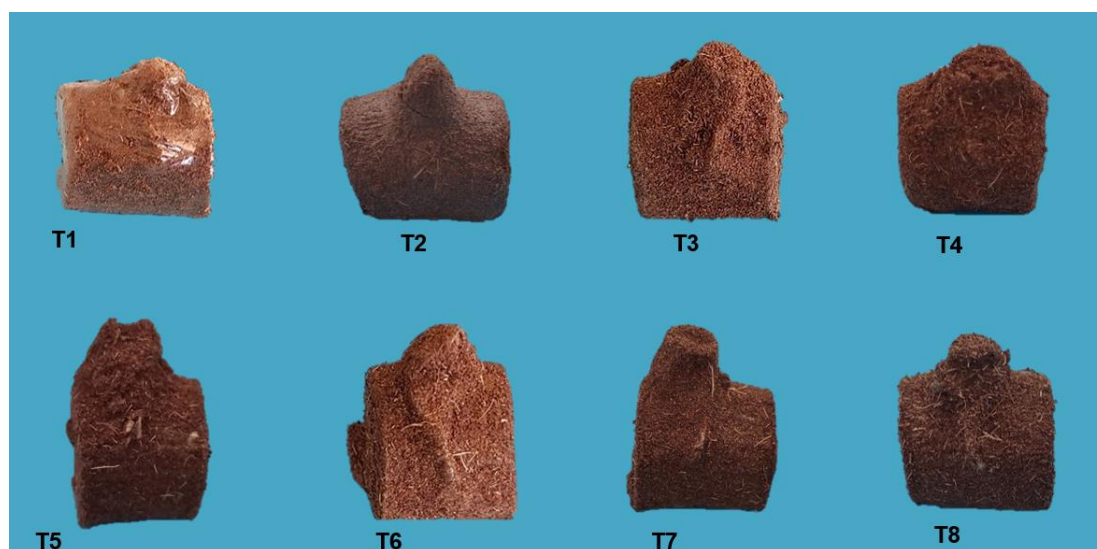
governada pelas propriedades da matriz. A ANOVA revelou efeitos altamente significativos ($p < 0,001$) dos tratamentos para todos os parâmetros morfofisiológicos avaliados (Tabela 9). Esse comportamento também pode ser visualizado na Figura 6, que apresenta as gemas encapsuladas com as diferentes formulações biopoliméricas, evidenciando as variações estruturais entre os revestimentos.

Tabela 9. Análises de variância para as características morfológicas em gemas únicas de mandioca submetidas a diferentes formulações de encapsulamento.

FV	GL	Germ	AP	DC	Vigor	PFRA	MSRA	MFPA	MSPA
Tratamento	5	1712.78***	1.88***	0.35**	2.28***	40.12***	2.01***	36.19***	1.73***
Bloco	3	17.20ns	0.12120ns	0.08040ns	0.05009ns	0.419*	0.00374ns	0.316ns	0.00153ns
Resíduo	11	27.62	0.14137	0.05806	0.06144	0.083	0.00591	0.243	0.0044
CV (%)		11,68	10,11	8,93	8,95	5,84	9,27	10,06	7,80

ns = não significativo; * = $p < 0,05$; ** = $p < 0,01$; *** = $p < 0,001$) Germ= Germinação; AP= Altura da Planta; DC= Diâmetro do caule; MFPA = massa fresca da parte aérea; MSPA = massa seca da parte aérea; MFRA = massa fresca de raízes; MSRA = massa seca de raízes.

Figura 6. Formulações biopoliméricas aplicadas ao encapsulamento de gemas maduras de mandioca.



Fonte: Elaboração própria. T1 (Alginato de sódio a 1% + cloreto de cálcio a 10%+ Fibra); T2; (Alginato de sódio a 2% + cloreto de cálcio a 10%+Fibra); T3 (Alginato de sódio a 1% / látex a 25%+ Fibra); T4 (Alginato de sódio a 1% / látex a 50%+Fibra) T5 (Alginato de sódio a 2% / látex a 25%+ Fibra); T6 (Alginato de sódio a 2% + látex a 50%+Fibra); T7 (Látex 25% + Fibra);T8 (Látex 50% + Fibra).

3.3.1. Germinação e vigor

As taxas de germinação e o vigor das plântulas foram afetados pela natureza do encapsulamento. O Controle (gemas não tratadas) atingiu a máxima germinação (65%) e vigor (4,0). Desempenho estatisticamente equivalente foi

alcançado pelas formulações Látex 50% + Fibra (62%; vigor 3,9) e Látex 25% + Fibra (60%; vigor 3,7) (Figuras 7 e 8). Este resultado evidencia que matrizes flexíveis e porosas, baseadas em látex e fibra, criam um microambiente que não impede as trocas gasosas essenciais (O_2/CO_2) nem a hidratação inicial da gema.

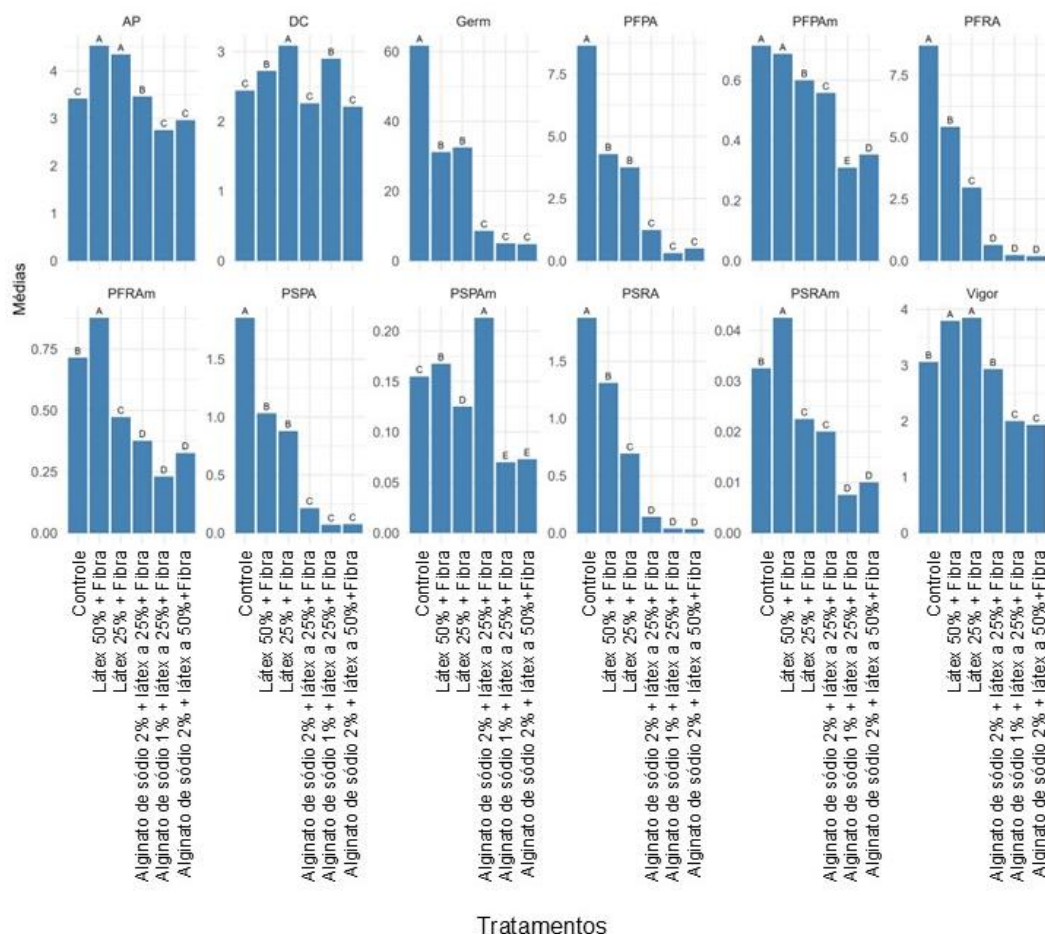
A inclusão de alginato na matriz introduziu uma restrição gradativa. A formulação Alginato 1% + Látex 25% + Fibra apresentou germinação intermediária (45%) e vigor reduzido (2,8) (Figura 8). As formulações com Alginato a 2%, independentemente da presença de látex, resultaram nas piores performances, com germinação entre 18–20% e vigor mínimo ($\approx 1,0$).

Figura 7. Germinação de gemas de mandioca sob diferentes formulações de encapsulamento biopolimérico.



T3 (Alginato de sódio a 1% / látex a 25%+ Fibra); T5 (Alginato de sódio a 2% / látex a 25%+ Fibra); T6 (Alginato de sódio a 2% + látex a 50%+Fibra); T7 (Látex 25% + Fibra); T8 (Látex 50% + Fibra).

Figura 8. Síntese do desempenho fisiológico das gemas encapsuladas em diferentes formulações biopoliméricas para as características Germ= Germinação; AP= Altura da Planta; DC= Diâmetro do caule; MFPA = massa fresca da parte aérea; MSPA = massa seca da parte aérea; MFRA = massa fresca de raízes; MSRA = massa seca de raízes.



3.3.2. Crescimento vegetativo e alocação de biomassa em plântulas oriundas de sementes sintéticas

O crescimento vegetativo e o acúmulo de biomassa das plântulas de mandioca foram influenciados pela composição e pela rigidez das matrizes encapsulantes, acompanhando o mesmo padrão observado para germinação e vigor. A análise de variância revelou efeito altamente significativo dos tratamentos para todas as variáveis morfofisiológicas avaliadas ($p < 0,001$), enquanto o efeito de blocos foi não significativo, indicando que as diferenças observadas derivam exclusivamente das propriedades físicas e estruturais dos encapsulantes (Tabela 9).

A altura média das plântulas não diferiu estatisticamente entre o controle (4,6 cm) e as formulações à base de látex associadas à fibra de coco, com valores de 4,5 cm para Látex 50% + Fibra e 4,3 cm para Látex 25% + Fibra (Figura 8), e portanto, não houveram restrições mecânicas relevantes à emergência e ao alongamento inicial do eixo caulinar, permitindo um crescimento equivalente ao material não encapsulado. Por outro lado, a inclusão de alginato de sódio resultou em redução progressiva da altura das plântulas. A formulação (Alginato 1% + Látex 25% + Fibra) apresentou crescimento moderado (3,4 cm), enquanto as formulações contendo alginato a 2% registraram as menores alturas de planta (variação entre 2,7 e 2,8 cm). Tendência semelhante foi observada para o diâmetro do caule, com valores máximos no controle (3,1 mm) e nos tratamentos Látex 50% + Fibra (3,0 mm) e Látex 25% + Fibra (2,8 mm), e reduções acentuadas nos tratamentos com alginato (2,4 mm para 1% e 2,0–2,1 mm para 2%).

Em relação ao acúmulo de biomassa da parte aérea (MFPA) os valores elevados e estatisticamente semelhantes no controle (8,0 g), Látex 50% + Fibra (7,8 g) e Látex 25% + Fibra (6,9 g), evidenciando que essas formulações mantiveram condições fisiológicas adequadas para o crescimento vegetativo (Tabela 9; Figura 8). A introdução de alginato a 1% reduziu a MFPA para 5,0 g, enquanto as formulações com alginato a 2% resultaram em reduções severas, com valores entre 1,2 e 1,5 g. A massa seca da parte aérea (MSPA) seguiu o mesmo padrão, com maiores valores no controle (1,8 g) e nos tratamentos à base de látex (1,7 g e 1,5 g), redução moderada no tratamento com alginato a 1% (1,1 g) e valores mínimos nas formulações com 2% de alginato (0,3–0,4 g).

Em termos de desenvolvimento radicular e acúmulo de biomassa das raízes, as maiores massas frescas de raízes (MFRA) foram observadas no controle (8,2 g) e no tratamento Látex 50% + Fibra (7,9 g), seguidos pelo Látex 25% + Fibra (7,0 g). A massa seca de raízes (MSRA) apresentou valores equivalentes nesses tratamentos (1,4–1,6 g), indicando pleno desenvolvimento radicular (Figura 8). Em contraste, o aumento da concentração de alginato resultou em redução acentuada do crescimento radicular. A formulação intermediária (Alginato 1% + Látex 25% + Fibra) apresentou valores médios de MFRA e MSRA de 4,2 g e 0,9 g, respectivamente, enquanto as formulações com alginato a 2% registraram os menores valores (MFRA entre 1,0 e 1,2 g; MSRA entre 0,2 e 0,3 g). Esse padrão evidencia que cápsulas mais densas e rígidas

limitam a aeração, a hidratação e a expansão das estruturas subterrâneas, restringindo severamente o estabelecimento inicial do sistema radicular.

3.3.3. Eficiência fisiológica por plântula individual

A análise de variância confirmou efeito altamente significativo dos tratamentos sobre todas as variáveis de biomassa avaliadas ($p < 0,001$) (Tabela 10). Os coeficientes de variação observados foram compatíveis com experimentos envolvendo plântulas em estágios iniciais de desenvolvimento, especialmente para variáveis radiculares, que são reconhecidamente mais sensíveis a alterações microambientais. A análise da eficiência fisiológica por plântula germinada evidenciou que os efeitos dos encapsulantes sobre o desempenho inicial das sementes sintéticas de mandioca não se restringiram às taxas de germinação, mas impactaram diretamente o crescimento e a alocação de biomassa em nível individual. A correção das variáveis biométricas pelo número de plântulas emergidas permitiu isolar efeitos intrínsecos do microambiente físico imposto pela matriz encapsulante, revelando limitações estruturais e fisiológicas associadas à composição e à concentração dos biopolímeros utilizados (Tabela 10; Figura 8).

Tabela 10. Análise de variância para características de biomassa médio por planta em sementes sintéticas biopoliméricas de mandioca.

FV	GL	MFRAm	MSRAm	MFPAm	MSPAm
Tratamento	5	0.22***	0.00 ^{e-3} ***	0.10***	0.01***
Bloco	3	0.02ns	0.00 ^{e-5} ns	0.02ns	0.00 ^{e-4} ns
Resíduo	11	0.01	4.35 ^{e-5}	0.01	0.00 ^{e-3}
CV (%)		20.42	30.47	17.9	9.63

ns = não significativo; *** = $p < 0,001$. MFPAm- Massa Fresca da Parte Aérea médio; MSPAm- Massa Seca da Parte Aérea médio; MFRAm- Massa Fresca da Raiz Médio; MSRAm- Massa Seca da Raiz médio.

A massa fresca média da parte aérea por plântula (MFPAm) apresentou ampla variação entre os tratamentos, com valores máximos no controle (0,125 g plântula⁻¹) e reduções progressivas associadas ao aumento da proporção de alginato na formulação. As formulações à base de látex e fibra mantiveram valores elevados e estatisticamente equivalentes ao controle, com 0,120 g plântula⁻¹ no

tratamento Látex 50% + Fibra e 0,110 g plântula⁻¹ no tratamento Látex 25% + Fibra. Em contraste, o tratamento intermediário contendo alginato a 1% resultou em valor reduzido de MFPAm (0,080 g plântula⁻¹), enquanto as formulações com alginato a 2% apresentaram as menores médias (0,040–0,050 g plântula⁻¹), evidenciando forte limitação ao crescimento da parte aérea.

Esse padrão foi corroborado pela massa seca média da parte aérea por plântula (MSPAm), variável diretamente associada à síntese e ao acúmulo de biomassa estrutural. Os maiores valores de MSPAm foram registrados no controle (0,028 g plântula⁻¹) e nos tratamentos com látex associado à fibra (0,025–0,027 g plântula⁻¹), refletindo um crescimento vigoroso e eficiente em termos de deposição de matéria seca. A presença de alginato a 1% reduziu esse valor para 0,018 g plântula⁻¹, enquanto as formulações com 2% de alginato resultaram em valores mínimos de 0,009–0,010 g plântula⁻¹, indicando severa restrição metabólica e estrutural ao crescimento inicial.

Resultados similares foram observados para a biomassa radicular média por plântula. O controle e os tratamentos formulados com látex e fibra apresentaram os maiores valores de massa fresca de raízes (MFRAm), variando de 0,115 a 0,128 g plântula⁻¹, com perdas relativas inferiores a 12% em relação ao material não encapsulado. A massa seca média das raízes (MSRAm) seguiu o mesmo padrão, com valores entre 0,023 e 0,024 g plântula⁻¹, indicando manutenção da eficiência de crescimento e da deposição de biomassa estrutural subterrânea nessas formulações (Figura 8).

A introdução de alginato promoveu uma redução progressiva da biomassa radicular. O tratamento com alginato a 1% resultou em diminuição aproximada de 37,5% tanto na MFRAm (0,080 g plântula⁻¹) quanto na MSRAm (0,015 g plântula⁻¹), sugerindo comprometimento significativo do estabelecimento radicular. Esse efeito foi ainda mais pronunciado nas formulações contendo 2% de alginato, que apresentaram as menores médias de massa fresca (0,040–0,045 g plântula⁻¹) e seca de raízes (0,008–0,009 g plântula⁻¹), correspondendo a reduções superiores a 60% em relação ao controle (Figura 8).

De modo geral, nossos resultados demonstram que a composição e a concentração dos biopolímeros utilizados na formulação das sementes sintéticas modulam fortemente o crescimento inicial por plântula, influenciando tanto a parte

aérea quanto o sistema radicular. Matrizes mais flexíveis e porosas, resultantes da combinação de látex e fibra, favoreceram a expansão celular, a deposição de biomassa e o equilíbrio entre crescimento aéreo e radicular. Em contraste, o aumento da rigidez estrutural promovido por maiores concentrações de alginato impôs restrições físicas ao desenvolvimento inicial, refletidas em reduções consistentes e significativas das massas fresca e seca por plântula.

4. DISCUSSÃO

4.1. Efeitos estruturais, fisiológicos e funcionais de matrizes biopoliméricas no encapsulamento *ex vitro* de mandioca

Os resultados deste estudo demonstram que a composição e a arquitetura das películas biopoliméricas são determinantes para o desempenho estrutural, fisiológico e funcional de gemas maduras de mandioca encapsuladas, especialmente quando se busca a consolidação de sementes sintéticas viáveis em condições *ex vitro*. Entre as formulações avaliadas, aquelas baseadas na associação entre látex natural e fibra de coco apresentaram o conjunto mais equilibrado de propriedades físico-químicas e biológicas, refletindo-se em maior robustez estrutural, adesão homogênea à superfície da gema, estabilidade hídrica controlada e resistência mecânica compatível com a emergência das plântulas, características consideradas essenciais para sistemas eficientes de encapsulamento vegetal (ADENIYI et al., 2019; BHATIA, 2020; POKHAREL et al., 2022).

A superioridade dessas matrizes híbridas está em consonância com a literatura sobre biocompósitos à base de borracha natural reforçados com fibras vegetais, na qual a incorporação de fibras lignocelulósicas é amplamente reconhecida como estratégia eficaz para melhorar a interação interfacial, redistribuir tensões mecânicas e reduzir a formação de fissuras durante o processo de secagem e uso funcional do material (UJIAN TO; WIDYANINGRUM; WIJAYA, 2017; DEWRI; GNANAMOORTHY, 2024). Esses efeitos estruturais observados em materiais industriais mostram-se particularmente relevantes quando transpostos para aplicações biotecnológicas envolvendo tecidos vivos, como no caso das sementes sintéticas.

A interação sinérgica entre látex e fibra promove não apenas maior adesão, mas também estabilidade térmica e manutenção de porosidade funcional, permitindo a difusão gasosa necessária ao metabolismo da gema sem comprometer a integridade do filme (CHANDRAN et al., 2024; MOORHEAD; FRANCIS, 2025). Resultados semelhantes foram descritos por Santos (2015) em biocompósitos de látex reforçados com fibras de carnaúba, nos quais a redução da densidade aparente e o aumento da porosidade resultaram em materiais mais adequados para aplicações que exigem trocas gasosas controladas, reforçando a aplicabilidade desse tipo de matriz para sistemas de encapsulamento vegetal.

As elevadas taxas de cobertura e a distribuição homogênea do revestimento observadas nas formulações com látex e fibra indicam uma interação favorável entre a matriz polimérica e a superfície da gema, permitindo encapsulamento eficiente sem comprometer eventos fisiológicos iniciais, como hidratação, reativação metabólica e emergência do broto (BARBOZA et al., 2022; SAHU et al., 2025). Esse comportamento é particularmente relevante para a mandioca, uma espécie caracterizada por alta taxa respiratória nos tecidos meristemáticos e elevada sensibilidade a restrições de oxigênio durante os estágios iniciais de desenvolvimento (KONGSIL et al., 2024). Nesse contexto, materiais mais porosos e estruturalmente flexíveis, como os filmes reforçados com fibra vegetal, podem criar um microambiente mais compatível com as exigências fisiológicas da cultura, favorecendo o equilíbrio entre proteção mecânica e difusão gasosa. Imakumbili et al. (2021) demonstraram que a mandioca apresenta crescimento inicial significativamente reduzido sob condições de baixa aeração e disponibilidade hídrica limitada, o que ajuda a explicar a queda de vigor observada em cápsulas excessivamente compactas ou pouco permeáveis.

A exclusão de determinados tratamentos por falha na formação de películas aderentes (alginato + CaCl_2 ; látex a 25% e 50% sem fibra; combinações alginato + látex sem fibra) reforça a importância da fibra vegetal não apenas como elemento de reforço mecânico, mas também como agente promotor de adesão à superfície da gema. A presença da fibra provavelmente reduz a tensão superficial da solução, aumenta a viscosidade efetiva do sistema e favorece a ancoragem física da matriz sobre o tecido vegetal (POKHAREL et al., 2022; CHANDRAN et al., 2024; DEWRI; GNANAMOORTHY, 2024).

Diversos estudos demonstram que a compatibilização entre polímeros hidrofóbicos e fibras vegetais melhora significativamente a coesão interna e a adesão do filme, reforçando o papel estrutural da fibra em sistemas híbridos (UJIANTO; WIDYANINGRUM; WIJAYA, 2017; ADENIYI et al., 2019). No caso do látex natural, cuja estabilidade coloidal depende fortemente de proteínas, lipídios e partículas associadas, a presença da fibra pode atuar como elemento estabilizante adicional, modulando a agregação das partículas e favorecendo a formação de filmes contínuos e funcionais (BERTHELOT et al., 2014; SRIRING et al., 2020; CHENG FANG et al., 2025).

O desempenho superior das películas à base de látex e fibra está diretamente relacionado ao equilíbrio entre componentes hidrofóbicos e hidrofílicos. O látex, devido ao seu caráter hidrofóbico e elevada capacidade filmógena, reduz a permeabilidade superficial e confere maior integridade física às cápsulas, enquanto a fibra de coco atua como reforço estrutural, aumentando a coesão interna e reduzindo a propagação de fissuras durante ciclos de hidratação e secagem (ADENIYI et al., 2019; POKHAREL et al., 2022).

Em contraste, o alginato, um polímero altamente hidrofílico e higroscópico, apresenta comportamento fortemente dependente da concentração e do grau de reticulação iônica. Quando reticulado com Ca^{2+} , forma géis rígidos que, em concentrações elevadas, tornam-se excessivamente compactos e pouco permeáveis (SÁNCHEZ-BALLESTER; BATAILLE; SOULAIROL, 2021; MOURA-ALVES et al., 2023; AHMED; JANASWAMY; YADAV, 2024). No presente estudo, o uso de alginato a 2% resultou em maior absorção de água, intumescimento acentuado e menor uniformidade do revestimento, comprometendo a estabilidade da cápsula e a germinação subsequente (JIMÉNEZ-ARIAS et al., 2022).

Esse comportamento está de acordo com análises reológicas que indicam aumento significativo na densidade de ligações intermoleculares e redução da elasticidade da matriz em concentrações elevadas de alginato, resultando em filmes rígidos e com baixa capacidade de deformação (LÓPEZ-SANTIAGO; CASTILLO, 2025). Assim, os resultados reforçam que a simples presença do biopolímero não garante funcionalidade, sendo o desempenho final dependente das proporções, interações intermoleculares e compatibilidade com a fisiologia da gema (JAVED et al., 2017; AHMAD; SHAHZAD, 2019; SAMPATHKUMAR; TAN; LOO, 2020; IMAKUMBILI et al., 2021; KHAN et al., 2022; SAHU et al., 2025). Além

disso, o uso de biopolímeros como alginato e látex reforça o potencial do encapsulamento como ferramenta estratégica para propagação clonal, conservação de germoplasma e logística de transporte de material propagativo de mandioca, especialmente na forma de gemas únicas maduras, ampliando a aplicabilidade da técnica em sistemas de produção descentralizados (FAISAL; ALATAR, 2019; CAVALIERI POLIZELI et al., 2024).

4.2. Desempenho estrutural e estabilidade físico-química dos filmes biopoliméricos

A análise integrada dos parâmetros estruturais evidenciou uma sinergia funcional entre látex e fibra de coco, resultando em filmes mais estáveis, coesos e com permeabilidade controlada, sem impor barreiras excessivas ao crescimento das plântulas. Essa estabilidade decorre da elevada compatibilidade entre a matriz polimérica e a fibra vegetal, que promove melhor distribuição de tensões mecânicas durante a emergência e reduz falhas estruturais no filme (UJIANTO; WIDYANINGRUM; WIJAYA, 2017; ADENIYI et al., 2019; SAMPATHKUMAR; TAN; LOO, 2020; KHAN et al., 2022; DEWRI; GNANAMOORTHY, 2024; CHANDRAN et al., 2024).

Em contraste, o alginato reticulado com Ca^{2+} forma uma rede tridimensional altamente hidrofílica, com elevada capacidade de retenção de água. Quando utilizado isoladamente ou em concentrações elevadas, mesmo na presença de fibra, origina matrizes rígidas e pouco elásticas, limitando o rearranjo estrutural e explicando os maiores valores de hidratação, solubilidade e biodegradação observados (SÁNCHEZ-BALLESTER; BATAILLE; SOULAIROL, 2021; JIMÉNEZ-ARIAS et al., 2022; AHMED; JANASWAMY; YADAV, 2024).

A incorporação do látex nesses sistemas reduz a mobilidade hídrica interna, preenche microcavidades da matriz iônica e confere elasticidade ao sistema, enquanto a fibra reforça a arquitetura estrutural e aumenta a coesão geral (ADENIYI et al., 2019; BHATIA, 2020; POKHAREL et al., 2022). Filmes com esse perfil também são amplamente descritos em sistemas biodegradáveis utilizados em preservação pós-colheita, nos quais o equilíbrio entre integridade estrutural e permeabilidade é determinante para o desempenho funcional (BARBOZA et al., 2022; MOORHEAD; FRANCIS, 2025). Além disso, o uso do látex confere

vantagens ambientais relevantes, uma vez que se trata de um material renovável, biodegradável e amplamente reconhecido como alternativa sustentável a polímeros sintéticos convencionais (MAGALHÃES et al., 2019; ANTOV et al., 2020).

4.3. Estratégias biopoliméricas mais promissoras para o encapsulamento da mandioca

As formulações à base de látex e fibra apresentaram germinação elevada e vigor próximo ao controle, demonstrando que esses revestimentos oferecem proteção mecânica eficiente sem comprometer a emergência das plântulas (BHATIA, 2020). Esses resultados são coerentes com a fisiologia da mandioca, espécie altamente sensível a restrições de oxigênio e umidade nos tecidos meristemáticos e na zona de crescimento radicular (IMAKUMBILI et al., 2021; SONJAN et al., 2020; KONGSIL et al., 2024).

No presente estudo, observou-se que películas rígidas formadas por altas concentrações de alginato restringiram o crescimento radicular e da parte aérea, refletindo diretamente a limitação fisiológica da planta em acessar água e oxigênio. Em contraste, formulações à base de látex e fibra, com maior flexibilidade e permeabilidade controlada, preservaram um microambiente favorável, permitindo a expansão dos tecidos e o desenvolvimento radicular próximo ao do controle (Figura 9). Portanto formulações à base de látex + fibra, consolidam-se como as mais adequadas para desenvolvimento eficiente da semente sintética de mandioca *ex vitro*, verificados neste estudo.

Estudos indicam que o déficit de oxigênio nas camadas externas de estruturas encapsuladas pode reduzir a atividade metabólica do meristema, limitar a síntese de carboidratos e proteínas essenciais e, conseqüentemente, comprometer a emergência das plântulas (KONGSIL et al., 2024). De forma similar, a restrição de umidade causada por filmes muito densos impede a hidratação dinâmica necessária à expansão celular e à alongação do eixo principal, impactando diretamente o vigor inicial da planta (IMAKUMBILI et al., 2021; SONJAN et al., 2020). De fato, Oliveira et al. (2001) demonstraram que plântulas de mandioca têm dificuldades para emergir e desenvolver-se em solos compactos, indicando que barreiras físicas, mesmo em escala de cápsula ou

substrato, afetam diretamente o estabelecimento inicial da planta. Portanto, os resultados do estudo reforçam a importância de balancear resistência mecânica e permeabilidade hídrica nas matrizes de encapsulamento, garantindo que o revestimento proteja a gema, sem comprometer a disponibilidade de água e oxigênio. Essa abordagem é consistente com o desempenho fisiológico observado em tratamentos com látex e fibra que proporcionaram alta germinação e vigor, enquanto formulações com altas concentrações de alginato limitaram o desenvolvimento inicial devido a barreiras físicas e fisiológicas, confirmando a sensibilidade da mandioca às condições microambientais durante a germinação.

Figura 9. Desempenho da formulação fibra de coco associadas a látex, no desenvolvimento de sementes sintéticas.



Em contraste, as formulações contendo alginato a 2%, mesmo quando associadas ao látex, apresentaram germinação reduzida (18-20%), vigor baixo (1,0) e severo comprometimento do acúmulo de biomassa. A rigidez excessiva criada pela alta concentração de alginato, criou barreiras mecânicas à expansão da parte aérea e dificultou a alongação radicular (JIMÉNEZ-ARIAS et al., 2022; DURGADEVI et al., 2025). A maior densidade da rede polimérica também restringiu hidratação e difusão de oxigênio (SÁNCHEZ-BALLESTER; BATAILLE; SOULAIROL, 2021; KHAN et al., 2022). Esses achados estão de acordo com limitações fisiológicas descritas por Kongsil et al. (2024), reforçando a ineficiência de películas excessivamente rígidas.

4.4. Perspectivas futuras para o desenvolvimento de sementes sintéticas de mandioca

O desenvolvimento de sementes sintéticas de mandioca configura-se como uma estratégia biotecnológica promissora para superar limitações históricas da propagação vegetativa dessa cultura, especialmente a baixa taxa multiplicativa, as restrições logísticas e os riscos fitossanitários associados ao uso de estacas. Tradicionalmente, a multiplicação da mandioca apresenta eficiência limitada, em torno de 1:10 por ciclo anual, o que dificulta a rápida disseminação de genótipos superiores oriundos de programas de melhoramento, sobretudo em regiões remotas (SHIJI et al., 2014). Nesse contexto, a tecnologia de sementes sintéticas surge como alternativa capaz de gerar unidades propagativas padronizadas, compactas e potencialmente livres de patógenos, facilitando o intercâmbio seguro de germoplasma e a ampliação da taxa multiplicativa.

Os resultados do presente estudo avançam de forma inovadora em relação aos protocolos clássicos descritos para mandioca, como aqueles baseados em explantes *in vitro* encapsulados em alginato de sódio reticulado com CaCl_2 , cuja germinação ocorre majoritariamente em meio de cultura, conforme relatado por Hegde et al. (2017). Diferentemente dessas abordagens, o presente trabalho demonstra, de forma inédita, a viabilidade do uso de gemas maduras encapsuladas para plantio direto em condições *ex vitro* (campo ou casa de vegetação), eliminando a dependência de infraestrutura laboratorial complexa, reduzindo custos operacionais e dispensando mão de obra altamente especializada. Essa simplificação metodológica representa um passo decisivo para a escalabilidade e adoção prática da tecnologia de sementes sintéticas em sistemas produtivos reais.

Do ponto de vista técnico, os resultados indicam que formulações baseadas em biocompósitos de látex natural associado à fibra vegetal constituem a estratégia mais promissora para o encapsulamento *ex vitro* da mandioca. Essas matrizes apresentaram equilíbrio superior entre resistência mecânica, flexibilidade estrutural e permeabilidade hídrica e gasosa, criando um microambiente compatível com as exigências fisiológicas da cultura durante a germinação e o estabelecimento inicial. A maior germinação e o vigor próximo ao controle observados nesses tratamentos reforçam que a combinação de materiais

hidrofóbicos e fibras lignocelulósicas permite proteger a gema sem impor barreiras físicas excessivas à difusão de água e oxigênio, aspecto crítico para a mandioca.

As perspectivas futuras incluem o refinamento dessas matrizes biopoliméricas, explorando a incorporação controlada de nutrientes, reguladores de crescimento ou aditivos bioativos que ampliem a viabilidade, o vigor e a uniformidade das plântulas emergidas diretamente no solo. Além disso, o desenvolvimento de protocolos de armazenamento de curto a médio prazo, compatíveis com essas formulações, poderá viabilizar o intercâmbio nacional e internacional de germoplasma com maior segurança fitossanitária e flexibilidade logística. Por fim, a automatização dos processos de encapsulamento e a validação do desempenho das sementes sintéticas em diferentes condições edafoclimáticas poderão ampliar significativamente a taxa multiplicativa da mandioca, integrando essa tecnologia aos programas de melhoramento, conservação e produção comercial de forma sustentável e eficiente.

5. CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou que a matriz biopolimérica é determinante para o desenvolvimento de sementes sintéticas funcionais de mandioca em condições *ex vitro*, influenciando diretamente o desempenho estrutural dos filmes e a resposta fisiológica das gemas encapsuladas. Entre as formulações avaliadas, os revestimentos à base de látex natural associado à fibra de coco apresentaram o melhor equilíbrio entre integridade física, aderência, estabilidade hídrica e permeabilidade, resultando em matrizes robustas e funcionalmente compatíveis com a emergência das plântulas.

Os tratamentos Látex 25% + Fibra e Látex 50% + Fibra apresentaram elevados índices de germinação e vigor, próximos ao controle, evidenciando que essa combinação promove um microambiente equilibrado entre proteção mecânica e difusão adequada de água e oxigênio. O látex contribuiu para a estabilidade estrutural e redução de oscilações hídricas, enquanto a fibra de coco atuou como reforço mecânico e agente promotor de porosidade, evitando a compactação excessiva da matriz. Em contraste, as formulações com alginato de sódio a 2% mostraram-se excessivamente rígidas, restringindo a expansão tecidual e a difusão gasosa, o que comprometeu a germinação e o vigor das

gemas. De modo geral, os resultados indicam que o sucesso da tecnologia de sementes sintéticas depende do balanceamento entre resistência mecânica e permeabilidade fisiológica, consolidando o biocompósito látex–fibra de coco como alternativa promissora, sustentável e aplicável para a propagação clonal e conservação de germoplasma de mandioca em condições *ex vitro*.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADENIYI, A. G.; ONIFADE, D. V.; IGHALO, J. O.; ADEOYE, A. S. A review of coir fiber reinforced polymer composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 176, p. 107305, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107305>.

AGUIRRE, M.; HAMZEHLU, S.; GONZALEZ, E.; LEIZA, J. Renewable feedstocks in emulsion polymerization: coating and adhesive applications. In: **Advances in Chemical Engineering**. v. 56. [S.I.]: Elsevier, 2020. p. 139–186. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.ache.2020.07.004>.

AHMAD, Z.; SHAHZAD, A. Cash crops: synseed production, propagation, and conservation. In: **Synthetic Seeds**. Cham: Springer, 2019. p. 217–231. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-24631-0_8.

AHMED, S.; JANASWAMY, S.; YADAV, M. P. Biodegradable films from lignocellulosic fibers of wheat straw biomass and effect of calcium ions. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 264, p. 130601, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130601>.

ANTOV, P.; SAVOV, V.; NEYKOV, N. Sustainable bio-based adhesives for eco-friendly wood composites: a review. **Wood Research**, v. 65, n. 1, p. 51–62, 2020. DOI: <https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/65.1.051062>.

BARBOZA, H. T. G. et al. Filmes e revestimentos comestíveis: conceito, aplicação e uso na pós-colheita de frutas, legumes e vegetais. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 9, e9911931418, 2022. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i9.31418>.

BERTHELOT, K.; LECOMTE, S.; ESTEVEZ, Y.; PERUCH, F. Hevea brasiliensis REF and SRPP: an overview on rubber particle proteins. **Biochimie**, v. 106, p. 1–9, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2014.07.002>.

BHATIA, M. Application of encapsulation in agricultural processes. In: **Encapsulation of Active Molecules and Their Delivery System**. Amsterdam: Elsevier, 2020. p. 131–140. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819363-1.00008-9>.

CEBALLOS, H. et al. Cassava. In: BRADSHAW, J. E. (ed.). **Root and Tuber Crops**. New York: Springer, 2010. p. 53–96. DOI: https://doi.org/10.1007/978-0-387-92765-7_2.

CEEDS, J. I. The sugarcane synthetic seed production system (CEEDS™) in Brazil. **New Energy Farms**, 2023. Disponível em: <https://newenergyfarms.com/the-sugarcane-synthetic-seed-production-system-ceeds-in-brazil/>.

CHANDRAN, L.; IRANIOSE, D.; THANKACHAN, A.; KUMAR, H.; VAIBHAV, S.; JAYA, V.; BALAN, K. Effect of latex content on morphological behaviour of coir-latex composite. **Materials Circular Economy**, v. 6, p. 41, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42824-024-00126-9>.

DEWRI, S. P.; GNANAMOORTHY, R. Surface modification of coconut fibers: latex coating. In: **Natural Fiber Composites**. [S.l.]: Springer, 2024. p. 245–255. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-5963-7_17.

DURGADEVI, P.; GIRIGOSWAMI, K.; GIRIGOSWAMI, A. Biodegradable nanomaterials in boosting seed vigor and germination: seed coating towards sustainability. **Discover Applied Sciences**, v. 7, n. 7, p. 695, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06737-4>.

FANG, C. et al. Synthesis, characterization, and properties of bio-based polyacrylate latex pressure sensitive adhesives. **Macromolecular Chemistry and Physics**, v. 226, n. 17, e00134, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1002/macp.202500134>.

FAO. Statistics. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, 2023. Disponível em: <http://www.fao.org/statistics/en>.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. ExpDes: Experimental Designs Package (version 1.2.2). **CRAN Repository**, 2021. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/ExpDes/index.html>.

HEGDE, V.; MAKESHKUMAR, T.; SHEELA, M. N.; CHANDRA, C. V.; KOUNDINYA, A. V. V.; ANIL, S. R.; MUTHURAJ, R.; DARSHAN, S. Production of synthetic seed in cassava (*Manihot esculenta* Crantz). **Journal of Root Crops**, v. 42, n. 2, p. 5–9, 2017. Disponível em: <https://journal.isrc.in/index.php/jrc/article/view/407>.

IMAKUMBILI, M. et al. Managing cassava growth on nutrient poor soils under different water stress conditions. **Scientific Reports**, v. 7, n. 6, e07331, 2021. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34195433/>.

JAVED, S.; ALATAR, A. A.; ANIS, M.; FAISAL, M. Synthetic seeds production and germination studies for short-term storage and long-distance transport of *Erythrina variegata* L.: A multipurpose tree legume. **Industrial Crops and Products**, v. 105, p. 41–46, 2017. DOI: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:90445271>

JÍMENEZ-ARIAS, D. et al. Encapsulation with natural polymers to improve properties of biostimulants in agriculture. **Plants**, v. 12, n. 1, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/12/1/55>.

KHAN, F.; ATIF, M.; HASEEN, M.; KAMAL, S.; KHAN, M. S.; SHAHID, S.; NAMI, S. A. A. Synthesis, classification and properties of hydrogels: Their applications in

drug delivery and agriculture. **Journal of Materials Chemistry B**, v. 10, p. 170–203, 2022. DOI: [HTTPS://DOI.ORG/10.1039/D1TB01345A](https://doi.org/10.1039/D1TB01345A).

KONGSIL, P.; CEBALLOS, H.; SIRIWAN, W.; VUTTIPONGCHAIKIJ, S.; KITTIPADAKUL, P.; PHUMICHAJ, C.; WANNARAT, W.; KOSITRATANA, W.; VICHUKIT, V.; SAROBOL, E.; ROJANARIDPICHEJ, C. Cassava breeding and cultivation challenges in Thailand: Past, present, and future perspectives. **Plants**, v. 13, n. 14, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/13/14/1899>.

LEE, K. Y.; MOONEY, D. J. Sodium alginate: Properties and biomedical applications. **Progress in Polymer Science**, v. 37, n. 1, p. 106–126, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.06.003>.

LÓPEZ-SANTIAGO, R. F.; CASTILLO, R. Sodium alginate biopolymer viscoelasticity from sol to gel: Linear and nonlinear rheology, and Brownian motion of tracer particles embedded in the polymer network. **Physics of Fluids**, v. 37, n. 1, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0245878>.

MAGALHÃES, S. et al. Brief overview on bio-based adhesives and sealants. **Polymers**, v. 11, n. 10, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/11/10/1685>.

MOORHEAD, A.; FRANCIS, L. F. Visualizing latex film formation using freeze-drying and scanning electron microscopy. **Journal of Coatings Technology and Research**, v. 22, n. 3, p. 1171–1184, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11998-024-01044-w>.

MOURA-ALVES, M. et al. Characterization of sodium alginate-based films blended with olive leaf and laurel leaf extracts obtained by ultrasound-assisted technology. **Foods**, v. 12, n. 22, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2304-8158/12/22/4076>.

OLIVEIRA, E. J. DE; OLIVEIRA S. A. S. DE; OTTO, C.; ALICAI, T.; FREITAS, J. P. X. DE, CORTES, D. F. M.; PARIYO, A.; LIRI, C.; ADIGA, G.; BALMER, A.; KLAUSER, D.; ROBINSON, M. A novel seed treatment-based multiplication approach for cassava planting material. **PLOS ONE**, v. 15, n. 3, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229943>.

OLIVEIRA, J. O. A. P. et al. Influência de sistemas de preparo do solo na produtividade da mandioca (*Manihot esculenta* Crantz). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 2, p. 443–450, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000200020>.

POKHAREL, A. et al. Biobased polymer composites: A review. **Journal of Composites Science**, v. 6, n. 9, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2504-477X/6/9/255>.

SAHU, S.; MONALISA, S. P.; JIGILE, S.; KAR, S.; PARIDA, S. S.; SWAIN, S. K. Exploring the potential of synthetic seeds: Influence of explant, encapsulating agent and matrix, advantages and challenges. **Plant Science Today**, v. 12, n. 1, 2025. DOI: <https://doi.org/10.14719/pst.3931>.

SALAZAR, M. DEL R.; DUQUE, J. F. S.; SAENZ-GALINDO, A.; RODRIGUEZ-HERRERA, R. (Eds.). *Biodegradable polymers: Concepts and applications*. CRC Press, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003230533>.

SANCHEZ-BALLESTER, N.; BATAILLE, B.; SOULAIROL, I. Sodium alginate and alginic acid as pharmaceutical excipients for tablet formulation: Structure-function relationship. *International Journal of Pharmaceutics*, v. 270, 2021. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34364633/>.

SANTOS, L. M. P. dos. **Desenvolvimento e caracterização de biocompósito de látex (borracha natural) e fibra de carnaúba**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/items/e7ae71f2-7a44-429e-a54e-7bd08d37ae01>.

SCHOFFEL, A. **Adaptação do método de multiplicação rápida, relações entre caracteres e amostragem na produção de mudas, ramos e raízes de mandioca**. 2019. Dissertação (Pós-Graduação em Agronomia) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

SHEAT, S.; MUSHI, E.; GWANDU, F.; SIKIROU, M.; BALEKE, P.; KAYONDO, S. I.; KULEMBEKA, H.; ADETORO, N.; WINTER, S. Cut, root, and grow: Simplifying cassava propagation to scale. *Plants*, v. 13, n. 4, p. 471, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants13040471>.

SHIJI, R.; JAMES, G.; SUNITHA, S.; MUTHURAJ, R. Micropropagation for rapid multiplication of planting material in cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *Journal of Root Crops*, v. 40, n. 1, p. 23–30, 2015. Disponível em: <https://journal.isrc.in/index.php/jrc/article/view/229>.

SHIMIZU, G. D.; MARUBAYASHI, R. Y. P.; GONÇALVES, L. S. A. AgroR: Experimental statistics and graphics for agricultural sciences. *CRAN Repository*, versão 1.3.7, 2021. DOI: <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.AgroR>.

SONJAN, S.; ROSS, G. M.; MAHASARANON, S.; SINKANGAM, B.; INTANON, S.; ROSS, S. Biodegradable hydrophilic film of crosslinked PVA/silk sericin for seed coating: The effect of crosslinker loading and polymer concentration. *Journal of Polymers and the Environment*, v. 29, n. 1, p. 323–334, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01867-9>.

SRIRING, M.; NIMPAIBOON, A.; KUMARN, S.; HIGAKI, K.; HIGAKI, Y.; KOJIO, K.; TAKAHARA, A.; CHEONG HO, C.; SAKDAPIPANICH, J. Film formation process of natural rubber latex particles: Roles of the particle size and distribution of non-rubber species on film microstructure. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 592, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124571>.

UJIAN TO, O.; WIDYANINGRUM, I.; WIJAYA, H. J. Effect of maleated natural rubber on tensile strength and compatibility of natural rubber/coconut coir composite. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 223, n. 1, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/223/1/012014>.