

UFRRJ
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
AMBIENTAIS E FLORESTAIS

TESE

CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E APROVEITAMENTO DO
ENDOCARPO (CASCA) DA NOZ DA MACADÂMIA PARA PRODUÇÃO
DE BIOPRODUTOS

Claudio Domingos da Silva

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
AMBIENTAIS E FLORESTAIS

CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E APROVEITAMENTO DO ENDOCARPO
(CASCA) DA NOZ DA MACADÂMIA PARA PRODUÇÃO DE BIOPRODUTOS

CLAUDIO DOMINGOS DA SILVA

Sob a orientação dos Professores
Dr. Alexandre Monteiro de Carvalho,
Dr. Acácio Geraldo de Carvalho (in memoriam)

e Coorientação da Professora
Dr.^a Natália Dias de Souza

Tese submetida como requisito parcial
para obtenção do grau de **Doutor em**
Ciências Ambientais e Florestais, no
Programa de Pós-Graduação em
Ciências Ambientais e Florestais, Área
de Concentração em Ciência e
Tecnologia de Produtos Florestais

Seropédica, RJ
2025

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

D586 Domingos da Silva, Claudio, 1956-
a CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E APROVEITAMENTO
DO ENDOCARPO (CASCA) DA NOZ DA MACADÂMIA
PARA PRODUÇÃO DE BIOPRODUTOS / Claudio Domingos
da Silva. - Seropédica, 2025.
109 f.: il.

Orientador: Alexandre Monteiro de Carvalho.
Coorientadora: Natália Dias de Souza.
Tese (Doutorado) . -- Universidade Federal Rural do
Rio de Janeiro, PPGCAF/ Ciências Ambientais e
Florestais, 2025.

1. noz da macadâmia. 2. extrativos. 3. alelopatia.
4. tubetes. 5. sustentabilidade. I. Monteiro de
Carvalho, Alexandre, 1971-, orient. II. Dias de Souza,
Natália, 1981-, coorient. III Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro. PPGCAF/ Ciências Ambientais e
Florestais. IV. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E FLORESTAIS

CLAUDIO DOMINGOS DA SILVA

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Ciências, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Arca de Concentração em Ciência e Tecnologia de Produtos Florestais.

TESE APROVADA EM: 24/04/2025

Documento assinado digitalmente
 **ALEXANDRE MONTEIRO DE CARVALHO**
Data: 05/09/2025 17:42:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Alexandre Monteiro de Carvalho Prof. Dr. UFRRJ (Orientador)

Documento assinado digitalmente
 **KATIA ELIANE SANTOS AVELAR**
Data: 06/09/2025 13:27:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Katia Eliane Santos Avelar. Prof. Dr.^a FIOCRUZ

Documento assinado digitalmente
 **ROBERTO CARLOS COSTA LELIS**
Data: 08/09/2025 09:03:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Roberto Carlos Costa Lelis. Prof. Dr. UFRRJ

Documento assinado digitalmente
 **GILMARA PIRES DE MOURA PALERMO**
Data: 07/09/2025 17:08:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Gilmara Pires de Moura Palermo. Prof. Dr.^a UFRRJ

Documento assinado digitalmente
 **PATRICIA MARIA DUSEK**
Data: 06/09/2025 17:52:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Patrícia Maria Dusek. Prof. Dr.^a. UNISUAM

DEDICATÓRIA

*A Deus.
Aos meus pais (in memoriam).
À minha esposa.
Aos meus filhos.
Aos meus amigos*

AGRADECIMENTOS

A Deus, “Porque no deserto, Deus não trouxe chuva, mas fez brotar água da rocha. Quando Deus é o provedor, Qualquer coisa pode se tornar uma fonte.” Billy Graham.

Ao Prof. Dr. Alexandre Monteiro de Carvalho, por toda a sua dedicação e seus ensinamentos.

À Prof.^a Dr.^a Natália Dias por todo o seu incentivo, preocupação e carinho para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Alexandre Miguel por suas valiosas contribuições e ajuda.

Aos Professores deste Instituto, por todos os ensinamentos.

Aos meus Pais (in memoriam) e irmãos, pelos valores transmitidos, por todos os conselhos, por todos os cuidados.

Aos amigos da Pós pelos conselhos e ajuda.

Ao companheiro José Carlos Ferreira Batista, pela ajuda imprescindível para a realização deste trabalho.

Ao companheiro José Mário, Grande amigo muitas conversas e muita ajuda neste trabalho.

Aos meus colegas de laboratório pela nossa boa convivência.

A todos aqueles que de alguma forma participaram desta importante etapa

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

RESUMO GERAL

SILVA, C. D. **Aproveitamento dos resíduos da noz da macadâmia (*Macadamia integrifolia* Maiden & Bette) para produção de metabólitos secundários, substratos, tubetes e produtos biodegradáveis.** 109p. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica - RJ, 2025.

A noqueira macadâmia, cultivada no Brasil, pertence à espécie *Macadamia integrifolia*, sua noz, conhecida como noz da macadâmia, apresenta interesse no mercado internacional, com grande procura entre os consumidores. O processamento da noz da macadâmia gera uma alta quantidade de resíduos, 75% de subprodutos que, quando descartados inapropriadamente, contribuem para o acúmulo de rejeitos e para a poluição ambiental. Estudos destacam o uso dessa biomassa para os mais diversos fins. Nesse contexto, o objetivo do trabalho foi caracterizar o perfil fitoquímico dos extrativos dos resíduos da noz da macadâmia e verificar a influência desses metabólitos adicionados ao meio nutritivo, no crescimento *in vitro* de plantas de *Adenanthera pavonina*. Os endocarpos (cascas dos frutos da macadâmia) foram obtidos da unidade industrial de beneficiamento de nozes da TRIBECA, na Fazenda Santa Marta, localizada no Município de Pirai, Estado do Rio de Janeiro. Os endocarpos (cascas) foram armazenados em sala climatizada a 25° C. Com os extratos obtidos foram realizadas análises de quantificação, fitoquímica preliminar, caracterização molecular por FTIR, determinação de fenóis totais, análise de capacidade antioxidante por FRAP e aplicação dos extrativos no crescimento *in vitro*. A adição do extrativo de noz da macadâmia em meio nutritivo provocou efeitos no crescimento *in vitro* de *Adenanthera pavonina*, em baixas concentrações tende a ser benéfico. A verificação do potencial alelopático dos extratos aquosos do resíduo da *Macadamia integrifolia* sobre as sementes de *Lactuca sativa* (alface), nas diversas concentrações, foi realizada através da porcentagem de plântulas normais obtidas nos experimentos. O extrato aquoso dos resíduos da noz da macadâmia (*Macadamia integrifolia*) não possui efeito alelopático significativo. Devido à ausência de estudos sobre o uso do substrato mais adequado para a germinação do mogno africano (*Khaya ivorensis*), avaliou-se também o potencial de utilização dos resíduos como substrato. Este resultado destaca a eficácia deste substrato em fornecer um ambiente propício para o desenvolvimento inicial das sementes. O uso de resíduos de noz da macadâmia como substrato para germinação apresenta uma solução sustentável e inovadora. O aproveitamento de resíduos da macadâmia e sua integração com a resina de mamona abrem caminhos para avanços em várias frentes. Os tubetes fabricados com resíduos do processamento da noz da macadâmia foram padronizados para possuir um volume interno semelhante ao dos utilizados comercialmente, destacam-se como uma alternativa viável para o reaproveitamento de resíduos agroindustriais.

Palavras-chaves: cascas da noz da macadâmia, extrativos, fitoquímica, Alelopatia, aproveitamento.

ABSTRACT

SILVA, C. D. **Utilization of Macadamia Nut (*Macadamia integrifolia* Maiden & Betche) Residues for the Production of Secondary Metabolites, Substrates, Seedling Tubes, and Biodegradable Utensils.** 109p. Thesis (Doctorate in Environmental and Forest Sciences). Institute of Forests, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica - RJ, 2025.

Macadamia trees cultivated in Brazil belong to the species *Macadamia integrifolia*, and their nut, known as Macadamia Nut, is highly valued in the international market, with strong consumer demand. The processing of Macadamia Nuts generates a large amount of waste, with 75% resulting in by-products that, when improperly discarded, contribute to waste accumulation and environmental pollution. Studies highlight the potential uses of this biomass for various purposes. In this context, the objective of this study was to characterize the phytochemical profile of the extracts from Macadamia Nut residues and to evaluate the influence of these metabolites, when added to the nutrient medium, on the *in vitro* growth of *Adenanthera pavonina* plants. The endocarps (nut shells) were obtained from the TRIBECA nut processing unit at Fazenda Santa Marta, located in the municipality of Piraí, Rio de Janeiro. The endocarps (shells) were stored in a climate-controlled room at 25°C. The extracts obtained were subjected to quantification analyses, preliminary phytochemical screening, molecular characterization by FTIR, determination of total phenols, antioxidant capacity analysis by FRAP, and application of the extracts in *in vitro* growth experiments. the addition of Macadamia Nut extract to the nutrient medium affected the *in vitro* growth of *Adenanthera pavonina*, with low concentrations tending to be beneficial. The allelopathic potential of the aqueous extract from *Macadamia integrifolia* residue on *Lactuca sativa* (lettuce) seeds at various concentrations was evaluated by analyzing the percentage of normal seedlings obtained in the experiments. the aqueous extract of Macadamia Nut (*Macadamia integrifolia*) residues did not exhibit significant allelopathic effects. Due to the lack of studies on the most suitable substrate for the germination of African mahogany (*Khaya ivorensis*), this study aimed to evaluate the potential of four different particle sizes of Macadamia Nut residue substrate. The results highlight the effectiveness of this substrate in providing a suitable environment for the initial seed development. The use of Macadamia Nut residues as a germination substrate presents a sustainable and innovative solution. The reutilization of macadamia residues and their integration with castor bean resin open new possibilities for advancements in multiple fields. Seedling tubes manufactured from macadamia nut processing residues were standardized to have an internal volume similar to commercially used ones, standing out as a viable alternative for reusing agro-industrial waste.

Keywords: Macadamia Nut shells, extracts, phytochemistry, allelopathy, reuse.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Relação entre a Lei 12.305/2010 (PNRS) e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU.....	6
Tabela 2. Teores de extratos obtidos para as amostras dos resíduos da noz da macadâmia (<i>Macadamia integrifolia</i>), utilizando os solventes ciclo-hexano, acetato de etila e metanol.....	22
Tabela 3. Picos de absorção dos extratos da noz da macadâmia	23
Tabela 4. Classes de metabólitos secundários presentes no extrato metanólico dos resíduos da noz da macadâmia.	24
Tabela 5. Resultados de fenóis totais, flavonoides totais e capacidade antioxidante pelo método FRAP do extrato metanólico de resíduos da noz da macadâmia	25
Tabela 6. Resultado da análise de variância para as variáveis número de explantes responsivos, número de gemas e número de brotos maiores que 1 cm, obtidos nos experimentos 1 e 2 a partir de segmentos nodais de <i>Adenanthera pavonina</i> inoculados <i>in vitro</i> em função.	25
Tabela 7. Índice de velocidade de germinação (IVG) e germinação (G) de sementes de alface rubi crespa submetidas a diferentes dosagens do extrato aquoso dos resíduos de beneficiamento da Noz da macadâmia (<i>Macadamia integrifolia</i>).	40
Tabela 8. Tratamentos e Granulometrias	49
Tabela 9. Análises químicas dos resíduos do beneficiamento da noz da macadâmia.	51
Tabela 10. ES (Entre substrato) Valores médios obtidos para as análises de germinação das sementes do Mogno Africano (<i>Khaya ivorensis</i> A. Chev.) dispostas entre os substratos - ES (Entre substrato) dos resíduos do beneficiamento da noz da macadâmia (<i>Macadamia integrifolia</i>) (M1, M2, M3, M4)	52
Tabela 11. SS (Sobre substrato) Valores médios obtidos para as análises de germinação das sementes do Mogno Africano (<i>Khaya ivorensis</i> A. Chev.) dispostas sobre o substrato - SS (Sobre substrato) dos resíduos do beneficiamento da noz da macadâmia (<i>Macadamia integrifolia</i>) (M1, M2, M3 e M4):	52
Tabela 12. Composição dos painéis de resíduos da noz da macadâmia e partículas de serragem da madeira da seringueira (<i>Hevea brasiliensis</i>)	67
Tabela 13. Valores médios de teor de umidade, densidade dos resíduos da noz da macadâmia.	75
Tabela 14. Desempenho mecânico em tração perpendicular à face: faixa, média e observações	84
Tabela 15. Parâmetros normativos para painéis particulados (MDP).	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Nogueira macadâmia (<i>Macadamia integrifolia</i>).....	1
Figura 2. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Fonte: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs	6
Figura 3. Estrutura dos frutos da macadâmia. Fonte: adaptado de AHMED, et al. (2024).....	8
Figura 4. Espectro no infravermelho por análise FTIR (dos extratos obtidos para amostras dos resíduos da noz da macadâmia (<i>Macadamia integrifolia</i>), utilizando o solvente metanol.	22
Figura 5. Número de explantes responsivos em função das concentrações de extrativo dos resíduos do beneficiamento da noz da macadâmia no cultivo <i>in vitro</i> de segmentos nodais de <i>Adenanthera pavonina</i> , aos 35 dias após a inoculação.	26
Figura 6. Imagens dos diferentes tratamentos avaliados. Fonte: o autor (2023).	49
Figura 7. Disposição das sementes no experimento.	50
Figura 8. Germinadores de sementes	50
Figura 9. ES (Entre substrato) - Gráficos de boxplot ilustrando o comportamento da germinação em diferentes granulometrias dos resíduos da noz da macadâmia (<i>Macadamia integrifolia</i>).....	53
Figura 10. SS (Sobre substrato) - Gráficos de boxplot ilustrando o comportamento da germinação em diferentes granulometrias dos resíduos da noz da macadâmia (<i>Macadamia integrifolia</i>).....	53
Figura 11. Resíduos da noz da macadâmia coletados triturados em diferentes moinhos: (A) Pós-beneficiamento, (B) Moídos em moinho Martelo e (C) Moídos em Moinho tipo Willey	63
Figura 12. Equipamento adaptado para confecção dos tubetes.	65
Figura 13. Prensagem utilizando a prensa hidráulica. Moldes utilizados para a fabricação dos tubetes e dimensões após moldagem.	65
Figura 14. Tubetes confeccionados com os resíduos da noz da macadâmia	66
Figura 15. Tubete de polipropileno utilizado em produção de mudas.....	66
Figura 16. Partículas dos resíduos do processamento da noz da macadâmia (Laboratório de Processamento da Madeira/IF/UFRRJ).	67
Figura 17. Corpos de prova para avaliação das propriedades dos painéis.	68
Figura 18. Esquema ilustrativo dos pontos de medição da espessura dos corpos de prova utilizados na determinação da densidade.....	69
Figura 19. Esquema de medição das dimensões dos corpos de prova: largura (B) obtida com paquímetro digital e espessura medida no ponto de intersecção das diagonais com micrômetro digital.	71
Figura 20. Pontos de medidas dos corpos de prova.....	71
Figura 21. Esquema ilustrativo mostrando corpo de prova posicionado sobre os apoios da máquina universal de ensaios	71
Figura 22. Montagem do corpo de prova no dispositivo de ensaio	72
Figura 23. Blocos de fixação e área de colagem.	73
Figura 24. Corpos de prova colados aos suportes durante ensaio de tração perpendicular.	73
Figura 25. Tubete obtido no experimento.....	75
Figura 26. Tubetes confeccionados com os resíduos da noz da macadâmia	75
Figura 27. A, B e C. tubetes com diferentes formulações, onde utilizamos a Resina de Mamona bicomponentes.....	76
Figura 28. Mudas implantadas nos tubetes do experimento.....	76
Figura 29. Densidade média dos painéis em g/cm ³ em função da porcentagem das misturas utilizadas.....	77

Figura 30. Painéis de partículas, onde foi utilizada resina de mamona bicomponente.	77
Figura 31. Inchamento em Espessura (TE) após 24h de imersão em água dos painéis (% médias em função da % da mistura).	78
Figura 32. Retração total (médias em função da porcentagem da mistura).	79
Figura 33. Inchamento total (desvio padrão).	79
Figura 34. Retração total (desvio padrão).	80
Figura 35. Figura 19. Inchamento Total (CV%).	80
Figura 36. Retração total (CV em porcentagem).	81
Figura 37. Módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) por tratamento	83
Figura 38. Distribuição da Tração Perpendicular por Grupo.	84
Figura 39. Médias da tração perpendicular com letras de Tukey	85

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)	4
2.2. Resíduos da noz da macadâmia	7
2.3. Resíduos provenientes do beneficiamento	9
2.4. Estrutura e composição química dos materiais lignocelulósicos.....	9
2.5. Resíduos lignocelulósicos como fonte de metabolitos secundários	10
2.6. Fenóis	10
2.7. Flavonóides.....	10
2.8. Taninos.....	11
2.9. Alcalóides	11
2.10. Terpenos.....	11
2.11. Esteroides	11
TEORES DE EXTRATIVOS E PERFIL FITOQUÍMICO DOS RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DA NOZ DA MACADÂMIA DE MÁ CADA MIA INTEGRIFOLIA MAIDEN & BETCHE E AVALIAÇÃO DOS EXTRATIVOS NO CRESCIMENTO <i>IN VITRO</i> DE <i>ADENANTHERA PAVONINA</i> L.....	13
RESUMO	14
ABSTRACT	15
1. INTRODUÇÃO.....	16
2. MATERIAL E MÉTODOS	18
2.1. Material.....	18
2.2. Obtenção dos extratos dos resíduos dos endocarpos (cascas dos frutos da macadâmia)	18
2.3. Prospeção fitoquímica	18
2.4. Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR).....	18
2.5. Análise da capacidade antioxidante por FRAP.....	18
2.6. Determinação do teor de fenóis totais	19
2.7. Determinação do teor de flavonoides totais	19
2.8. Avaliação do crescimento de <i>Adenanthera pavonina</i>	20
2.8.1. Experimento 1	20
2.8.2. Experimento 2	20
2.9. Coleta e análise de dados.....	21
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
3.1. Teores de extrativos dos resíduos da noz da macadâmia.....	22

3.2. Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR).....	22
3.3. Perfil fitoquímico.....	23
3.4. Fenóis totais, flavonóides totais e capacidade antioxidante por FRAP.....	25
3.5. Avaliação do crescimento <i>in vitro</i> de <i>Adenanthera pavonina</i> L.....	25
4. CONCLUSÕES.....	27
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
POTENCIAL ALELOPÁTICO DE EXTRATO AQUOSO DOS RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DA NOZ DA MACADÂMIA (MÁ CADA MIA INTEGRIFOLIA) NA GERMINAÇÃO DE SEMENTES DE LACTUCA SÃ TI VÁ L.	35
RESUMO	36
ABSTRACT	37
1. INTRODUÇÃO.....	38
2. MATERIAL E MÉTODOS	39
2.1. Materiais	39
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
3.1. Índice de velocidade de germinação (IVG) e germinação (G) de sementes de alface rubi crespa	40
4. CONCLUSÕES.....	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
ANÁLISE DA GERMINAÇÃO DE SEMENTES DE MOGNO AFRICANO (<i>KHAYA</i> <i>IVORENSIS</i> A. CHEV.) EM SUBSTRATOS DOS RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DA NOZ DA MACADÂMIA.....	45
RESUMO	46
ABSTRACT	47
1. INTRODUÇÃO.....	48
2. MATERIAL E MÉTODOS	49
2.1. Organização do experimento	49
2.2. Análise estatística	50
2.3. Análise química dos resíduos do beneficiamento da noz da macadâmia	51
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
3.1. Análise de germinação das sementes do Mogno Africano (<i>Khaya ivorensis</i> A. Chev.)....	52
4. CONCLUSÕES.....	54
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
UTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DA NOZ DA MACADÂMIA (<i>MACADAMIA INTEGRIFOLIA</i>) NA PRODUÇÃO DE TUBETES E PRODUTOS BIODEGRADÁVEIS (PAINÉIS DE PARTÍCULAS).....	56

RESUMO	57
ABSTRACT	58
1. INTRODUÇÃO.....	59
2. MATERIAL E MÉTODOS	63
2.1. Coleta do material.....	63
2.2. Propriedades dos resíduos da noz de macadâmia:.....	63
2.2.1 Determinação do teor de umidade dos resíduos	63
2.2.2 Determinação da densidade dos resíduos	64
2.3. Produção dos tubetes	64
2.4. Produção de painéis de partículas.....	66
2.5. Avaliação das propriedades físicas dos painéis	68
2.5.1 Determinação da densidade	68
2.5.2. Inchamento em Espessura	69
2.5.3. Absorção de Água.....	70
2.6. Avaliação das propriedades mecânicas dos painéis.....	70
2.6.1. Determinação da resistência a flexão e módulo de elasticidade.....	70
2.6.2 Determinação da resistência a tração perpendicular.....	72
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
3.1. Propriedades físicas dos resíduos da noz de macadâmia: teor de umidade, densidade básica e densidade aparente.....	74
3.2 Produção de tubetes	75
3.3. Produtos: Painéis de Partículas.....	76
3.3.1 Resultados da avaliação dos ensaios físicos	76
3.3.2 Ensaio de determinação da densidade	76
3.3.3. Ensaio de determinação do inchamento em espessura 24h e 2h	77
3.3.4. Resultado das avaliações dos ensaios mecânicos.....	82
3.3.5. Determinação da resistência a flexão e módulo de elasticidade.....	82
3.3.6. Módulo de Ruptura - MOR	83
3.3.7 Determinação da resistência a tração perpendicular.....	83
3.3.8. Influência da proporção de materiais.....	84
4. CONCLUSÕES	86
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
6. CONCLUSÕES GERAIS	93
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
8. RECOMENDAÇÕES.....	95

1. INTRODUÇÃO GERAL

A noqueira macadâmia (*Macadamia integrifolia*.) é uma planta arbórea, de clima subtropical, originária da Austrália Oriental (Figura 1), precisamente das províncias de New South Wales e de Queensland, onde era encontrada em densas florestas naturais. Tal espécie foi alvo de muitos estudos desenvolvidos no Hawaii Agricultural Experiment Station (HAES), onde se deu a criação dos principais clones e cultivares plantados no mundo (MCFADYEN et al., 2012).

A planta produz uma noz com elevada aceitação pelo mercado consumidor (CHUNG et al., 2013). Apesar do seu potencial elevado para o mercado, ainda é pouco explorada no Brasil (SCHNEIDER et al., 2012), onde as primeiras mudas foram plantadas na década de 1940. pelo Instituto Agrônomo Campinas (IAC), que iniciou em 1974 o programa de domesticação e melhoramento genético, onde foram lançadas 17 cultivares adaptadas às condições climáticas brasileiras. Tais cultivares foram provenientes da noqueira macadâmia, membro da família botânica Proteaceae (PIZA; MORIYA, 2014). A Figura 1 apresenta uma imagem de uma árvore de noqueira macadâmia em porte condizente com a produção de nozes.



Figura 1. Nogueira macadâmia (*Macadamia integrifolia*).

Fonte: (ROMAHN, 2019)

Segundo Penoni et al. (2011), a planta foi descoberta e botanicamente catalogada entre 1840 e 1860, respectivamente. Entretanto, o seu grande potencial econômico foi ignorado no país de origem por muito tempo. Foi introduzida no Havaí em 1881, e, em poucos anos, o arquipélago tornou-se um grande produtor da noz, uma vez que campanhas publicitárias incentivavam os turistas a adquirir a macadâmia que recebeu o apelido de “Noz-do-Havaí”. Houve investimentos em controle de pragas, pesquisas varietais, tecnologia de beneficiamento e comercialização. Tais investimentos colocaram a região na posição de maior produtor mundial de noz da macadâmia por quase um século. Com o início da produção mundial e o sucesso do produto, os australianos realizaram os primeiros plantios comerciais a partir de 1940 e, em produção crescente, retornando-se o maior produtor mundial no ano 2000 (PIZA; MORIYA, 2014).

A produção mundial de nozes da macadâmia tem aumentado ao longo dos anos, com destaque para alguns países produtores. A principal fonte de dados sobre produção de

macadâmia é a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) e outras fontes especializadas em agricultura.

A Austrália é historicamente o maior produtor e exportador de nozes de macadâmia, seguida por outros países como África do Sul, Estados Unidos, Brasil, Quênia e Malawi. Esses países possuem condições climáticas adequadas para o cultivo da macadâmia.

No entanto, é importante ressaltar que os dados específicos de produção e as posições dos países produtores podem variar de ano para ano, de acordo com fatores como condições climáticas, mudanças na área cultivada e outros fatores econômicos.

A partir de relatórios e publicações de associações de produtores de macadâmia, como a Associação Brasileira de Macadâmia (ABRAMAC), o estado brasileiro de maior produção de nozes de macadâmia é o estado de São Paulo. A região noroeste do estado, conhecida como a “Capital Nacional da Macadâmia”, concentra a maior parte dos pomares comerciais de macadâmia no Brasil. Outros estados brasileiros que também têm produção significativa de macadâmia são Espírito Santo, Minas Gerais, Paraná, Rio de Janeiro e Santa Catarina. No entanto, é importante mencionar que a produção de macadâmia ainda é relativamente pequena em comparação com outras culturas agrícolas no Brasil.

A partir da divulgação das qualidades intrínsecas desta extraordinária noz, do aumento da procura por sua amêndoa, pela grande quantidade de produtos desenvolvidos e pela sua boa rentabilidade, diversos países investiram no plantio da macadâmia, entre os quais, estão a África do Sul, Quênia, Guatemala, Brasil, Malawi, Colômbia e, mais recentemente, a China (PIZA; MORIYA, 2014).

No Brasil, o interesse comercial emergiu somente na década de 1990, o que impulsionou os agricultores a aumentarem seus investimentos na atividade agrícola. Adicionalmente, as favoráveis condições climáticas locais também contribuíram para o crescimento da produção (PERDONÁ et al., 2014).

A existência de espécies de macadâmia comestíveis e a quantidade exala delas têm sido alvo de controvérsias na literatura, Padue (2003) alega que, além da *Macadamia integrifolia*, que possui a noz de melhor sabor, apenas a *Macadamia tetraphylla* e a *Macadamia ternifolia* são exploradas economicamente. Por outro lado, Sobierajski et al., (2006) afirmam que mais de 10 espécies foram descritas para o gênero, porém, apenas a *Macadamia integrifolia* (Maiden, Betcher) e a *Macadamia tetraphylla* (L.) são consideradas comestíveis e cultivadas comercialmente.

O Brasil é um dos maiores produtores de castanhas do mundo e de acordo com Lopes (2017), o país pode gerar uma receita de US\$ 1 bilhão com a exportação de castanhas nativas (castanha do Pará, castanha de caiu e castanha baru) e de castanhas exóticas (pecan e macadâmia) nos próximos dez anos. O consumo interno deverá crescer até 8%.

Para próxima safra (2021), entretanto, segundo a Sociedade Rural Brasileira (SRB), que publicou dados colhidos em janeiro de 2020, os produtores acreditam que os preços praticados no Brasil fiquem próximos aos preços praticados na Austrália, entre 330 a 4,00 dólares americanos por quilo da noz em casca. Com esses novos preços os produtores estão aumentando suas áreas de produção e acreditam que, se os preços do mercado mundial continuarem a ser praticados no Brasil, em alguns anos nosso país poderá ser um grande produtor dessa noz, tão valorizada mundialmente (SRB, 2020).

Macadamia constitui um gênero de árvores perenes pertence à família das Proteaceae, que foi domesticada pela primeira vez na Austrália em 1858. Das dez espécies do gênero *Macadamia*, sete são nativas da Austrália, mas apenas quatro são amplamente reconhecidas (MAI et al., 2020). Entre essas quatro espécies, *Macadamia integrifolia* e *Macadamia tetraphylla* são cultivadas comercialmente por suas nozes comestíveis em muitas regiões tropicais e subtropicais mundialmente. A noz da macadâmia é cultivada comercialmente na Austrália, Brasil, Bolívia, China, Colômbia, Costa Rica, Guatemala, Quênia, Malawi, Nova Zelândia e África do Sul

(NAVARRO; RODRIGUES, 2016, RENGEL et al., 2015). Em 2022, a produção global de nozes de macadâmia foi de cerca de 298914 toneladas métricas ou cerca de 90.000 toneladas de grãos em todo o mundo (World Macadamia Organisation, 2023), com produção contínua estimada a atingir 338,00 toneladas métricas em 2024 (com casca) (CONSELHO INTERNACIONAL DE NOZES E FRUTOS SECOS, 2024). De acordo com os dados disponíveis atualmente, a WMO projetou que a oferta de nozes de macadâmia aumentará para o dobro nos próximos 4 a 5 anos e triplicará até 2030.

Dos resíduos provenientes no beneficiamento nas indústrias agrícolas, merece destaque a geração de resíduos oriundos da noz *Macadamia integrifolia*, já que aproximadamente 60-70% do seu peso total é composto por essa casca. A variedade mais comum dessa noz é a *Macadamia integrifolia*, que se caracteriza por possuir frutos arredondados com casca lisa, constituída de um material fibroso celular sólido altamente resistente (FAN et al., 2018). Em 2021, a produção global de macadâmia alcançou a marca de 241.420 toneladas com casca, correspondendo a 65.835 toneladas de amêndoas e 175.585 toneladas de resíduos (CONSELHO INTERNACIONAL DE NOZES E FRUTOS SECOS, 2022). A disposição adequada das cascas de nozes de macadâmia torna-se um desafio nas instalações de processamento, devido aos custos elevados associados ao seu descarte em aterros sanitários (WONGCHAREE et al., 2018).

Conforme citado por Silva (2018), o aumento dos cultivos de macadâmia tem conduzido a uma considerável produção de resíduos, uma vez que a taxa média de recuperação é de aproximadamente 25%. Isso implica que, para cada 25g de amêndoas produzidas, são gerados 75g de resíduos, incluindo cascas e carpelos (PIMENTEL et al., 2007; PIZA; MORIYA, 2014).

A avaliação dos resíduos tem por objetivo principal orientar o uso mais adequado desses, pela identificação de seus compostos químicos, resultando na definição da melhor forma de utilizá-los, definindo práticas laboratoriais recomendadas para o seu melhoramento. O resíduo agrícola na indústria de macadâmia é a casca, que normalmente é usada para aquecimento nos fornos para execução de seu beneficiamento.

Boas et al., 2012, relata que diante de um resíduo tão abundante pós processamento, há um vasto horizonte de utilizações. Surgindo como potencial alternativa que tem sido alvo de estudos, a biomassa como um recurso renovável oriundo de matéria orgânica é uma mistura complexa de polímeros naturais de carboidratos conhecidos como celulose, hemicelulose e lignina, podendo ser utilizada em diversas formas e estados para obtenção das mais variadas formas de energia sejam por conversão direta ou indireta (CORTEZ et al., 2008).

Resíduo pode ser descrito como qualquer substância ou material que é descartado após ser gerado por um processo de fabricação, exploração, conversão ou utilização. Essas sobras têm o potencial de representar uma ameaça ao meio ambiente e, conseqüentemente, à sociedade.

Este trabalho aborda a possibilidade de transformar resíduos em matéria-prima para outros processos, que possui um sentido conhecido como “reaproveitamento de resíduos” ou “economia circular”.

O conceito de economia circular possui uma abordagem sustentável que visa minimizar o desperdício e a pressão sobre os recursos naturais ao valorizar e reutilizar materiais descartados. Ao converter resíduos em matérias-primas para novos processos industriais ou produtivos, é possível alcançar uma série de benefícios cientificamente fundamentados como:

- a) Redução do impacto ambiental: a reutilização de resíduos diminui a necessidade de extrair novas matérias-primas da natureza, o que contribui para a preservação de recursos naturais finitos e reduz o acúmulo de resíduos nos aterros sanitários, diminuindo a poluição ambiental;
- b) Eficiência na utilização de recursos: a economia circular permite que materiais descartados sejam reintroduzidos em cadeias produtivas, evitando a perda de recursos valiosos e promovendo uma melhor gestão dos mesmos;
- c) Geração de renda e empregos: o reaproveitamento de resíduos cria oportunidades de negócios em indústrias de reciclagem e empresas que trabalham com a reutilização de

materiais. Isso pode gerar empregos diretos e indiretos, contribuindo para o desenvolvimento econômico;

- d) Inovação tecnológica: o desenvolvimento de técnicas de reciclagem e processos de transformação de resíduos em matérias-primas requer pesquisas e avanços científicos, estimulando a inovação tecnológica na busca por soluções cada vez mais eficientes e sustentáveis.

Portanto, o aproveitamento de resíduos para fins produtivos e industriais representa uma prática sustentável apoiada em fundamentos científicos que visam a preservação dos recursos naturais, o desenvolvimento econômico e a redução do impacto ambiental.

Diversos estudos científicos vêm explorando a utilização de resíduo, permitindo uma utilização mais nobre de um material que seria descartado. E neste contexto, este trabalho se propõe a estudar uma alternativa para a utilização do resíduo florestal em questão, dividindo-se em quatro capítulos.

Primeiramente, foram realizadas análises fitoquímicas nos extratos obtidos a partir do resíduo da *Macadamia integrifolia*, com o objetivo de explorar seu potencial para produção de metabólitos secundários. Em seguida, foram abordados, no segundo capítulo, a avaliação do potencial alelopático do extrato aquoso do resíduo do beneficiamento da noz da macadâmia (*Macadamia integrifolia*) na germinação de sementes de *Lactuca sativa* L. O terceiro capítulo expõe os resultados da germinação de sementes de mogno africano (*Khaya ivorensis*) em substratos compostos pelo resíduo da *Macadamia integrifolia*. Por fim, o quarto capítulo apresenta a avaliação das propriedades tecnológicas dos resíduos da *Macadamia integrifolia* na produção dos recipientes (tubetes) e outros componentes.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), criada pela Lei Federal nº 12.305 de 2010 e regulamentada pelo Decreto Federal nº 7404/2010, tem como propósito facilitar a implementação de medidas essenciais para enfrentar os desafios sociais, econômicos e ambientais decorrentes da má administração dos resíduos sólidos no Brasil.

A PNRS define os rejeitos como os resíduos sólidos que flã() podem ser tratados ou recuperados e que devem ser destinados de forma ambientalmente adequada. Seu propósito é promover a não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e a correta destinação final dos resíduos produzidos pela sociedade.

A política ressalta a responsabilidade de todos os produtores de resíduos em cumprir suas obrigações e reconhece a importância econômica dos resíduos sólidos que podem ser reutilizados. Além disso, promove a ideia de reutilização como princípio fundamental e incentiva a utilização proveitosa desses resíduos.

As pesquisas científicas e tecnológicas são apontadas como importantes instrumentos da PNRS. Ela também direciona os geradores de resíduos a elaborarem planos de gerenciamento específicos para seus resíduos.

Outro aspecto relevante é o incentivo ao poder público para instituir medidas que fomentem e financiem pesquisas voltadas para tecnologias limpas aplicáveis aos resíduos sólidos.

Em suma, a PNRS busca promover uma gestão adequada dos resíduos sólidos, visando ao desenvolvimento sustentável do país e à mitigação dos impactos negativos sobre o meio ambiente, a economia e a sociedade (BRASIL, 2010).

Um dos fundamentos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) é o reconhecimento dos resíduos sólidos reutilizáveis e recicláveis como ativos de relevância social, capazes de gerar oportunidades de emprego, renda e fomentar a inclusão cidadã (BRASIL, 2010). Assim, embora não haja uma abordagem direta sobre o conceito de economia circular, a PNRS preconiza a transição de uma economia linear para uma economia circular, ao incentivar a recuperação de resíduos através de procedimentos tecnológicos acessíveis e financeiramente sustentáveis.

Em 2015, a Assembleia Geral das Nações Unidas (ONU) aprovou a implementação de uma série de Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que podem ser visualizados na Figura 2. Esses objetivos têm como propósito conduzir o planeta a um horizonte próspero até 2030, garantindo avanços significativos nos âmbitos econômico, social e ambiental, e assegurando a erradicação da pobreza.

A Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), está diretamente relacionada a diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, pois ambos compartilham princípios voltados à sustentabilidade, gestão eficiente dos recursos naturais, e desenvolvimento socioambiental, conforme a tabela 1 a relação entre a Lei 12.305/2010 (PNRS) e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU.



Figura 2. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Fonte: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>

Tabela 1. Relação entre a Lei 12.305/2010 (PNRS) e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU.

Relação entre os ODS e os artigos específicos da Lei 12.305/2010			
ODS	Nome do ODS	Dispositivo da PNRS	Relação Direta
6	Água Potável e Saneamento	Art. 7º, inciso VI: “redução dos impactos adversos sobre a saúde humana e o meio ambiente...” Art. 9º, inciso II: “tratamento e disposição final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos.”	Evita a poluição de corpos d'água e o comprometimento de aquíferos com o tratamento e disposição correta de resíduos.
8	Trabalho Decente e Crescimento Econômico	Art. 6º, inciso XII: “Integração dos catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis nas ações...” Art. 7º, inciso XI: “inclusão social dos catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis.”	Promove trabalho digno, geração de renda e reconhecimento legal dos catadores, fortalecendo a economia circular.
11	Cidades e Comunidades Sustentáveis	Art. 7º, incisos IV e VII: “não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento,..” e “desenvolvimento sustentável da cidade.” Art. 19: Elaboração de Planos Municipais de Gestão de Resíduos.	Apoia a criação de cidades mais limpas, organizadas e sustentáveis com planejamento integrado de resíduos.

12	Consumo e Produção Responsáveis	Art. 6º, incisos VIII e IX: “responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos.” Art. 33: Implantação de sistemas de logística reversa .	Obriga empresas a recolherem e darem destinação correta aos produtos, promovendo produção sustentável e consumo consciente
13	Ação Contra a Mudança Global do Clima	Art. 7º, inciso V: “adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar impactos ambientais.” Art. 9º, inciso 1: “não geração e redução na fonte.”	Reduz a emissão de gases de efeito estufa por meio de tecnologias limpas e da eliminação de lixões.

Fonte: O autor, baseado a Lei 12.305/2010 (PNRS) e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU. 2015

De acordo com Tripathi (2019) as práticas agrícolas e florestais produzem grandes quantidades de resíduos derivados do rendimento colhido. A geração anual global de resíduos de biomassa é da ordem de 140 Gt e isso apresenta problemas significativos de manejo, pois a biomassa descartada pode ter impactos ambientais negativos (TRIPATHI et al., 2019).

A grande quantidade de resíduos disponível oferece diversas oportunidades para sua utilização como fonte renovável de matéria-prima na indústria. Essas possibilidades estão alinhadas com os princípios da química verde, da bioeconomia e da economia circular, promovendo uma estreita colaboração com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela ONU.

A acumulação crescente e a destinação inadequada de resíduos resultam na emissão de gases de efeito estufa e na sobrecarga dos aterros sanitários (LAZORENKO et al., 2020). Diante dessa situação, surgiram políticas públicas com o objetivo de fortalecer a capacidade científica e tecnológica para alcançar padrões mais sustentáveis de produção e consumo. Lima abordagem sustentável para mitigar os impactos causados pelos resíduos agroindustriais, como a casca da noz da macadâmia, é a utilização de sua biomassa na fabricação de compósitos poliméricos reforçados, aplicáveis em diversas áreas (ANDRADE et al., 2021; CORTAT et al., 2021; CIPRIANO et al., 2019; CHOLAKE et al., 2017; DONG et al., 2017).

2.2. Resíduos da noz da macadâmia

A casca da noz da macadâmia é um resíduo agrícola (lignocelulósico) obtido do processamento da noz da macadâmia (NAVARRO. 2016).

De acordo com o estudo de Pimentel et al. (2007), a espécie *Macadamia integrifolia* é responsável por aproximadamente 90% da produção global. Suas nozes têm um alto valor no mercado internacional e são amplamente aceitas pelos consumidores, conforme mencionado por Penoni et al. (2011).

As plantas cultivadas *Macadamia integrifolia* e *Macadamia tetraphylla* são de tamanho médio (atingindo alturas entre 6 e 18 metros e 3 e 18 metros, respectivamente) e produzem nozes grandes e comestíveis (JANICK; PAULL, 2008). No hemisfério sul, o processo de iniciação floral ocorre no final do outono, em maio (MONCUR et al., 1990), e a floração normalmente acontece do final do inverno ao início da primavera (STANLEY; ROSS, 1986). A espécie *Macadamia integrifolia* é responsável por aproximadamente 90% da produção mundial

e se destaca pela qualidade superior do sabor de suas nozes, enquanto a *Macadamia tetraphylla* geralmente é utilizada como porta-enxerto (OJIMA et al., 2005).

As necessidades climáticas da espécie são comparáveis àquelas de culturas já estabelecidas no país, tais como café e citros (OJIMA et al., 2005). Essa semelhança tem sido evidenciada em diversos estudos que recomendam, analisam e demonstram os benefícios da coexistência do cultivo de macadâmia com outras culturas (PEZZOPANE et al., 2010; PERDONA et al., 2012; SILVA et al., 2013; PERDONA et al., 2015).

O fruto em questão possui uma estrutura conhecida como folículo, composta por três componentes principais, conforme ilustrado na Figura 3: o carpelo, que consiste no exocarpo e no mesocarpo; a casca, também chamada de endocarpo; e a amêndoa, que é o embrião. Para processar esse fruto, são executadas diversas etapas de beneficiamento, tais como seleção, secagem, separação entre a noz e a casca, extração do óleo e descarte do carpelo e da casca.

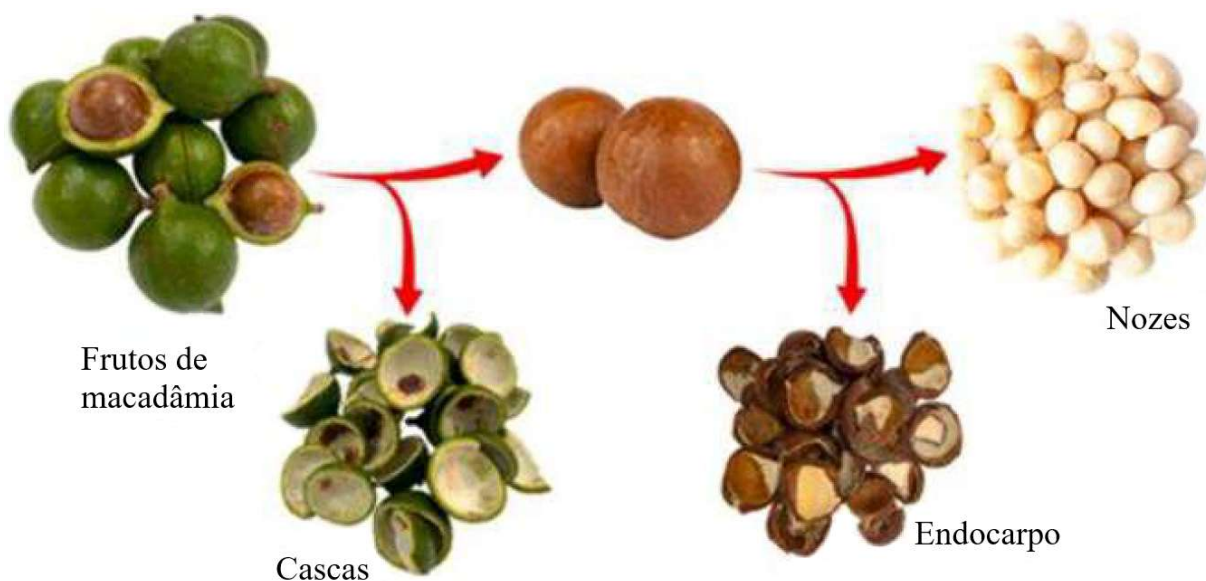


Figura 3. Estrutura dos frutos da macadâmia. Fonte: adaptado de AHMED, et al. (2024).

A amêndoa inteira é o principal item comercializado, apreciada no mercado internacional por seu sabor refinado. Por outro lado, as amêndoas que sofreram quebra durante o processo ou que apresentam qualidade inferior são destinadas à extração de óleo. Esse óleo possui elevado teor de ácido palmitoléico e é devidamente adequado para uso em diversas áreas, incluindo a indústria cosmética, farmacêutica e culinária (PIMENTEL et al., 2007; SCHNEIDER et al., 2012).

O ato de cultivá-la pode ser encarado como um investimento de longo prazo, uma vez que a planta leva cerca de 4 anos para dar seus primeiros frutos, atingindo seu máximo de produtividade após 12 anos. Além disso, sua vida útil é notável, com relatos de pomares que possuem árvores com mais de 60 anos ainda em plena produção para fins comerciais (PIZA, 2000).

É importante salientar que, em seus primeiros tempos, a maior parcela da safra de macadâmia produzida no Brasil era destinada à exportação. Contudo, observa-se uma mudança gradual dessa tendência, principalmente por conta do crescimento substancial da produção nacional de macadâmia. Esse aumento trouxe consigo o surgimento de pequenas indústrias voltadas ao mercado interno, além do lançamento de uma variedade de produtos alimentícios e cosméticos elaborados a partir da noz da macadâmia (PIZA; MORIYA, 2014; ABM, 2015).

2.3. Resíduos provenientes do beneficiamento

Nos dias atuais, o aumento na quantidade de resíduos orgânicos, especialmente aqueles de origem agrícola, está exercendo pressões ambientais significativas na sociedade devido à forma inadequada como são tratados. Nesse contexto, tornou-se uma prioridade em muitos países adotar medidas sustentáveis que visem a redução, reciclagem e reutilização desses materiais. O objetivo é evitar a poluição ambiental causada por esse tipo de resíduo, conforme discutido por GONG et al. (2022), TAVARES et al. (2022) e POURBAYRAMIAN et al. (2021).

Além de apresentar um notável potencial produtivo, é observado que a utilização industrial da macadâmia resulta em uma considerável quantidade de resíduos, devido à taxa média de recuperação que gira em torno de 25%. Em outras palavras, para cada 25g de amêndoas produzidas, são gerados 75g de resíduos compostos por cascas e carpelos. (PIMENTEL et al., 2007; PIZA; MORIYA, 2014). Além disso, é importante ressaltar que o manejo desses resíduos tem se tornado uma questão problemática para as indústrias envolvidas no processamento da macadâmia, principalmente devido ao crescente aumento da sua produção.

2.4. Estrutura e composição química dos materiais lignocelulósicos

Os materiais lignocelulósicos estão constituídos majoritariamente por três polímeros estruturais, celulose e hemiceluloses e lignina, presentes na parede celular vegetal. Esses materiais apresentam uma rede complexa e resistente composta principalmente por lignina (10% a 30%), hemicelulose (15% a 35%) e celulose (30% a 50%), sendo a concentração de cada um desses elementos variável de acordo com o tipo de matéria-prima em questão, idade e estágio vegetativo (RODRIGUES, 2017).

A celulose ($C_6H_{10}O_5$) é o principal componente da parede celular das plantas, sendo o biopolímero mais abundante na natureza, sendo base estrutural das células das plantas, é a mais importante substância natural produzida pelos organismos vivos. A porcentagem de celulose nas plantas varia dependendo da origem. Sua cadeia se constitui de unidades de anidroglicose, unidas através de ligações β -1,4-glicosídicas, resultando num polímero de alto peso molecular e com grau de polimerização variando de 1.000 a 15.000. As cadeias de celulose nas paredes celulares das plantas são arranjadas compactamente, de modo que suas fibras apresentam regiões nitidamente cristalinas, uma consequência do número grande de ligações de hidrogênio que resulta numa forte interação entre suas moléculas. Os grupos funcionais da cadeia de celulose responsáveis por essas interações são grupos hidroxilas (LINO, 2015).

Hemiceluloses são polissacarídeos não celulósicos também denominados polioses. Estão associadas à celulose e à lignina nos tecidos vegetais. As hemiceluloses diferem da celulose pela composição de várias unidades de açúcar, com cadeias moleculares menores e ramificadas. Enquanto a celulose, como substância química, contém exclusivamente a D-glicose como unidade fundamental, as polioses são polímeros, em cuja composição podem aparecer condensadas em proporções variadas, as seguintes unidades de açúcar: β -D-xilose, β -D-manose, β -D-glicose, α -L-arabinose, α -D-galactose, ácido β -D-glicourônico, ácido β -D-galactourônico e ácido α -D-4-metilglicourônico. Deve-se sempre lembrar que o termo hemicelulose não designa um composto químico definido, mas sim uma classe de componentes poliméricos presentes em vegetais fibrosos, possuindo cada componente propriedades peculiares. Como no caso da celulose e da lignina, o teor e a proporção dos diferentes componentes encontrados nas polioses (hemiceluloses) de madeira variam grandemente com a espécie e, provavelmente, também de árvore para árvore (TELEMAN, 2009).

Lignina é um polímero aromático composto por unidades de 4-fenilpropano. Tem uma estrutura macromolecular heterogênea e pode conter três tipos de unidades aromáticas: unidades

p-hidroxifenil (H), guaiacil (G) e siringil (S), que não tem nenhum grupo metoxil (H) ou tem um (G) ou dois (S) grupos metoxil nas posições C3 e C5 da unidade aromática.

A lignina é o segundo polímero natural mais abundante do globo terrestre, representando um total de 30% de todo carbono orgânico no fóssil (SANTOS et al., 2012).

A estrutura da lignina não é homogênea, sendo que sua composição varia de acordo com sua fonte de biomassa (SANTOS et al., 2012).

2.5. Resíduos lignocelulósicos como fonte de metabolitos secundários

Os extrativos são compostos químicos presentes na parede celular, em sua maioria formados a partir de graxas, ácidos graxos, fenóis, terpenos, esteróides, resinas ácidas, resinas, ceras, e outros tipos de compostos orgânicos. Eles existem na forma de monômeros, dímeros e polímeros. Em maior parte, os extrativos estão localizados na árvore na região do cerne (sem levar em consideração a casca), alguns são responsáveis pela cor, odor e durabilidade da madeira (ROWELL et al., 2005).

São resultados de modificações sofridas pelos carboidratos no processo fisiológico da árvore. Os locais de formação e destino para o local definitivo na madeira dependem da função do extrativo (KLOCK et al., 2005).

Estão localizados nas células parenquimáticas, nos canais secretores, na lamela média, nos espaços intermoleculares e na parede celular, no fazendo parte dos componentes estruturais da parede da célula. Sendo assim, podem ser removidos amostras através de solventes, sem afetar as propriedades mecânicas da madeira (FENGEL; WEGENER, 1989).

2.6. Fenóis

Fenol é definido como um composto sólido de cor branca e aspecto cristalino, com a fórmula molecular C_6H_5OH (TENG et al., 2000). Esse grupo tem por característica principal a presença de um grupo hidroxila ligado diretamente a um anel benzênico. Sendo assim, a hidroxila faz com que o fenol se assemelhe a um álcool, sendo capaz de formar ligações fortes de hidrogênio. Estas ligações colaboram para que o fenol tenha altos pontos de ebulição, em comparação a hidrocarbonetos de mesma fórmula molecular (SOLOMONS; FRYHLE, 2009).

Os compostos fenólicos são do tipo ROH, onde R é um grupo benzênico (SILVA, 2011). Dentre seus diversos usos, destaca-se a aplicação na agricultura, onde é utilizado como biocida e na indústria de papel e celulose, utilizado no branqueamento da polpa (SILVA, 2011).

2.7. Flavonóides

Compostos fenólicos que são produzidos no citosol e vacúolos dos vegetais. Os flavonóides são moléculas de baixo peso molecular e apresentam grande ação antioxidante, sendo capaz de inibir a peroxidação dos lipídeos e reduzir o dano celular causado pelo estresse oxidativo (ALINIAN et al., 2016).

São constituídos estruturalmente por substâncias aromáticas com quinze átomos de carbono (C15) em seu esqueleto básico, possuindo nessa estrutura anéis aromáticos C6-C3-C6. Esse esqueleto é biogeneticamente derivado do fenilpropano (C6-C3) e três unidades de acetato (C6) (YOKOZAWA et al., 1997).

Flavonóides possuem, segundo Machado et al. (2008), várias funções e utilizações de potencial terapêutico.

Este grupo de compostos incluem as catequinas, as flavanonas, as flavonas, as antocianidinas. Já a quercetina é um composto comum encontrado na madeira e na casca de diversas espécies de coníferas de madeira macia, como *Pinus* e *Podocarpus*, e também em espécies de *Prunus* (YAZAKI, 2014).

2.8. Taninos

Os taninos fazem parte de um grupo de compostos fenólicos oriundos do metabolismo secundário das plantas, sendo definidos como polímeros fenólicos solúveis em água que precipitam proteínas (HASLAM, 1966), que apresentam peso molecular entre 500 e 3000 Dalton, e tem a habilidade de formar complexos insolúveis em água com proteínas, gelatinas e alcalóides (MONTEIRO et al., 2005).

Podem ser encontrados de duas formas na natureza: hidrolisáveis e condensáveis. Os hidrolisáveis são constituídos por fenóis simples, tais como pirogalol e ácido elágico, e também ésteres do ácido gálico ou digálico com açúcares, como a glicose (HERGERT, 1989). São unidos por ligações éster carboxila, sendo prontamente hidrolisáveis em condições ácidas ou básicas (HAGERMAN; BUTLER, 1981).

Os condensáveis são formados por unidades flavanol: flava-3-ols (cetequina) ou flavan 3,4-diols (leucoantocianinas). Estão presentes em sua maioria em alimentos consumidos com frequência (DESPHANDE et al., 1986, SALUNKHE et al., 1990).

2.9. Alcalóides

Alcalóides são compostos nitrogenados, farmacologicamente ativos, encontrados predominantemente nas angiospermas. Em sua grande maioria possuem caráter alcalino (MELLO et al., 1999). Porém, existem alcalóides de caráter ácido, como a colchicina.

A colchicina é um alcaloide com amplo espectro terapêutico, tradicionalmente utilizada no tratamento e prevenção de crises de gota e da febre mediterrânea familiar, com potencial para redução significativa do risco de infarto do miocárdio, acidente vascular cerebral e mortalidade associada à aterosclerose. (DHYANI et al., 2022)

Segundo Marques e Lopes (2015), os alcalóides surgem como uma ótima alternativa como agentes antitumorais. Eles podem possuir coloração amarela, roxa ou incolor e, quando na forma de sais, ficam localizados nas paredes celulares, podendo ser encontrados nas folhas, sementes, raízes e caules (MARTINS et al., 2003).

2.10. Terpenos

Dentre os metabólitos secundários os terpenos constituem o grupo mais numeroso (mais de 40.000 moléculas diferentes). O caminho biossintético desses compostos dá origem a metabólitos primários e secundários sendo ambos de grande relevância para o crescimento e desenvolvimento das plantas. São geralmente insolúveis em água e todos derivam da união de isopreno (5 átomos de C), sendo classificados pelo número dessas unidades (GARCIA, 2009).

Segundo García (2009), muitas plantas como limão, menta, eucalipto ou tomilho, produzem misturas de álcoois, aldeídos, cetonas e terpenos chamados de óleos essenciais. Eles são responsáveis pelos odores e sabores característicos dessas plantas, sendo de grande interesse comercial devido seus aromas e fragrâncias, utilizados na indústria alimentícia, farmacêutica e agrícola.

2.11. Esteroides

Os esteroides presentes nos vegetais são uma grande classe de compostos, no reino vegetal equivalem ao colesterol entre os mamíferos e podem ser encontrados em diferentes partes das plantas. Existem evidências que certos fitoesteroides são eficientes na redução de níveis de colesterol, ajudando na prevenção de doenças cardiovasculares (BECCEL, 2022).

Os esteroides se apresentam como álcool livre (3 β -OH), esterificados a ácidos graxos ou como glicosídeos. Eles constituem as membranas das plantas, algas e fungos e afetam a sua permeabilidade (DEWICK,2002, GROS, 1985).

CAPÍTULO 1

**TEORES DE EXTRATIVOS E PERFIL FITOQUÍMICO DOS RESÍDUOS DO
BENEFICIAMENTO DA NOZ DA MACADÂMIA DE *MACADAMIA INTEGRIFOLIA*
MAIDEN & BETCHE E AVALIAÇÃO DOS EXTRATIVOS NO CRESCIMENTO
IN VITRO DE *ADENANTHERA PAVONINA* L.**

EXTRACTIVE CONTENTS AND PHYTOCHEMICAL PROFILE OF *MACADAMIA*
INTEGRIFOLIA MAIDEN & BETCHE NUT PROCESSING RESIDUES AND
EVALUATION OF THE EXTRACTS ON THE *IN VITRO* GROWTH OF
ADENANTHERA PAVONINA L.

RESUMO

A noqueira macadâmia, cultivada no Brasil, pertence à espécie *Macadamia integrifolia*, sua noz, conhecida como noz da macadâmia, apresenta interesse no mercado internacional, com grande procura entre os consumidores. O processamento da noz da macadâmia gera uma alta quantidade de resíduos, 75% de subprodutos que, quando descartados inapropriadamente, contribuem para o acúmulo de rejeitos e para a poluição ambiental. Os endocarpos (cascas dos frutos da macadâmia) são uma biomassa lignocelulósica residual proveniente dessa utilização e apresenta um lento processo de decomposição. Estudos destacam o uso dessa biomassa para os mais diversos fins. Nesse contexto, o objetivo do trabalho foi avaliar os teores de extrativos e caracterizar o perfil fitoquímico dos extrativos dos resíduos da noz da macadâmia e verificar a influência desses metabólitos adicionados ao meio nutritivo, no crescimento *in vitro* de plantas de *Adenanthera pavonina*. Os endocarpos (cascas dos frutos da macadâmia) foram obtidos da unidade industrial de beneficiamento de nozes da TRIBECA, na Fazenda Santa Marta, localizada no Município de Piraí, Estado do Rio de Janeiro. Os endocarpos (cascas) foram armazenados em sala climatizada a 25°C. Os resíduos foram moídos e submetidos a um ciclo de extração empregando três solventes orgânicos de ordem crescente de polaridade, a saber: cicloexano, acetato de etila e metanol. Com os extratos obtidos foram realizadas análises de quantificação, fitoquímica preliminar, caracterização química por FTIR, determinação de fenóis totais, análise de capacidade antioxidante por FRAP e aplicação dos extrativos no crescimento *in vitro*. O solvente metanol foi o solvente que apresentou a maior concentração de extratos. O extrato metanólico é um material rico em compostos fenólicos com alta capacidade antioxidante. A adição do extrativo de noz da macadâmia em meio nutritivo provocou efeitos no crescimento *in vitro* de *Adenanthera pavonina*, sendo que em baixas concentrações tende a ser benéfico.

Palavras-chaves: cascas da noz da macadâmia, extrativos, fitoquímica, antioxidantes, meio nutritivo.

ABSTRACT

The macadamia tree, cultivated in Brazil, belongs to the species *Macadamia integrifolia*. Its nut, known as Macadamia Nut, is of interest in the international market, with high demand among consumers. The processing of Macadamia Nut generates a large amount of waste, with 75% consisting of by-products that, when improperly discarded, contribute to waste accumulation and environmental pollution. The endocarps (macadamia fruit shells) are residual lignocellulosic biomass resulting from this utilization and have a slow decomposition process. Studies highlight the use of this biomass for various purposes. In this context, the objective of this study was to evaluate the extractive contents and characterize the phytochemical profile of the extracts from Macadamia Nut residues and to evaluate the influence of these metabolites, when added to the nutrient medium, on the *in vitro* growth of *Adenanthera pavonina* plants. The endocarps (macadamia fruit shells) were obtained from the nut processing industrial unit of TRIBECA, located at Santa Marta Farm in the municipality of Piraí, State of Rio de Janeiro. The endocarps (shells) were stored in a climate-controlled room at 25°C. The residues were ground and subjected to an extraction cycle using three organic solvents of increasing polarity: cyclohexane, ethyl acetate, and methanol. The obtained extracts were analyzed for quantification, preliminary phytochemical screening, chemical characterization by FTIR, determination of total phenols, antioxidant capacity analysis by FRAP, and application of the extracts in *in vitro* growth. Methanol was the solvent that yielded the highest concentration of extracts. The methanolic extract is rich in phenolic compounds with high antioxidant capacity. The addition of Macadamia Nut extract to the nutrient medium affected the *in vitro* growth of *Adenanthera pavonina*, showing beneficial effects at low concentrations.

Keywords: Macadamia Nut shells, Extracts, Phytochemistry, Antioxidants, Nutrient medium.

1. INTRODUÇÃO

A noqueira macadâmia, cultivada no Brasil, pertence à espécie *Macadamia integrifolia* (Proteaceae), que é endêmica das florestas subtropicais do leste da Austrália (ENTELMANN et al., 2014; PIZA; MORIYA, 2014). Sua noz, conhecida como macadâmia, apresenta interesse no mercado internacional, com grande procura entre os consumidores.

O processamento da noz da macadâmia gera uma alta quantidade de resíduos. 75% de subprodutos que, quando descartados inapropriadamente, contribuem para o acúmulo de rejeitos e para a poluição ambiental. (PERDONA et al.; 2014). Estima-se que a oferta de nozes de macadâmia aumentará o dobro nos próximos 4 a 5 anos e triplicará até 2030 (AHMED et al. 2024). Com a expansão dos plantios de macadâmia, a destinação dos resíduos tornou-se um problema para as indústrias de processamento devido ao aumento da produção. Sendo assim, se faz necessário buscar alternativas para o uso desses rejeitos.

Atualmente, a literatura destaca que apenas uma pequena fração desses subprodutos são utilizados, tais como fonte de combustível, cobertura morta de jardim e fabricação de painéis de partículas (AZAD et al., 2017, RAJARAO; SAHAJWALLA, 2016, WECHSLER et al., 2011. WECHSLER et al., 2013). A fim de ter uma definição para o potencial uso de um material é necessário conhecê-lo. Análises que permitam compreender a sua estrutura, composição e comportamento são essenciais para responder a melhor aplicabilidade. O conhecimento da natureza química dos materiais lignocelulósicos, com destaque para os extrativos (metabólitos secundários) desempenha um papel de grande importância em diversas áreas.

Os extrativos vegetais são substâncias de baixo peso molecular que podem ser extraídas utilizando diferentes tipos de solventes e compreendem uma extraordinária pluralidade de compostos químicos. Sua constituição varia conforme a origem do material, mas pode ser classificada em três principais grupos: terpenos, compostos alifáticos e compostos aromáticos (WASTOWSKI, 2018). Muitos destes apresentam um alto potencial e valor agregado associado às suas aplicações nas indústrias farmacêuticas, de cosméticos, de alimentos, onde são explorados por suas propriedades terapêuticas (SÁ-FILHO, et al., 2021, AZEVEDO JUNIOR, et al., 2022). Ademais, os extrativos vegetais apresentam potencial na propagação *in vitro* devido às suas propriedades bioativas, que auxiliam em diferentes processos fisiológicos e de desenvolvimento das plantas. Os subprodutos de nozes de macadâmia podem ser aproveitados como bioativos, particularmente devido à presença de compostos fenólicos (AHMED et al., 2024).

A propagação *in vitro* tem sido utilizada como um meio rápido de propagação vegetativa e junto com outras técnicas biotecnológicas, permite a obtenção de um grande número de plantas com autenticidade varietal e em qualquer época do ano. O sucesso desta técnica não só depende dos fatores inerentes ao tecido vegetal (genéticos e fisiológicos), mas também das condições térmicas e luminosas em que a cultura é mantida e do meio de cultura apropriado, que permite a indução, a multiplicação e o crescimento de brotações adventícias (CARDOSO, 2014). Algumas espécies são selecionadas para o crescimento *in vitro* devido ao seu potencial, dentre elas a *Adenanthera pavonina* L.

Adenanthera pavonina L. é uma espécie arbórea da família Fabaceae, subfamília Mimosoideae, nativa da Ásia mas naturalizada em muitas partes do mundo (Mohamed et al., 2022). A espécie apresenta uma variedade de ativos fitoquímicos que são responsáveis pelo longo histórico de uso medicinal, como para febre, vômito, diarreia, gota, reumatismo, hipertensão, condições hemorrágicas, entre outros (ARA et al., 2020. GERONÇO et al., 2020). Estas características fazem com que o estudo da espécie seja importante, incluindo aspectos de sua propagação.

A micropropagação permite verificar a influência de variados fatores na morfogênese vegetal *in vitro*, na busca de uma metodologia eficiente para produção em larga escala (XAVIER et al., 2021). Dentre os fatores que influenciam o desenvolvimento vegetal *in vitro* está a composição do meio nutritivo. Vários elementos são adicionados no meio nutritivo com a

finalidade de direcionar o crescimento vegetal, como reguladores de crescimento, antioxidantes, fontes de carbono (HARTMANN et al., 2014). No entanto, outras substâncias com funções semelhantes às comumente utilizadas no meio nutritivo podem ser utilizadas, visando tanto a redução de custos como a busca de melhores respostas. Neste contexto, o uso de extrativos vegetais surge como uma possibilidade cujo resultado de interação *in vitro* com material vegetal ainda é desconhecido.

O objetivo deste estudo foi avaliar os teores de extrativos e caracterizar o perfil fitoquímico dos extrativos dos resíduos da noz da macadâmia e verificar a influência desses metabólitos adicionados ao meio nutritivo, no crescimento *in vitro* de plantas de *Adenanthera pavonina*.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Material

Para este estudo foram obtidos resíduos (endocarpos) da noz da macadâmia (*Macadamia integrifolia*) da unidade industrial de beneficiamento de nozes da TRIBECA, na Fazenda Santa Marta, localizada no Município de Piraí, estado do Rio de Janeiro.

Os resíduos foram transportados para o Laboratório de Química da Madeira do Departamento de Produtos Florestais (IF-UFRRJ) e armazenados em sala climatizada a 25°C.

2.2. Obtenção dos extratos dos resíduos dos endocarpos (cascas dos frutos da macadâmia)

O material foi moído em moinho tipo Willey. A fração utilizada foi a que atravessou a peneira de malha 40 mesh e ficou retida na peneira de malha 60 mesh. Foram colocados 10 g da amostra homogeneizada em cartuchos de papel filtro e em seguida submetida a três extrações sucessivas com ciclo hexano, acetato de etila e metanol por 12 horas em aparelho soxhlet, utilizando-se 250 ml de cada solvente por extração (ABREU et al., 2006).

2.3. Prospeção fitoquímica

Os ensaios fitoquímicos para a identificação das classes de metabólitos secundários presentes no extrato dos resíduos da noz da macadâmia (*Macadamia integrifolia*) foram realizados seguindo as metodologias propostas por Matos (2009). As análises foram feitas a partir do extrato hidrolítico (metanol). O extrato foi submetido a testes para a verificação de fenóis e taninos (reação com cloreto férrico), antocianinas, antocianidinas e flavonóides (teste de variação de pH, com hidróxido de sódio e ácido clorídrico), leucoantocianidinas, catequinas e flavonas (teste de variação de pH e aquecimento, com hidróxido de sódio e ácido clorídrico), flavonóis, flavanonas, flavanonois e xantonas (teste de Shinoda), esteróides e triterpenóides (teste de Liebermann - Burchard), saponinas (teste de espuma), resinas (teste de turvação do extrato) e alcalóides (reação com Dragendorff e Mayer).

2.4. Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Para a análise de espectroscopia FTIR foram utilizadas amostras secas do extrato dos extratos obtidos em Metanol dos resíduos da noz da macadâmia (*Macadamia integrifolia*). Os espectros foram registrados em um espectrômetro BRUKER modelo VERTEX 70 no modo Attenuated Total Reflectance (ATR) utilizando 4 cm⁻¹ de resolução e amplitude espectral entre 4000-400 cm⁻¹.

2.5. Análise da capacidade antioxidante por FRAP

A determinação da capacidade antioxidante foi realizada pelo método de redução do íon férrico (FRAP, Ferric Reducing Antioxidant Power), em triplicata. Foi adquirido kit MAK369 da Sigma-Aldrich e o experimento performado conforme indicado pelo fabricante. Em placas de 96 poços foram adicionados 10 µl das amostras do extrato dos resíduos da noz da macadâmia em metanol de grau P.A ACS, na concentração de 0,2 mg/ml. Às amostras foram adicionados 190 µl da mistura reacional, e a reação ocorreu em banho maria estável a 37°C durante 60 minutos. A leitura da absorvância foi feita em equipamento ELISA a 595 nm. A capacidade antioxidante foi então inferida por interpolação do valor de absorvância das amostras em comparação com uma curva padrão de solução de ferro (II) (0, 4, 8, 12, 16, 20 nmol/poço).

Também foram realizados controle positivo e leitura do branco, conforme indicado pelo fabricante.

O valor para FRAP mM de Fe^{2+} equivalentes foi dado pela equação:

$$\text{FRAP (mM Fe}^{2+}\text{)} = \frac{B \cdot D}{V}$$

onde:

B = concentração em nmol da curva padrão de ferro (II);

D = fator de diluição da amostra;

V = volume (em μl) da amostra adicionado em cada poço.

Esse método baseia-se na redução do complexo de Fe^{3+} -TPTZ (2,4,6-tri (2-piridil 1,3,5-triazina) à sua forma ferrosa em pH ácido. A ligação de Fe^{2+} ao ligante gera uma cor azul muito intensa, correlacionando assim com a concentração de antioxidantes (CAO; PRIOR 1999. RODRIGUES, 2017).

2.6. Determinação do teor de fenóis totais

Para a determinação do teor de fenólicos totais foi utilizado o extrato obtido na extração com metanol dos resíduos da noz da macadâmia. O ensaio de determinação do teor de fenólicos totais foi realizado utilizando o método redox com reagente de Folin Ciocalteu. O extrato metanólico foi previamente solubilizado (0,25 mg/ml) em metanol espectroscópico no momento do ensaio. Foi utilizada neste ensaio uma cubeta de quartzo com caminho óptico de 1 cm. Uma alíquota (50 μl) de cada um dos extratos foi transferida para um tubo de ensaio, onde foi acrescentado 2,5 ml do reagente Folin Ciocalteu (1:10. previamente diluído em água ultrapura) e 2,0 ml de uma solução de Na_2CO_3 (4%) recém preparada em água ultrapura. A mistura reacional ficou em repouso durante 30 minutos em banho maria à 50°C, onde foi possível observar uma mudança de coloração do amarelo esverdeado para o azul. A leitura foi feita após o tempo de incubação em espectrofotômetro UV-vis fixo em 760 nm utilizando como branco, água ultrapura (SALGUEIRO; CASTRO, 2016). O total de substâncias fenólicas foi inferido por interpolação da absorbância de acordo com uma curva analítica construída a partir do padrão comercial ácido gálico. A curva analítica foi construída a partir de uma solução metanólica do padrão comercial, com faixa de concentração que variou de 25-600 $\mu\text{g ml}^{-1}$ e o ensaio foi realizado a partir de 50 μl de cada uma das soluções, de diferentes concentrações, sob as mesmas condições reacionais. A construção da curva analítica foi conduzida no software Origin 6.0 para a obtenção de uma equação da reta onde Y é o valor da absorbância e X a concentração correspondente. Através da equação ($Y = 0,12497 + 0,12951 x$, onde o coeficiente de correlação foi $R = 0,99949$) determinou-se indiretamente o teor de fenólicos totais nas amostras. Todas as análises foram realizadas com três repetições. Os resultados foram expressos em mg equivalentes de ácido gálico por 100 mg de extrato (EAG, 100 mg de extrato).

2.7. Determinação do teor de flavonoides totais

A determinação do teor de flavonoides totais foi realizada pelo método de complexação com cloreto de alumínio adaptado de Mihai et al. (2012) e Epifanio et al. (2020), utilizando espectroscopia na região do visível. Foram preparadas soluções de 1 mg/ml do extrato da noz da macadâmia em metanol de grau P.A ACS, e as análises foram realizadas em triplicata. A uma

alíquota de 05 ml de cada solução de amostra foram adicionados 0,5 ml do reagente AlCl_3 5% e 9 ml de metanol. A mistura foi deixada em repouso por 30 minutos. Todas as soluções utilizadas foram preparadas no dia da utilização. Em seguida, fez-se leitura em espectrofotômetro no comprimento de onda de 430 nm, em cubeta de quartzo de caminho óptico de 1 cm e utilizando metanol como branco. O teor de flavonoides totais foi inferido por interpolação do valor de absorvância das amostras com base numa curva analítica construída com soluções padrão de quercetina (0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100 $\mu\text{g/mL}$). Os valores foram expressos em mg de equivalentes de quercetina por g de extrato seco (mgEQ/g).

2.8. Avaliação do crescimento de *Adenanthera pavonina*

Este trabalho foi conduzido no Laboratório de Recursos Genéticos Florestais (Laborgen) do Núcleo de Biotecnologia Florestal (NU), do Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). Seropédica - RJ.

Para obtenção de plantas *in vitro* isentas de contaminação, realizou-se a assepsia e quebra de dormência das sementes de *Adenanthera pavonina* em solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) 98% por 15 minutos, sob agitação constante, com posterior lavagem das sementes em água destilada e autoclavada. em câmara de fluxo laminar (SILVEIRA; MIRANDA. 2022). Após desinfestação, as sementes foram inoculadas em frascos contendo 30 ml de meio de cultura MS (MURASHIGE; SKOOG, 1962) acrescido de 0,1 g/l de mio-inositol, 08 g/l de polivinilpirrolidona (PVP), 20 g/l de sacarose e 2,3 g/l de phytigel, com pH ajustado para 5.7 ± 0.1 . Foram inoculadas 3 sementes por recipiente, os quais foram mantidos em sala de cultura com temperatura de $25 \pm 2^\circ\text{C}$ e fotoperíodo de 16 h. Após 30 dias, as plântulas estabelecidas *in vitro* foram utilizadas como fonte de explantes.

2.8.1. Experimento 1

Em câmara de fluxo laminar, segmentos nodais apresentando cerca de 2 cm de comprimento foram inoculados em frascos contendo 30 ml de meio de cultura MS acrescido de 0,1 g/l de mio-inositol 0,8 g/l de PVP, 30 g/l de sacarose, 2 mg/l de benzilaminopurina (BAP). 0,5 mg/l de ácido naftaleno acético (ANA) e 23 g/l de phytigel, com pH ajustado para $5,7 \pm 0,1$. Testou-se a adição no meio de cultura de extrativo de noz da macadâmia nas concentrações 0, 0,1, 1 e 10 mg/l. Antes da inoculação do explante, o meio de cultura foi autoclavado por 20 minutos à temperatura de 120°C e pressão de 1 atm. Em cada frasco de cultivo foi inoculado um segmento nodal de *Adenanthera pavonina*.

Os frascos contendo o material vegetal foram mantidos em sala de cultivo em temperatura de $25 \pm 2^\circ\text{C}$, fotoperíodo de 16 h, intensidade de $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{S}^{-1}$ em lâmpadas LED branca (420-695 nm, Tubular T8, 9w, Inmetro). Adotou-se um delineamento inteiramente casualizado com 4 tratamentos (concentrações de extrativo), 8 repetições, cada unidade experimental composta por um frasco com um explante.

Aos 35 dias de cultivo, avaliou-se o número de explantes responsivos. Considerou-se explante responsivo aquele que apresentava respostas de crescimento *in vitro*.

2.8.2. Experimento 2

Em câmara de fluxo laminar, segmentos nodais apresentando cerca de 2 cm de comprimento foram inoculados em frascos contendo 30 ml de meio de cultura MS acrescido de 0,1 g/l de mio-inositol, 0,8 g/l de PVP, 30 g/l de sacarose, 6 mg/l de BAP, 1,0 mg/l de ANA e 2,3 g/l de Phytigel®, com pH ajustado para $5,7 \pm 0,1$. Testou-se a adição no meio de cultura de extrativo de noz da macadâmia nas concentrações 0; 0,1; 0,5; 1 e 10 mg/l. O experimento foi

conduzido semelhante ao experimento 1, adotando-se um delineamento inteiramente casualizado com 5 tratamentos (concentrações de extrativo), 10 repetições, cada unidade experimental composta por um frasco com dois explantes. Aos 35 dias de cultivo avaliou-se o número de gemas e o número de brotos maiores que 1 cm.

2.9. Coleta e análise de dados

As pressuposições para a realização de análise de variância dos dados foram executadas por meio dos testes Bartlett e Shapiro-Wilk. Os dados obtidos foram submetidos a análises de variância e de regressão. O nível de significância de 5% de probabilidade de erro foi adotado como padrão nas análises realizadas em ambiente R versão 4.2.3 (R Core Team, 2023), utilizando o pacote ExpDes (FERREIRA et al., 2014). Para a variável número de brotos maiores que 1 cm se realizou a transformação para $\sqrt{x + 0,5}$, para posterior análise de variância. Os valores médios apresentados para esta variável representam valores no transformados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Teores de extrativos dos resíduos da noz da macadâmia

A Tabela 2 ilustra os valores médios de extrativos utilizando os diferentes solventes.

Tabela 2. Teores de extratos obtidos para as amostras dos resíduos da noz da macadâmia (*Macadamia integrifolia*), utilizando os solventes ciclo-hexano, acetato de etila e metanol.

Solventes			
Ciclo-hexano (%)	Acetato de etila (%)	Metanol (%)	Total (%)
0,99	1,85	4,57	7,41

O metanol foi o solvente que apresentou a maior proporção de extratos (Tabela 2). Vários estudos relataram que o solvente desempenha um papel crucial na extração de compostos dos subprodutos da macadâmia (DAILEY; VUONG, 2015a; SOMWONGIN et al., 2021; SOMWONGIN et al., 2023, TRAN et al., 2023, ZHANG et al., 2023). O metanol é utilizado na extração de substâncias polares, esse solvente tem grande eficiência na extração de compostos fenólicos e flavonoides (SANVIDO, 2015).

3.2 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Em virtude da ampla composição química dos extratos polares efetuou-se uma análise dos grupos funcionais, visando identificar seus constituintes químicos (Figura 4).

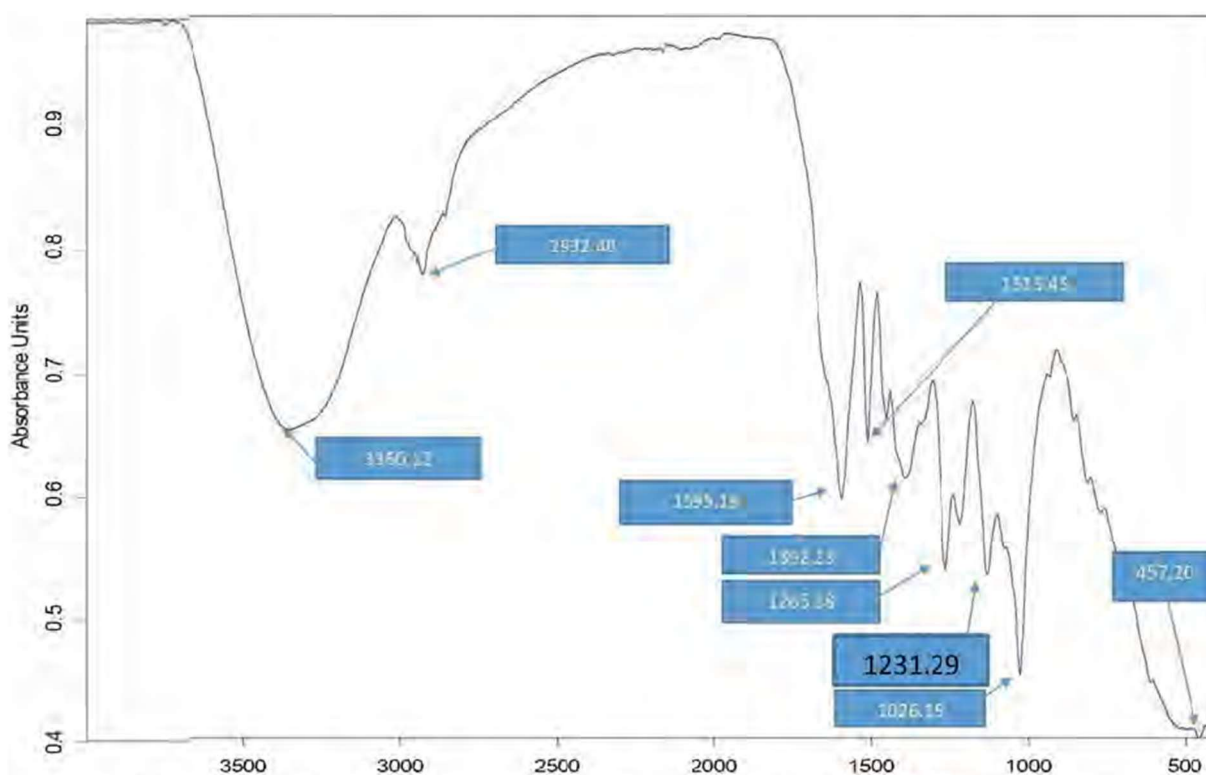


Figura 4. Espectro no infravermelho por análise FTIR dos extratos obtidos para amostras dos resíduos da noz da macadâmia (*Macadamia integrifolia*, utilizando o solvente metanol.

Além da posição característica da absorção, a análise dos grupos funcionais no espectro do infravermelho FTIR se dá pela forma e intensidade com que os sinais se apresentam. Cada região do espectro se refere a vibração ou ao estiramento de um grupo funcional sendo possível dessa forma a determinação da estrutura molecular da amostra analisada (PAVIA et al., 2010).

Verificou-se bandas largas em $3360,12\text{ cm}^{-1}$ relativas ao estiramento da ligação -OH e indicativas da presença de compostos hidroxilados, como fenóis, álcoois ou hidrogênios de moléculas de água ligados a esses grupos. As vibrações de estiramento N-H também ocorrem nessa faixa, sendo indicativa da presença de compostos nitrogenados como alcalóides (tabela 3).

O pico de absorção em $2932,48\text{ cm}^{-1}$ se refere a (C-H) de grupo dos alcanos saturados. A banda $1595,18\text{ cm}^{-1}$ demonstra estiramento da ligação (C=C) de compostos aromáticos, decorrentes da vibração esquelética do anel benzênico, o que indica a presença de compostos fenólicos, dentre eles as classes de taninos, flavonoides e catequinas, pois estes possuem um ou mais grupos hidroxila ligados ao benzeno, sendo o fenol a sua estrutura básica (Tabela 3).

Já o pico de absorção na região $1265,38\text{ cm}^{-1}$ pode representar vibrações de estiramento e dobramento acopladas ao grupo (C-CO-C) de cetonas, além da presença de cetonas aromáticas. Pode também indicar a presença de alguns grupos carbonila de ésteres que aparecem na mesma região das cetonas (Tabela 3).

Por fim, a banda $1026,19\text{ cm}^{-1}$ representa estiramentos vibracionais do grupo (C-O) dos álcoois e fenóis e, juntamente com a banda em torno de $3360,12\text{ cm}^{-1}$ (grupo -OH), sugere a presença de estruturas polihidroxiladas (Tabela 3).

Tabela 3. Picos de absorção dos extratos da noz da macadâmia

Frequência (cm^{-1})	Tipo de Vibração	Referência
3375 -3337	Ligação -OH; Estiramento -N-H	(SILVÉRIO, 2008; PAVIA et al., 2010; KHAN et al., 2022)
1600-1454	Estiramento C=C de compostos aromáticos	(BARBOSA, 2005; SILVERIO, 2008)
1300-1100	Estiramento e dobramento C-CO-C de cetonas	(PAVIA et al., 2010)
1220-1026	Estiramento C-O dos álcoois e fenóis	(FREIRE., 2020)

Os compostos fenólicos, detectados nas análises espectrométricas acima, são responsáveis por diversas propriedades medicinais e atividades biológicas. A casca de macadâmia tem sido extensivamente estudada objetivando caracterizar seus compostos fenólicos, suas propriedades antioxidantes, a fim de explorar suas aplicações potenciais (AHMED et al., 2024). Visando identificar as principais classes de metabólitos presentes na noz da macadâmia e ampliar o conhecimento sobre as suas possíveis aplicações foi realizada a prospecção fitoquímica.

3.3 Perfil fitoquímico

A Tabela 4 apresenta as classes de metabólitos secundários encontradas após a análise de prospecção fitoquímica do extrato metanólico dos resíduos da noz da macadâmia.

Tabela 4. Classes de metabólitos secundários presentes no extrato metanólico dos resíduos da noz da macadâmia.

Constituintes	Extrato metanólico
Alcaloides	+
Taninos	+
Fenóis	+
Antocianinas e Antocianidinas	-
Flavonas, Flavonóis, Xantonas	+
Chalconas e Auronas	-
Flavanonóis	-
Leucoantocianidinas	+
Catequinas	+
Flavanonas	+
Flavonóis, Flavanonas, Flavanonóis e Xantonas	+
Esteróides	+
Triterpenóides	+
Saponinas	-
Resinas	-

Legenda: + = positivo; - = negativo

O extrato metanólico obtido dos resíduos da noz da macadâmia apresentou resultados positivos para alcaloides e demonstrou-se um material rico em compostos fenólicos de alto peso molecular com potencial antioxidante, por exemplo taninos condensados, fenóis e catequinas. Pesquisas recentes descobriram que os subprodutos da macadâmia contêm uma variedade de compostos fenólicos (ALTAE et al., 2024; SHI et al., 2022; YANO; LU, 2022; ZHANG et al., 2023), principalmente ácidos fenólicos e flavonoides.

Os alcaloides são compostos orgânicos nitrogenados encontrados em diversas plantas e são amplamente conhecidos por seus efeitos biológicos e farmacológicos. Eles podem ser utilizados em medicamentos, como pesticidas naturais, estimulantes e psicoativos. A diversidade de seus efeitos biológicos os torna promissores em áreas como o tratamento de doenças neurológicas, cardiovasculares e infecciosas. (HEINRICH et al., 2021)

Os compostos fenólicos são uma vasta classe de substâncias químicas encontradas em plantas, caracterizados por um ou mais grupos hidroxila (-OH) ligados a um anel benzênico. Eles possuem uma variedade de usos, principalmente devido às suas propriedades antioxidantes e antimicrobianas. Eles são conhecidos por sua capacidade de neutralizar radicais livres, protegendo as células do estresse oxidativo e por sua eficácia contra uma ampla gama de patógenos (PANZELLA, 2020).

Os esteroides presentes nos extrativos vegetais desempenham funções importantes em diversas áreas, incluindo saúde e medicina. Eles são utilizados em produtos farmacêuticos, cosméticos e suplementos alimentares pois podem ajudar a melhorar a absorção de nutrientes e a promover a saúde cardiovascular, além de serem utilizados em formulações que visam a saúde da pele e a beleza geral (KUMAR, 2023).

Observou-se a presença de triterpenoides, que são compostos naturais que apresentam uma ampla gama de usos e benefícios para a saúde. Eles são conhecidos por suas propriedades anti-inflamatórias, antioxidantes e anticancerígenas, sendo utilizados em diversas áreas, como a medicina e a nutrição (NGUYEN et al., 2021).

3.4. Fenóis totais, flavonóides totais e capacidade antioxidante por FRAP

A Tabela 5 apresenta os dados obtidos para a avaliação de fenóis totais, flavonoides totais e a capacidade antioxidante realizados no extrato dos resíduos da noz da macadâmia.

Tabela 5. Resultados de fenóis totais, flavonoides totais e capacidade antioxidante pelo método FRAP do extrato metanólico de resíduos da noz da macadâmia.

Amostras	Teor de fenóis totais (mgEAG/g)	Teor aproximado de flavonóides totais (mgEQ/g)	FRAP (0,2 mg/ml de extrato)
Resíduos da noz da macadâmia	66,07 ± 2,09	22,84 ± 0,23	2,39 ± 0,66

EAG= equivalentes de ácido gálico; EQ= equivalentes de quercetina

Através das análises, foi possível confirmar a presença de compostos fenólicos e flavonoides no extrato metanólico dos resíduos da noz da macadâmia (Tabela 5), conforme evidenciado nos resultados obtidos por meio da técnica de FTIR (Figura 4) e na prospecção fitoquímica (Tabela 4). O teor de fenólicos e a capacidade antioxidante têm uma relação significativa, indicando que os compostos fenólicos contribuem para atividade antioxidante (DAILEY E VUONG, 2015; SOMWONGIN ET AL., 2023; ZHANG et al., 2023).

O teor de fenóis totais quantificado no extrato metanólico dos resíduos da noz da macadâmia foi de 66,07 ± 2,09 mgEAG/g de extrativo e o teor de flavonoides totais foi de 22,84 ± 0,23 mgEQ/g de extrativo (Tabela 4). As propriedades antioxidantes dos extratos da casca verde da noz da macadâmia têm sido fortemente correlacionadas com o teor de compostos fenólicos e teor de flavonoides (DAILEY & VUONG, 2015).

O extrato metanólico dos resíduos da noz da macadâmia apresentou capacidade antioxidante no valor de 2,39 ± 0,66 mg/ml (Tabela 5). De acordo com Zhang et al. (2023), um extrato purificado da casca verde da noz da macadâmia obteve excelente atividade antioxidante.

A utilização da casca como fonte de fitoquímicos bioativos ou antioxidantes naturais pode agregar valor aos subprodutos da macadâmia.

3.5. Avaliação do crescimento *in vitro* de *Adenanthera pavonina* L.

O número de explantes responsivos, avaliados no experimento 1, foram influenciados pela concentração de extrativo de noz da macadâmia utilizada (Tabela 6). Os explantes considerados não responsivos não apresentavam sinal de crescimento após 35 dias de inoculação ou estavam mortos. Observou-se efeito linear decrescente quanto à resposta dos explantes frente às concentrações do extrativo (Figura 5). As menores concentrações de extrativos proporcionaram maior quantidade de explantes responsivos *in vitro*.

Tabela 6. Resultado da análise de variância para as variáveis número de explantes responsivos, número de gemas e número de brotos maiores que 1 cm, obtidos nos experimentos 1 e 2 a partir de segmentos nodais de *Adenanthera pavonina* inoculados *in vitro* em função.

Experimento	Variável	P	CV (%)
Exp. 1	Explantes	0,0044	70,28
Exp. 2	Gemas	0,0638	48,29
	Brotos	0,2809	49,31

CV: Coeficiente de Variação; P: probabilidade do valor P; * - p < 0,05; ns: p ≥ 0,05.

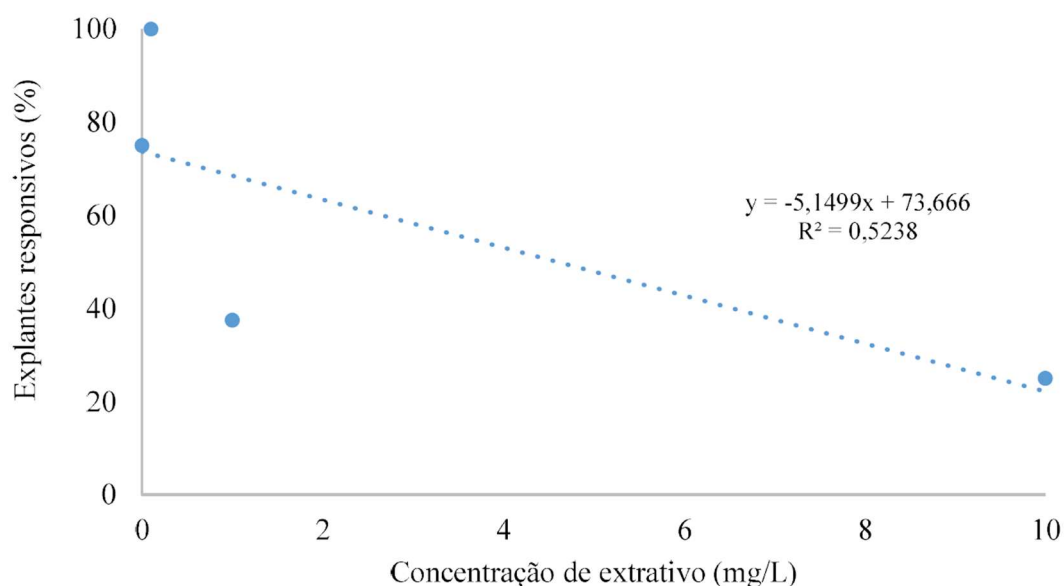


Figura 5. Número de explantes responsivos em função das concentrações de extrativo dos resíduos do beneficiamento da noz da macadâmia no cultivo *in vitro* de segmentos nodais de *Adenanthera pavonina*, aos 35 dias após a inoculação.

O aumento de explantes no responsivos nas maiores concentrações de extrativos sugere uma toxidez da substância, ou efeito prejudicial no cultivo *in vitro* da espécie sob tais concentrações. No entanto, o percentual médio de explantes responsivos foi de 75% na ausência de extrativo para 100% na presença de extrativo na concentração de 0,1 mg/l. Este resultado indica que, em baixas concentrações, a adição do extrativo no meio nutritivo pode trazer efeito benéficos para as plantas *in vitro*.

Os resultados apresentados no experimento 2, indicam que não houve diferença significativa entre as concentrações testadas quanto à emissão de gemas e brotos *in vitro* (Tabela 6). A presença de maiores concentrações de citocinina e auxina, quando comparado ao experimento 1, permitiram avaliar o efeito do extrativo também na multiplicação *in vitro* da espécie. A média de número de gemas emitidas por explante foi de 10,0 na ausência de extrativo, 14,5 na concentração de 0,05 mg/l, 7,0 na concentração 0,1 mg/l, 9,5 na concentração 1,0 mg/l e 5,0 na concentração de 5 mg/l de extrativo de noz da macadâmia. Quanto ao número de brotos maiores que 1 cm, as médias foram de 3,5, 7,0, 3 1,0 e 0,0 cm para as concentrações 0, 0,5, 0,1, 1 e 10 mg/l, respectivamente. Apesar de não ter sido encontrada diferença significativa, a adição de menor concentração de extrativo no meio nutritivo também sugere que pode haver algum benefício com o uso da substância em pequenas quantidades.

4. CONCLUSÕES

Através dos resultados encontrados foi possível concluir que:

O solvente metanol possibilitou a obtenção de maiores percentuais de extratos.

A espectroscopia de FTIR identificou os grupos funcionais presentes nos extrativos de noz da macadâmia, destacando-se principalmente as substâncias fenólicas.

O extrativo de noz da macadâmia apresenta metabólitos secundários específicos: compostos fenólicos, flavonoides, triterpenoides e alcaloides.

As análises de fenóis totais e capacidade antioxidante indicaram que o extrato metanólico de noz da macadâmia é um material rico em compostos fenólicos e demonstra potencial antioxidante.

A adição de extrativo dos resíduos do beneficiamento da noz da macadâmia em meio nutritivo provocou efeitos no crescimento *in vitro* de *Adenanthera pavonina*. Em baixas concentrações, mostrou-se ser benéfico, potencializando resultados de crescimento *in vitro*. Em altas concentrações aumentou a mortalidade e reduziu o crescimento das plantas. Neste sentido recomenda-se que a adição de pequenas quantidades do extrato seja explorada no cultivo *in vitro* de materiais vegetais.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, H. S.; CARVALHO, A. M.; MONTEIRO, M. B. O.; PEREIRA, R. P. W.; SILVA, H. R.; SOUZA, K. C. A.; AMPARADO, K. F.; CHALITA, D. B. Métodos de análise em química da madeira. **Floresta e ambiente**, p. 01-20, 2006.
- AHMED, M. F., DAVID G. POPOVICH, D. G.; CATHERINE P. WHITBY, C. P., RASHIDINEJAD, A. Phenolic compounds from macadamia husk: An updated focused review of extraction methodologies and antioxidant activities. **Food and Bioproducts Processing**, v. 148, p. 165-175, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.09.014>
- ALINIAN, S., RAZMJOO, J., ZEINALI, H. Flavonoids, anthocyanins, phenolics and essential oil produced in cumin (*Cuminum cyminum* L.) accessions under different irrigation regimes. **Industrial Crops and Products**, 81,49-55. 2016.
- ALTAE, R. T.; ALDABBAGH, M. Ci.; RASHAN, A. I. Detection of fatty acids and some secondary metabolites in macadamia and hazelnut fruits and their shells, with studding the physiochemical properties of its extracted oil: a comparative study. **Academic Open**, v. 9, n. 2, 2024. DOI: 10.21070/acopen.21079.22024.29637.
- ARA, A.; SALEH-E-IN, M. M.; AHMAD. M.; HASHEM. M. A.; HASAN, C. M. Isolation and Characterization of Compounds from the Methanolic Bark Extract of *Adenanthera pavonina* L. **Analytical Chemistry Letters**, V. 10, n. 1, p. 49-59, 2020. <https://doi.org/10.1080/22297928.2020.1745684>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NOZ MACADÂMIA.: ABM, 2022 Disponível em: <https://www.abm.agr.br>. Acesso em: 22 mai 2022.
- AZEVEDO JUNIOR, P. R. L. de; OLIVEIRA, R. A. M. de; MENDES, M. B.; BONCI, M. M.; PAULA, C. R.; BARONI, F. A.; TOZIN, L. R. dos S.; OLIVEIRA, Á. A. de. Potencial antifúngico *in vitro* de extratos foliares de espécies de *Justicia* L. (Acanthaceae) diante de isolados clínicos veterinários de dermatófitos. **Research, Society and Development**, v. 11, nº 10, p. e62111032346- e62111032346, 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/32346>.
- BARBOSA, L. C. A.; MALTHA, C. R. Á.; CRUZ, M. P. Composição química de extrativos lipolíticos e polares de madeira de *Eucalyptus grandis*. **Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal)**, v. 15. n. 2. p. 13-20, 2005. ISSN 01 03-944X.
- BECCEL. **Becel Pró-Activ**. [S.l.]: Becel Brasil, 2022. Disponível em: <http://www.becel.com.br/produtos/becel-Pro-Activ>. Acesso em: 26 ago. 2022.
- CARDOSO, J. C. Publicação em cultivo *in vitro* de plantas: qualidade para o avanço científico e tecnológico. **Horticultura Brasileira**, v. 32, n. 4, p. 383-384, dez. 2014.
- CHUNG, K. H.; SHIN, K. O.; HWANG, H. J.; CHOI, K. S. Chemical composition of nuts and seeds sold in Korea. *Nutrition Research and Practice*. Seoul, v. 7, n. 2, p. 82-88, 2013. DOI: 10.4162/nrp.2013.7.2.82.

DAILEY, A.; VUONG, Q. V. Effect of extraction solvents on recovery of bioactive compounds and antioxidant properties from macadamia (*Macadamia tetraphylla*) skin waste. **Cogent Food & Agriculture**, v.1, n.1, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1115646>.

DESHPANDE, S.S., CHERYAN, M., SALUNKHE, D.K. Tannin analysis of food products. **CRC Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, Boca Raton, v.24, n.4, p.4.01-44.9, 1986.

DEWICK, P. M. The mevalonate and deoxyxylulose phosphate pathways: terpenoids and steroids. In: DEWICK, P. M. **Medicinal natural products: a biosynthetic approach**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2001. p. 167-289. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/0470846275.ch5>. Acesso em: 12 ago. 2025.

DHYANI, P.; QUISPE, C.; SHARMA, E.; BAHUKHANDI, A.; SATI, P.; ATTRI, D. C.; SZOPA, A.; SHARIFI-RAD, J.; DOCEA, A. O.; MARDARE., I.; CALINA, D.; CHO, W. C. Anticancer potential of alkaloids: a key emphasis to colchicine, vinblastine, vincristine, vindesine, vinorelbine and vincamine. **Cancer Cell International**, v. 22, n. 1, p. 206, 2022.

ENTELMANN, F. A.; FILHO, J. A. S.; PIO, R.; SILVA, S. R.; SOUZA, F. B. M. Produção e atributos de qualidade de cultivares de macadâmia no sudoeste do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 36, n. 1, p. 192-198, 2014.

EPIFANIO, M. M. N.; CAVALCANTI, R. I. L.; FALCÃO DOS SANTOS, K.; DUARTE, P. S. C.; KACHLICKI, P.; OZAROWSKI, M.; RIGER, C.J.; CHAVES, D. S. A. Chemical characterization and *in vivo* antioxidant activity of parsley (*Petroselinum crispum*) aqueous extract. **Food & Function**, v. 11, n. 6, p. 5346-5356, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D0FO00484F>.

FENGEL, D.; WEGENER, Cr. Wood: chemistry, ultrastructure. reactions. Berlin; New York: **Walter de Gruyter**. 1989. 613 p.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI P. P.; NOGUEIRA, D. A. ExpDes: an R package for ANOVA and experimental designs. **Applied Mathematics**, v. 5, n. 19, p. 2952-2958, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4236/am.2014.519280>

FREIRE, J. dos S. Perfil fitoquímico, atividade antioxidante e citogenotoxicidade da catingueira (*Poincianelia bracteosa* (Tul.) L. P. Queiroz). 2020. 98 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Estadual do Piauí, Teresina, 2020.

GARCIA, A. A.; CARRIL, E. P. U. Metabolismo Secundário de Plantas. **Revista Reduca (Biologia)**: Serie Fisiologia Vegetal. Espanha, v. 02, nº 03. p. 119-145, 2009.

GERONÇO, M. S.; MELO, R. C.; BARROS, H. L. M.; AQUINO, S. R.; OLIVEIRA, F. C. E. de; ISLAM, M. T.; PESSOA, C. O.; RIZZO, M. S.; COSTA, M. P. da. Advances in the research of *Adenanthera pavonina*: from traditional use to intellectual property. **Journal of Medicinal Plants Research**, v. 14, n. 1, p. 24-53, jan. 2020. DOI: 10.5897/JMPR2019.6819.

GROSS, E. G. **Introducción al estudio de los productos naturales**. Washington: OEA, 1985. 146p.

HAGERMAN, A.; BUTLER, L. G. The specificity of proanthocyanidin-protein interactions. **The Journal of Biological Chemistry**. v.256, n. 9, p.4494-4497. 1981.

HARTMANN, H. T.; KESTER, D. E.; DAVIES JR., E. T.; GENEVE, R. L. **Hartmann & Kester's plant propagation: principles and practices**. 8. ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2014. 928p.

HASLAM, E. **Chemistry of vegetable tannins**. London: Academic Press. 1966. 179 p.

HEINRICH, M.; MAH, J.; AMIRKIA, V. Alkaloids used as medicines: structural phytochemistry meets biodiversity - an update and forward look. **Molecules**, v. 26, n. 7, p. 1836. 02 21. doi: 10.3390/molecules26071836. PMID: 33805869; PMCID: PMC8036335.

HERGERT, H. J. Condensed tannins in adhesives: introduction and historical perspectives. In: HEMINGWAY, R. W.; CONNER, A. H. (Ed.). **Adhesives from renewable resources**. Washington: American Chemical Society. 1989. p. 155-171.

KHAN, M.; KHAN, A. U.; RAFATULLAH, M.; ALAM, M.; BOGDANCHIKOVA, N.; GARIBO, D. Search for effective approaches to fight microorganisms causing high losses in agriculture: application of *P. lilacinum* metabolites and mycosynthesised silver nanoparticles. **Biomolecules**, v. 12, n. 2. p. 174. 2022.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G. I. B.; HERNANDEZ, J. A.; ANDRADE, A. S. **Química da madeira**. 3. ed. Curitiba: UFPN - DETF, 2005.

KUMAR, A.; P, N.; KUMAR, M.; JOSE, A.; TOMER, V.; OZ, E.; PROESIOS, C.; ZENG, M.; ELOBEID, T.; K. 5.; OZ, F. Major Phytochemicals: Recent Advances in Health Benefits and Extraction Method. **Molecules**, v. 28. ii. 2. p. 887, 16 jan. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28020887>.

LINO, G. A. **Composição química e estrutural da lignina e lipídios do bagaço da palha de cana-de-açúcar**. 2015. 108 f. Tese (Doutorado em Agroquímica) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MC, 2015.

MACHADO, H.; NEGEM, T. 1: PETERS, V. M.; FONSECA, C. 5.; OLIVEIRA, T. T. Flavonoides e seu potencial terapêutico. **Boletim do Centro de Biologia da Reprodução**. Juiz de Fora, v. 27. n. 1/2, p. 33-39, 2008.

MARQUES, J. P.; LOPES, O. C. Alcaloides como agentes antitumorais: considerações químicas e biológicas, **Revista UNINGÁ Review**, v. 24, n. 1, p. 56-61, 2015.

MARTINS, E. R.; CASTRO, D. M. de; CASTELLANI, D. C.; DIAS, J. E. Plantas medicinais. Viçosa, MC: UFV, 2003. 220 p. ISBN 85-7269-011-5.

MCFADYEN, L. M.; ROBERTSON, D.; SEDGLEY, M.; KRISTIANSEN, P.; OLESEN, T. Effects of the ethylene inhibitor aminoethoxyvinylglycine (AVO) on fruit abscission and yield on pruned and unpruned macadamia trees. **Scientia Horticulturae**, v.137, p. 125 - 130, 2012.

MELLO, J. P. C. SIMÕES, C. M. O.; SCHENKEL, E. P.; GOSMANN, G.; MENTZ, L. A.; PETROVICK, P. R. Farmacognosia: da planta ao medicamento. Porto Alegre: Ed. UFSC; Florianópolis: Ed. UFROS, 1999.

MIHAI, C. M.; MĂRGHITAS, L. A.; DEZMIREAN, D. S.; CHIRIILĂ, F.; MORITZ, R. F.; SCHLÜNS, H. Interactions among flavonoids of propolis affect antibacterial activity against the honeybee pathogen *Paenibacillus larvae*. **JOURNAL OF INVERTEBRATE PATHOLOGY**, v. 110, n. 1, p. 68-72, 2012. DOI: 10.1016/j.jip.2012.02.009.

MONTEIRO, J. M.; ALBUQUERQUE, U. P.; ARAÚJO, E. L.; AMORIM, E. L. C. Taninos: uma abordagem da química à ecologia. **Química Nova**, v. 28, n. 5, p. 892-896, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000500026>.

MURASHIGE, T.; SKOOG, F. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. **Physiologia Plantarum**, v. 15, p. 473-497, 1962.

NGUYEN, H. N.; ULLEVIG, S. L.; SHORE, J. D.; WANG, L.; AHN, Y. J.; ASMIS, R. Ursolic acid and related analogues: triterpenoids with broad health benefits. **Antioxidants** v. 10, a. 8, p. 1161, 21 Jul. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox10081161>. Acesso em: 21 out. 2024.

PADUE, R. Sua majestade, a Macadâmia. **Revista Globo Rural**, ed. 218, p. 1. dez, 2003.

PANZELLA, L. Natural phenolic compounds for health. food and cosmetic applications. **Antioxidants (Basel)**, v. 9, n. 5, p. 427. 2020. doi: 10.3390/antiox9050427.

PAVIA, D. L.; LAMPMAN, G. M.; KRIZ, G. S.; VYVYAN, J. R. **Introdução à espectroscopia**. 4. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2010. 708 p.

PENONI, E. dos S.; PIO, R.; RODRIGUES, F. A.; MARO, L. A. C.; COSTA, F. C. Análise de frutos e nozes de cultivares de noqueira-macadâmia. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 12, p. 2080-2083, dez. 2011.

PIZA, P. L. B. T.; MORIYA, L. M. Cultivo da macadâmia no Brasil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 36, p. 39-45. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0100-2945-450/13>.

POURBAYRAMIAN, R.; ABDI-BENEMAR, H.; SEIFDAVATI, J.; GREINER, R.; ELGHANDOUR, M. M. Y.; SALEM, A. Z. M. Bioconversion of potato waste by rumen fluid from slaughterhouses to produce a potential feed additive rich in volatile fatty acids for farm animals. **Journal of Cleaner Production**, v. 280, n. 1, p. 124411, 2021.

R CORE TEAM. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2023.

RAJARAO, R., SAHAJWALLA, V. A cleaner, sustainable approach for synthesizing high purity silicon carbide and silicon nitride nanopowders using macadamia shell waste. **J. Clean. Prod.**, V. 133, p. 1277-1282, 2016.

RODRIGUES, M. F. **Efeito gastroprotetor e imunomodulador de *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir (Fabaceae)**. 2017. 105 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Farmacêuticas) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Ciências da Saúde. Recife, 2017.

ROWEL, R. M. Chemical Modification of Wood. In: ROWELL, R. M. (Ed.). **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**. Boca Raton: CRC Press, 2005. p. 322-347.

ROMAHN, Valério. Rainha das nozes. **Revista Natureza**, 22 nov. 2019. Disponível em: <https://revistanatureza.com.br>

SÃ-FILHO, G. F.; SILVA, A. I. B.; COSTA, E. M.; NUNES, L. E.; RIBEIRO, L. H. F.; CAVALCANTI, J. R. L. P.; GUZEN, F. P.; OLIVEIRA, L. C.; CAVALCANTE, J. S. Plantas medicinais utilizadas na caatinga brasileira e o potencial terapêutico dos metabólitos secundários: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 13, p. e140101321096, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i13.21096>

SALGUEIRO, F. B.; CASTRO, R. N. Comparação entre a composição química e capacidade antioxidante de diferentes extratos de própolis verde. **Química Nova**, v. 39, n. 10, p. 1192-1199, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20160136>.

SALUNKHE, D. K.; CHAVAN, J. K.; KADAM, S. S. **Dietary tannins: consequences and remedies**. Boca Raton: CRC Press, 1990. 200 p.

SANTOS, V. N. C. Estudo fitoquímico e bioatividade de extratos de *Andira retusa* (Poir.) Kunth. 2012. 171 f. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2012. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/2246>. Acesso em: 5 set. 2025.

SANVIDO, M. E. Avaliação de atividades biológicas de extratos não voláteis de *Baccharis uncinella* obtidos por maceração e por extração com CO₂ supercrítico. **Revista da Graduação**, v. 8, n. 2, 2015.

SCHNEIDER, L. M.; ROLIM, G. 5.; SOBIERAJSKI, G. R.; PRELA-PANTANO, A.; PERDONÁ, M. J. Zoneamento agroclimático de noqueira-macadâmia para o Brasil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 34, n. 2, p. 458-466, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-29452012000200025>.

SHI, H.; ZHOU, Z.; LIU, L.; LIU, S. A global perspective on propagation from meteorological drought to hydrological drought during 1902-2014. **Atmospheric Research**, v. 280, p. 106441, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106441>.

SHI, R., TAO, L., TU, X., ZHANG, C., XIONG, Z., RAMI HOROWITZ, A., ASHER, J.B., HE, J., HU, F., 2022. Metabolite Profiling and Transcriptome Analyses Provide Insight Into Phenolic and Flavonoid Biosynthesis in the Nutshell of *Macadamia ternifolia*. *Front. Genet.* 12, 809986.

SILVA, L. M. C. **Desenvolvimento de biossensores eletroquímicos para fenol e uréia com foco na aplicação ambiental**. 2011. 154 f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2011.

SILVEIRA, J. V. B.; MIRANDA, N. A. Germinação e multiplicação *in vitro* de *Adenanthera pavonina* L. In: Anais Simpósio de Gestão Ambiental e Biodiversidade. **Anais [...]** Três Rios (RJ) ITR/UFRRJ. 2022. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/11sigabi/575861-germinacao-e-multiplicacao-in-vitro-de-adenanthera-pavonina-l>. Acesso em: 20 jun. 2024.

SILVÉRIO, F. O. **Caracterização de extrativos de madeira de Eucalyptus e depósitos de pitch envolvidos na fabricação de celulose e papel**. 2008. 157 f. Tese (Doutorado em Química Orgânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Química, Belo Horizonte, 2008.

SILVÉRIO, F. O. **Caracterização de extrativos de madeira de Eucalyptus e depósitos de pitch envolvidos na fabricação de celulose e papel**. 2008. 157 f. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Química, Belo Horizonte, 2008

SOBIERAJSKI, O. R.; FRANCISCO, V. L. F. S.; ROCIA, P.; GHILARDI, A. A.; MAIA, M. L. Noz macadâmia: produção, mercado e situação no Estado de São Paulo. **Informações Econômicas**, v, 36, n. 5, p. 25-36, 2006.

SOLOMONS, T. W. G.; FRYHLE, C. B. **Química Orgânica**, 9 ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 2, 2009.

SOMWONGIN, S.; SIRILUN, S.; CHANTAWANNAKUL, P.; ANUCHAPREEDA, S.; CHAIYANA, W. Potential antioxidant, anti-aging enzymes, and anti-tyrosinase properties of *Macadamia (Macadamia integrifolia)* pericarp waste products. **Asia-Pacific Journal of Science and Teleology**, v. 27, li. 2, p. 1-8. 2021.

SOMWONGIN, S.; SIRILUN, S.; CHANTAWANNAKUL, P.; ANUCHAPREEDA, S.; YAWOOTTI, A.; CHAIYANA, W. Ultrasound-assisted green extraction methods: An approach for cosmeceutical compounds isolation from *Macadamia integrifolia* pericarp. **Ultrasonics Sonochemistry**, v.92, p.106266, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022>.

TAVARES, J. C.; LUCENA, L. F. L.; HENRIQUES, G. F.; FERREIRA, R. L. S.; ANJOS, M. A. S. dos. Use of banana leaf ash as partial replacement of Portland cement in eco-friendly concretes. **Construction and Building Materials**. v. 346. 128467, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128467>.

TELEMAN, A. Hemicelluloses and Pectins. In: GELLERSTEDT, M. EX. G.; HENRIKSSON, G. **Wood Chemistry and Wood Biotechnology**. Stockholm: De Gruyter, 2009. V.vl, p. 102-120.

TENG, H.; HSIEH, C.-TO. Liquid-phase adsorption of phenol onto activated Carbons Prepared with Different Activation Levels. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 230. n. 1. p. 171-175, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1006/jcis.2000.7052>.

TRAN. T. H.; NOUYEN. N. T.; DANO, P. H. Evaluating phenolic compounds and antioxidant activity of the pericarps and seed coats extracts of *Macadamia integrifolia* and preparing their nanoemulsions. **International Journal of Chemical and Biochemical Sciences**, v. 24. n. 4. p. 215-223. 2023, Disponível em: <http://www.iscientific.org/Journal.html>.

WASTOWSKII, A. D. **Química da madeira**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência. 2018.

WECHSLER, A., RAMÍREZ, M., CROSKY, A., ZAHARIA, M., JONES. H., BALLERINI, A., NÚÑEZ. M., SAHAJWALLA, V. **Physical properties of furniture panels from macadamia shells**. Proc. 1 8th Int. Conf. Compos. Mater, 2011.

WECHSLER, A., ZAHARIA, M., CROSKY, A., JONES, H., RAMÍREZ, M., BALLERINI, A., NÚÑEZ, M., SAHAJWALLA, V. **Macadamia (*Macadamia integrifolia*) shell and castor *Ricinus communis* oil based sustainable particleboard: a comparison of its properties with conventional wood based particleboard**. Mater. Des. 50, 117-123, 2013.

XAVIER, A.; WENDLING, I.; SILVA, R. L. **Silvicultura clonal**: princípios e técnicas. 3. ed. Viçosa, Editora UFV, 2021. E-book.

YANO, W.-H., LU, C.-Z. Phenolic composition and antioxidant properties of 2 taxa of macadamia flowers. **Natural Product Communications**, v. 17, n. 5, p. 1-9. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1934578X221099392>.

YAZAKI, Y. Wood colors and their coloring matters: a review. **Natural Product Communications**, V. 10, n. 3, p. 505-512, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1934578X1501000332>.

YOKOZAWA, T.; DONG, E.; LIU, Z. W.; SHIMIZU, M. Antioxidative activity of flavones and flavonols *in vitro*. **Phytotherapy Research**, v. 11. n. 6, p. 446-449. set. 1997. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1573\(199709\)11:6<446::AJD-PTR128>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1573(199709)11:6<446::AJD-PTR128>3.0.CO;2-8).

ZHANG. M.; LI, Y.; SHUAI, X.-X.; QIAO. J.; WEI, C.-B.; MA, F.-Y.; ZHANG. Y.-H.; DU, L.-Q. Ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from *Macadamia integrifolia* green peel: purification. identification and antioxidant activities. **LWT**. v. 189. p. 115552, 1 nov. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115552>.

ZHANG, M.; LI, Y.; SHUAI, X.-X.; QIAO, J.; WEI, C.-B.; MA, F.-Y.; ZHANG, Y.-H.; DU, L.-Q. Li Itrasound-assisted extraction of phenolic compounds from macadamia (*Macadamia integrifolia*) green peel: purification, identification and antioxidant activities. **LWT**, v. 187. p. 115552, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115552>.

CAPÍTULO II

**POTENCIAL ALELOPÁTICO DE EXTRATO AQUOSO DOS RESÍDUOS DO
BENEFICIAMENTO DA NOZ DA MACADÂMIA (*MACADAMIA INTEGRIFOLIA*)
NA GERMINAÇÃO DE SEMENTES DE *LACTUCA SATIVA* L.**

ALLELOPATHIC POTENTIAL OF AQUEOUS EXTRACTS FROM MACADAMIA
(*MACADAMIA INTEGRIFOLIA*) NUT PROCESSING RESIDUES ON THE
GERMINATION OF LETTUCE (*LACTUCA SATIVA* L.) SEEDS

RESUMO

A alelopatia é um fenômeno ecológico amplamente estudado, caracterizado pela liberação de substâncias químicas (aleloquímicos) por plantas ou microrganismos no ambiente, capazes de inibir ou estimular processos fisiológicos em outras espécies. Neste trabalho, investigou-se o potencial alelopático dos resíduos do beneficiamento da noz da macadâmia (*Macadamia integrifolia*), especialmente as cascas, sobre a germinação de sementes de alface (*Lactuca sativa* L), espécie bioindicadora com sensibilidade comprovada a compostos alelopáticos. A metodologia consistiu na preparação de extratos brutos por infusão (EBIN) a partir da fervura de 40 g de cascas em 200 ml de água destilada, com posterior diluição para obtenção de quatro concentrações (25%, 50%, 75% e 100%). O experimento foi conduzido em laboratório, utilizando papel germitest umedecido com os extratos em placas de Petri, sob temperatura controlada de 25°C. As variáveis analisadas foram a porcentagem de germinação (G) e o índice de velocidade de germinação (IVG), com delineamento inteiramente casualizado e quatro repetições por tratamento. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e ao teste de Tukey ($p < 0,05$). Os resultados revelaram que o extrato aquoso das cascas de macadâmia teve efeito inibitório significativo sobre a germinação e o vigor das sementes, especialmente nas concentrações de 75% e 100%, indicando a presença de compostos fitotóxicos, possivelmente fenólicos ou cianogênicos. Os achados sugerem que os resíduos da *Macadamia integrifolia* apresentam potencial para uso como bioinibidores naturais no manejo agroecológico de plantas daninhas, ao mesmo tempo em que propõem uma alternativa sustentável para o aproveitamento de subprodutos agrícolas de difícil disposição.

Palavras-chave: Alelopatia; Bioinibidores naturais; Germinação; Subprodutos agrícolas; Compostos fenólicos.

ABSTRACT

Allelopathy is a widely studied ecological phenomenon characterized by the release of chemical substances (allelochemicals) by plants or microorganisms into the environment, which can inhibit or stimulate physiological processes in other species. This study investigated the allelopathic potential of processing residues from macadamia nuts (*Macadamia integrifolia*), particularly the shells, on the germination of lettuce seeds (*Lactuca sativa* L.), a bioindicator species with known sensitivity to allelochemicals. The methodology involved preparing crude infusion extracts (EBIN) by boiling 40 g of shell residue in 200 ml of distilled water, followed by dilution to obtain four concentrations (25%, 50%, 75%, and 100%). The experiment was conducted in a laboratory using germitest paper moistened with the extracts in Petri dishes, maintained at a constant temperature of 25°C. The variables analyzed were germination percentage (G) and germination speed index (GSI), using a completely randomized design with four replicates per treatment. Data were subjected to analysis of variance (ANOVA) and Tukey's test ($p < 0.05$). The results showed that the aqueous extract of macadamia shells significantly inhibited both germination and seedling vigor, particularly at the higher concentrations of 75% and 100%, indicating the presence of phytotoxic compounds, possibly phenolic or cyanogenic. These findings suggest that *Macadamia integrifolia* residues have potential for use as natural bioinhibitors in agroecological weed management systems, while also offering a sustainable solution for the disposal of agricultural byproducts.

Keywords: allelopathy; natural bioinhibitors; germination; agricultural byproducts; phenolic compounds.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Lorenzi (1994), a alelopatia é um fenômeno em que plantas e micro-organismo s liberam substâncias químicas chamadas aleloquímicos no ambiente. Essas substâncias podem influenciar o crescimento de outras plantas, inibindo ou estimulando a germinação e o crescimento. Também podem ser liberadas pelas partes aéreas ou raízes das plantas em crescimento, ou ainda por material vegetal em decomposição.

Atualmente, mais de dez mil compostos fitoquímicos com capacidade alelopática foram identificados, abrangendo uma ampla diversidade de categorias químicas. Essas categorias incluem os ácidos fenólicos, as cumarinas, os terpenóides, os flavonoides e os alcalóides, incluindo os alcalóides cianogênicos (MEDEIROS, 1990).

Souza Filho (2023) relata que, em essência, o termo alelopatia englobava todos os efeitos diretos e indiretos que levavam a alterações em outros elementos do ambiente, culminando em mudanças na dinâmica das comunidades vegetais. Como consequência, certas espécies eram beneficiadas ao passo que o desempenho de outras, era prejudicada.

Os compostos aleloquímicos, também conhecidos como substâncias alelopáticas ou fitotoxinas, são elementos químicos que exibem atividade alelopática. Estas substâncias são encontradas em todas as partes das plantas - folhas, flores, frutos, raízes, rizomas, caules e sementes. No entanto, a quantidade e o método de liberação variam entre diferentes tipos de plantas (DOS SANTOS et al., 2019).

A ação dos aleloquímicos tem sido empregada como uma opção ao uso de herbicidas, inseticidas e nematicidas, que são produtos químicos utilizados na agricultura para controle de pragas. A maioria dessas substâncias é derivada do metabolismo secundário das plantas. Isso ocorre porque ao longo da evolução das plantas, essas substâncias conferiram vantagens ao combater micro-organismos, vírus, insetos e outros agentes prejudiciais.

Miller (1996) postula que o fenômeno alelopático pode ser categorizado em duas modalidades: a autotoxicidade representa um processo internamente direcionado, no âmbito da alelopatia, que emerge quando uma variedade de planta emite uma específica substância química com a capacidade de inibir ou atrasar a germinação e o desenvolvimento de plantas pertencentes à mesma espécie; a heterotoxicidade, por sua vez, manifesta-se quando uma planta libera uma substância tóxica que tem impacto na germinação e crescimento de plantas de diferentes espécies.

As espécies *Macadamia integrifolia* (casca lisa) e *Macadamia tetraphylla* (casca áspera) são especialmente cultivadas por causa de seus frutos comestíveis. No entanto, as espécies *Macadamia ternifolia* e *Macadamia janseni* não são adequadas para consumo devido aos altos níveis de compostos cianogênicos presentes nelas, como mencionado por NIU et al. (2022).

Os resíduos provenientes do beneficiamento nas indústrias agrícolas, merece destaque a geração de resíduos do beneficiamento da noz da macadâmia *Macadamia integrifolia*, já que aproximadamente 60-70% do seu peso total é composto por essa casca. A variedade mais comum dessa noz é a *Macadamia integrifolia*, que se caracteriza por possuir frutos arredondados com casca lisa, constituída de um material fibroso celular sólido altamente resistente (FAN et al., 2018). Em 2021, a produção global de macadâmia alcançou a marca de 241.420 toneladas com casca, correspondendo a 65.835 toneladas de amêndoas e 175.585 toneladas de resíduos (INC. 2022). A disposição adequada das cascas de nozes de macadâmia torna-se um desafio nas instalações de processamento, devido aos custos elevados associados ao seu descarte em aterros sanitários (WONGCHAREE et al., 2018).

A alface (*Lactuca sativa* L.) é uma planta herbácea de folhas comestíveis, pertencente à família Asteraceae. Ela possui raízes pivotantes, caule cilíndrico e inflorescências em formato de capítulo, esta hortaliça está entre as mais cultivadas e consumidas globalmente, sendo uma excelente fonte de fibras, vitaminas e minerais (CONTI, 1994). Existem diversas variedades da espécie, como crespa, americana, lisa e romana, que se diferenciam pelo formato, cor, textura

das folhas e formação da cabeça (HENZ; SUINAGA, 2009). Seu elevado valor nutricional, sabor delicado e baixo teor calórico tornam a alface um ingrediente versátil e amplamente utilizado na gastronomia mundial.

De acordo com Novais et al. (2021) a alface é uma planta bioindicadora, ou seja, pode ser usada para identificar diversos efeitos causados pela falta e excesso de nutrientes e substâncias no solo. Segundo Araújo et al. (2021), usar esta espécie para testes de germinação é vantajoso, pois se trata de uma planta que responde rapidamente a mudanças em seu meio e apresenta sensibilidade a certos elementos ambientais. Apresenta ciclo de crescimento relativamente curto, o que significa que os efeitos diversos dos compostos alelopáticos podem ser observados mais rápido em comparação com outras culturas.

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho foi analisar o desempenho fisiológico de sementes de *Lactuca sativa* L, como planta teste, tratados com extrato bruto de infusão (EBIN) aquoso das cascas da noz da macadâmia *Macadamia integrifolia* assim como verificar o efeito alelopático destes resíduos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Materiais

Para este estudo foram obtidos resíduos do beneficiamento da noz da macadâmia (*Macadamia integrifolia*) (cascas dos frutos) na unidade industrial de beneficiamento de nozes da TRIBECA, na Fazenda Santa Marta, localizada no Município de Piraí, Estado do Rio de Janeiro. As sementes de *Lactuca sativa* L. (alface) foram adquiridas na Cooperativa Agroecológica Nacional Terra e Vida Ltda. Assentamento Roça Nova - cep 96495.000 - Candiota-RS.

O experimento foi conduzido no Laboratório de Biologia Reprodutiva e Conservação de Espécies Arbóreas (LACON), no Departamento de Silvicultura da UFRRJ, com o objetivo de avaliar o efeito alelopático do extrato aquoso do resíduo da *Macadamia integrifolia* sobre as sementes de *Lactuca sativa* (alface).

A verificação do potencial alelopático dos extratos aquosos do resíduo do beneficiamento da noz da macadâmia (*Macadamia integrifolia*) sobre as sementes de *Lactuca sativa* L. (alface), nas diversas concentrações, foi realizada através da porcentagem de plântulas normais obtidas nos experimentos. O experimento foi realizado da seguinte forma:

• Extrato aquoso

Água destilada (200 mL) fervente a 100°C foi colocada sobre 40g de resíduo da noz da macadâmia dentro de um béquer e tampado por mais de 30 minutos, recolheu-se alíquotas filtradas para a diluição do extrato e obtenção das concentrações desejadas (25%, 50%, 75%, 100%), além da testemunha com água destilada como controle.

• Teste de germinação

500 sementes de *Lactuca sativa* L foram divididas em cinco tratamentos de 100 sementes. Cada tratamento apresentava quatro repetições de 25 sementes, semeadas em placas de Petri. O substrato utilizado para o experimento consistiu em papel do tipo germitest, previamente esterilizado e umedecido com os extratos aquosos no volume de 10 mL. Os tratamentos foram condicionados em câmara de germinação à 25°C e avaliados após 7 dias.

Os tratamentos relacionaram-se a 4 diferentes concentrações de extrato aquoso (25%, 50%, 75%, 100%). Um “tratamento branco” (controle ou Testemunha) utilizando apenas água destilada para umedecer o papel foi colocado junto ao experimento.

• **Primeira contagem da germinação (PCC)** - realizada conjuntamente com o teste de germinação aos sete dias após semeadura. Os resultados foram determinados em porcentagem de sementes germinadas (plântulas normais). (Em um teste de germinação, o termo “plântulas normais” refere-se àquelas plântulas que apresentam estrutura completa, bem desenvolvida e funcional, com potencial para se tornarem uma planta adulta saudável sob condições adequadas de cultivo.). Segundo as RAS (Regras para Análise de Sementes - MAPA) Plântulas normais: sistema radicular reto, hipocótilo íntegro, e cotilédones saudáveis.

• **Germinação (G):** calculada pela fórmula $G = (N/100) \times 100$, em que: N = número de sementes germinadas que foram determinadas aos sete dias após semeadura. Unidade: %. (CARVALHO; CARVALHO, 2009).

O delineamento experimental adotado foi o inteiramente casualizado, com quatro repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância e quando os efeitos de tratamentos apresentaram diferença significativa ($P < 0,01$) foram realizados teste de comparação de médias.

• **Análise estatística:** A análise de dados foi realizada no programa estatístico SAS OnDemand. Foram adotadas análises paramétricas com a Análise da Variância (ANOVA), seguindo um delineamento inteiramente casualizado, foi utilizado o teste de Tukey para a comparação de médias ao nível de confiança de 95%, com cinco tratamentos, em quatro repetições que consistiram nos regimes de temperatura: 25°C constantes, 25 sementes por tratamento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Índice de velocidade de germinação (IVG) e germinação (G) de sementes de alface rubi crespa

Os dados de germinação e índice de velocidade de germinação IVG das sementes de Alface Rubi Crespa estão representados na Tabela 7.

Tabela 7. Índice de velocidade de germinação (IVG) e germinação (G) de sementes de alface rubi crespa submetidas a diferentes dosagens do extrato aquoso dos resíduos de beneficiamento da Noz da macadâmia (*Macadamia integrifolia*).

TRATAMENTO	IVG (plântulas/dia)	G (%)
T1 - TESTEMUNHA	6a	30a
T2- EXTRATO A 25%	2b	13b
T3 - EXTRATO A 50%	1b	5b
T4 - EXTRATO A 75%	0b	3b
T5- EXTRATO A 100%	1b	3b
C.V. (%)	56.90	45.58

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, no diferenciam entre si, pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Ao avaliar o Índice de Velocidade de Germinação (IVG) e a porcentagem de germinação (0%) apresentados na Tabela 7, observa-se que todos os tratamentos com extrato aquoso dos resíduos da noz da macadâmia (T2 a T5) reduziram significativamente tanto o vigor quanto a germinação das sementes em comparação com a testemunha (T1).

A testemunha (T1), que não recebeu extrato, apresentou os maiores valores de IVG (6 plântulas/dia) e de germinação (30%), sendo estatisticamente superior aos demais tratamentos.

Os tratamentos com extrato, independentemente da concentração (25% a 100%), apresentaram médias estatisticamente semelhantes entre si, mas todas significativamente

inferiores à testemunha. Isso indica que mesmo a menor concentração (25%) já exerce efeito inibitório sobre a germinação e o vigor das plântulas, e o aumento da concentração no resulta em diferenças estatísticas adicionais.

De acordo com Taiz et al. (2017), os metabólitos secundários apresentam grande importância no mecanismo de defesa das plantas, principalmente, contra a herbivoria e outras defesas interespecies.

Santos et al. (2023) ao estudarem o efeito alelopático de extratos foliares de *Portulaca oleracea* e *Raphanus raphanistrum* sobre a germinação de sementes de alface, correlacionaram o efeito alelopático com o teor de compostos fenólicos (fenóis, flavonóides e dihidroflavonóides totais) e com o potencial antioxidante desses extratos. Os autores relatam ainda que, os extratos aquosos utilizados promoveram redução no índice de velocidade de germinação de alface com o aumento da concentração de O para 10 g/L. A perda de vigor influenciada por esses extratos pode estar relacionada a diversos fatores no processo de germinação, pois na fase de embebição, substâncias alelopáticas podem penetrar juntamente com a água e, inibir ou retardar a multiplicação ou crescimento das células e, conseqüentemente, retardar a germinação (EL ID; BRAGA; SANTOS, 2020).

4. CONCLUSÕES

No presente trabalho, buscou-se uma nova abordagem ao explorar o potencial de valorização dos resíduos do beneficiamento da noz da macadâmia. Essa pesquisa teve como foco a investigação da alelopatia desses resíduos, considerando seu possível emprego não apenas como substratos, mas também em outras aplicações voltadas para a produção de mudas de espécies florestais.

Os resultados evidenciam um claro efeito alelopático do extrato aquoso do resíduo da *Macadamia integrifolia* sobre as sementes de alface, com inibição significativa tanto da velocidade quanto da porcentagem de germinação, especialmente em concentrações mais elevadas (75% e 100%).

Essa informação é relevante do ponto de vista agroecológico, pois sugere que o resíduo da macadâmia pode ser potencialmente utilizado como bioinibidor natural em sistemas de manejo de plantas daninhas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DOS SANTOS VIANA, J; GOMES, J. J. A.; LOURENÇO, M. S. N. Efeito alelopático de *Plectranthus neochilus* Schltr e *Laurus nobilis* L. na germinação de sementes de *Abelmoschus esculentus* (L) Moench. **SaBios: Revista de Saúde e Biologia**, v. 14, n. 2, p. 35-41, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5433/1980-6108.2019v14n2p35>.
- FAN, E; YANG, Z.; LI, H.; SHI, Z.; KAN, H. Preparation and properties of hydrochars from macadamia nut shell via hydrothermal carbonization. **Royal Society Open Science**. v. 5. p. 181126, 2018. Disponível em: <http://doi.org/10.1098/rsos.181126>. Acesso em: 12 ago. 2025.
- INC. **Conselho Internacional de Nozes e frutos secos**, 2022. Disponível em: <https://www.nutfruit.org/industry/news/detail/global-statistical-review-macadamia>. Acesso em 06 de jun. 2023.
- LORENZI, H. **Manual de identificação e controle de plantas daninhas: plantio direto e convencional**. 4. ed. Nova Odessa: Plantarum, 1994. 336 p.
- MEDEIROS, A. R. M. Alelopatia: importância e suas aplicações. **Hort Sul**, Pelotas, v.1. p.27-32.1990
- MILLER, D. A. Allelopathy in forage crop systems. **Agronomy Journal**, v. 88. n. 6, p. 854-859, 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agronj1996.00021962003600060003x>.
- NIU, Y.; LU, Y.; SONO, W.; HE, X.; LIU, Z.; ZHENG, C.; WANG, S.; SHI, C.; LIU, J. Assembly and comparative analysis of the complete mitochondrial genome of three Macadamia species (*Macadamia integrifolia*, *M. ternifolia* and *M. tetraphylla*). **PLoS ONE**, v. 17, n. 5, p. c0263545, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.ponc.0263545>. Acesso em: 29 ago. 2025.
- SOUZA FILHO, A. P. S. **A história das pesquisas em alelopatia no Brasil**. Brasília: Embrapa, 2023. 77 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1157727/a-historia-das-pesquisas-em-alelopatia-no-brasil>.
- WONGCHAREE, S.; ARAVINTHAN, V.; ERDEL L.; SANONGRAJ, W. Mesoporous activated carbon prepared from macadamia nut shell waste by carbon dioxide activation: comparative characterization and study of methylene blue removal from aqueous solution. **Asia Pacific Journal of Chemical Engineering**, v. 13. n. 2, p.1-16, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/apj.2179>. Acesso em: 23 de out. 2024.
- CONTI, J. H. Caracterização de cultivares de alface (*Lactuca sativa* L.) adaptadas aos cultivos de inverno e verão. 1994. 107 f. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.
- HENZ, G. P.; SUINAGA, F. A. **Tipos de alface cultivados no Brasil**. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2009. 6p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/783588/1/cot75.pdf>.

NOVAIS, J. R.; INOUE, M. H.; DE AMORIM, V. H. M.; DA SILVA, J. L. M.; BORGES, S. X. S.; MASSUQUINI, Z.; FRANCO, E. L. P.; SANTOS, D. M. Seleção de espécies bioindicadoras para os herbicidas pyroxasulfone e pyroxasulfone + flumioxazin em solos contrastantes. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 2, p. 115805-115819, 2021. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/41123>.

ARAÚJO, M. P.; EL-DEIR, S. G.; TAVARES, R. G. *Lactuca sativa* como bioindicador da contaminação por alumínio do lodo de Estação de Tratamento de Água. **Revista Scientia Grica**, v. 16, n. 2, 2021. Disponível em: <https://revistasg.emnuvens.com.br/sg/article/view/1717>. Acesso em: 20 set. 2024.

CARVALHO, D. B.; CARVALHO, R. I. N. Qualidade fisiológica de sementes de guanxuma sob influência do envelhecimento acelerado e da luz. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 31, n. 3, p. 489-494, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v31i3.6673>.

TAÍZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858 p.

SANTOS, M. F.; SANTOS, J. P.; GONÇALVES, A. H.; MENDONÇA, C.; PINTO, J. E. B. P.; BERTOLUCCI, S. K. V. Efeito alelopático de extratos foliares de *Portulaca oleracea* e *Raphanus raphanistrum* sobre a germinação de sementes de *Lactuca sativa* L. **Scientia Plena**, p. 1-13, 2023. Disponível em: <https://www.scientiaplenu.org.br/sp/article/view/6701>. Acesso em: 23 mai. 2024.

EL ID, V. L.; BRAGA, M. R.; SANTOS, N. A. S. Germinação e desenvolvimento inicial de espécies florestais sob a ação de catequina, presente em sementes de *Sesbania virgata* (Cav.) **Pers. Hoehnea**, v. 47, p. e402020, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2236-8906-40/2020>.

CAPÍTULO III

ANÁLISE DA GERMINAÇÃO DE SEMENTES DE MOGNO AFRICANO (*KHAYA IVORENSIS* A. CHEV.) EM SUBSTRATOS DOS RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DA NOZ DA MACADÂMIA

ANALYSIS OF THE GERMINATION OF AFRICAN MAHOGANY (*KHAYA IVORENSIS* A. CHEV.) SEEDS IN SUBSTRATES FROM MACADAMIA NUT PROCESSING RESIDUES

RESUMO

O mogno-africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.) tem sido considerado uma alternativa promissora ao mogno nativo, em razão de sua adaptabilidade às condições edafoclimáticas brasileiras, resistência a pragas e alto valor comercial. Entretanto, a ausência de protocolos padronizados para testes de germinação compromete o controle de qualidade das sementes. Este estudo teve como objetivo avaliar o uso de resíduos do processamento da noz da macadâmia (*Macadamia integrifolia*) como substrato orgânico, em diferentes granulometrias (M1 a M4), para a germinação de sementes de mogno-africano. Os ensaios foram conduzidos em ambiente controlado, com sementes dispostas entre (ES) e sobre (SS) os substratos. Os resultados demonstraram taxas de germinação satisfatórias em todas as granulometrias, com maior prevalência de plântulas normais e baixa ocorrência de anormalidades. Análises químicas confirmaram a presença de macro e micronutrientes essenciais ao desenvolvimento inicial das plântulas, como nitrogênio, fósforo e potássio. Conclui-se que os resíduos da noz da macadâmia apresentam potencial como substrato alternativo e sustentável para a produção de mudas florestais, promovendo o reaproveitamento de resíduos agroindustriais e contribuindo para práticas silviculturais mais ecológicas.

Palavras-chave: *Khaya ivorensis*; Germinação; Substrato Orgânico; Resíduos Agroindustriais; Sustentabilidade.

ABSTRACT

African mahogany (*Khaya ivorensis* Á. Chev.) has been considered a promising alternative to native mahogany due to its adaptability to Brazilian edaphoclimatic conditions, pest resistance, and high commercial value. However, the lack of standardized protocols for germination tests compromises seed quality control. This study aimed to evaluate the use of macadamia nut (*Macadamia integrifolia*) processing residues as an organic substrate, in different particle sizes (M1 to M4), for the germination of African mahogany seeds. The experiments were conducted under controlled conditions, with seeds placed either between (ES) or on the surface (SS) of the substrates. The results showed satisfactory germination rates across all granulometries, with a higher prevalence of normal seedlings and low incidence of abnormalities. Chemical analyses confirmed the presence of macro- and micronutrients essential to early seedling development, such as nitrogen, phosphorus, and potassium. It is concluded that macadamia nut residues have potential as an alternative and sustainable substrate for forest seedling production, promoting the reuse of agro-industrial waste and contributing to more ecological silvicultural practices.

Keywords: *Khaya ivorensis*; germination; organic substrate; agro-industrial residues; sustainability.

1. INTRODUÇÃO

Segundo o Instituto Brasileiro de Florestas (sd), o mogno africano é uma excelente oportunidade para o empreendedor florestal. Destacando-se no mercado internacional de madeiras tropicais duras. Sua madeira, de tom castanho-avermelhado, oferece alta demanda, e a espécie se adapta bem ao clima brasileiro, gerando retorno financeiro expressivo. Além da boa adaptação ao solo e clima, o mogno africano também se beneficia de licenças ambientais mais simples em comparação às espécies nativas, o que facilita sua expansão comercial no Brasil.

Para atender a demanda nacional e internacional de madeiras, produtores começaram a se organizar e pensar em alternativas. Foi então que o mogno-africano do gênero *Khaya* surgiu como excelente alternativa para substituir o mogno brasileiro ameaçado de extinção. A família Meliaceae, compreende quatro principais espécies de madeiras comerciais, *Khaya ivorensis*, *Khaya grandifolia*, *Khaya anthotheca* e *Khaya senegalensis*, todas são conhecidas como mogno africano. Nenhuma delas distingue-se consideravelmente do mogno-brasileiro (*Swietenia macrophylla*) com relação a qualidade da madeira (LAMPRECHT, 1990).

Existem muitas vantagens de se cultivar o mogno africano, entre elas, o rápido crescimento em relação ao mogno nativo. Outra grande vantagem é a no preferência ao ataque da broca do ponteiro (*Hypsipyla grandella* Zeller) que causa grandes prejuízos às lavouras de mogno brasileiro. As regiões africanas onde este gênero é encontrado possuem clima e solo semelhantes aos do Brasil, sugerindo que ele pode prosperar em nosso país.

A análise da qualidade fisiológica das sementes é comumente realizada por meio do teste de germinação. Um método amplamente reconhecido por sua capacidade de determinar o potencial máximo de germinação de um lote de sementes quando submetido a condições ambientais ideais. Este procedimento, devido à sua padronização para a maioria das espécies agrícolas, proporciona resultados consistentes e reproduzíveis, o que o torna uma ferramenta indispensável na avaliação da qualidade das sementes (MARCOS FILHO, 2015).

Entretanto, quando se trata da cultura do mogno africano, não há uma metodologia padronizada descrita nas Regras para Análise de Sementes - RAS (BRASIL, 2009), documento que regulamenta os procedimentos de análise de sementes no Brasil. Essa ausência de padronização gera desafios específicos para a avaliação das sementes de mogno africano, dificultando a obtenção de resultados confiáveis e consistentes. Nesse contexto, torna-se essencial o desenvolvimento e a adaptação de protocolos específicos que considerem as particularidades dessa espécie, visando aprimorar a precisão e a repetibilidade das análises de germinação para o mogno. Essa adequação é fundamental não apenas para assegurar a qualidade do material propagativo, mas também para atender às demandas técnicas e operacionais do setor florestal.

Carrijo et al. (2008) afirmam que a utilização de substratos de origem orgânica tem se destacado como uma alternativa sustentável para o cultivo agrícola, graças à sua composição rica em macro e micronutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas. Esses nutrientes, provenientes de materiais como resíduos vegetais, esterco, e compostagem, desempenham papéis críticos no metabolismo vegetal, influenciando diretamente o crescimento, produtividade e qualidade das culturas.

Devido à ausência de estudos sobre o uso do substrato mais adequado para a germinação do mogno africano, o presente estudo teve como objetivo avaliar o potencial de utilização de substratos de resíduos do beneficiamento da noz da macadâmia, obtidos em diferentes granulometrias.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para este estudo, o material foi obtido a partir dos endocarpos da noz da macadâmia (*Macadamia integrifolia*,) (cascas dos frutos) e foi coletado na unidade industrial de beneficiamento de nozes da TRIBECA, localizada Estrada Pirai-Pinheiral, km 10,5/11, Fazenda Santa Marta - Pirai/ RJ, 455 m altitude 22° 33' 56" S, 43° 56' 35" W.

A análise de germinação foi conduzida no Laboratório de Biologia Reprodutiva e Conservação de Espécies Arbóreas (LACON), no Departamento de Silvicultura da UFRRJ, com o objetivo de avaliar o potencial de germinação, nas diferentes granulometrias do Substrato, de sementes de mogno africano, comparando os resultados aos dos substratos comerciais utilizados para a espécie.

A análise química dos substratos foi elaborada no Centro de Estudos e Análises Agropecuárias e Ambientais (CEAgro), Laboratório de Estudos das Relações Solo Planta (LSP), no Departamento de Solos do Instituto de Agronomia/UFRRJ, Com o objetivo de detectar a presença significativa de compostos químicos no substrato da noz da macadâmia,

2.1 Organização do experimento

A partir dos endocarpos da noz da macadâmia (*Macadamia integrifolia*) (Figura 1), previamente secas em estufa a 50°C durante dois dias, o material foi triturado em moinho de martelo, no Departamento de Produtos Florestais (DPF)/IF, e peneirado em diferentes peneiras para obtenção de quatro granulometrias específicas (M1, M2, M3 e M4), conforme Tabela 8.

Tabela 5. Tratamentos e Granulometrias

TRAT	TRAT	REP	GRANULOMETRIA (mm)
M1 ES	M1 SS	4	5,66
M2 ES	M2 SS	4	4,76
M3 ES	M3 SS	4	3,36
M4 ES	M4 SS	4	2.38

Sendo: ES (Entre substrato), SS (Sobre Substrato).



Figura 6. Imagens dos diferentes tratamentos avaliados. Fonte: o autor (2023).

As sementes de mogno para o estudo foram desinfetadas utilizando uma solução de hipoclorito de sódio a 1 % de ingrediente ativo por 1 minuto. Em seguida foram semeadas em um substrato composto por resíduos do beneficiamento da noz da macadâmia, em caixas gerbox, que foram umedecidas com água destilada (ml) (Figura 6), conforme metodologia proposta por Brasil (20091).



Figura 7. Disposição das sementes no experimento.

Fonte: o autor, 2023

As sementes foram armazenadas em germinadores previamente ajustados para temperatura 25°C e mantidos sob iluminação constante (Figura 8). As avaliações ocorreram 8 dias após a semeadura. Os resultados foram expressos em percentagem de plântulas normais, considerando como normais aquelas que apresentaram estruturas essenciais completas, bem desenvolvidas, proporcionais e saudáveis. Ao final do teste, também foi calculada a percentagem de plântulas anormais.



Figura 8. Germinadores de sementes.

Fonte: o autor, 2023

2.2. Análise estatística

A análise de dados foi realizada no programa estatístico SAS OnDemand; Foram adotadas análises paramétricas com a análise da variância (ANOVA), seguindo um delineamento inteiramente casualizado, foi utilizado o teste de Tukey para a comparação de médias ao nível de confiança de 95%, com oito tratamentos, em quatro repetições que consistiram nos regimes de temperatura: 25°C constantes, 25 sementes por tratamento e quatro granulometrias diferentes (M1, M2, M3 e M4).

2.3. Análise química dos resíduos do beneficiamento da noz da macadâmia

Após a análise dos resíduos pode-se verificar a presença de macro/micronutrientes (Tabela 9).

Tabela 9. Análises químicas dos resíduos do beneficiamento da noz da macadâmia.

ID	Identificação da Amostra	Observação	
2876	Casca de Macadâmia	Matriz: Orgânica	
Determinações			
Parâmetro	Método	Unidade	
Umidade	-----		ndt
C	MAPA2017	g Kg ¹	421,70
N	MAPA2017	g Kg ¹	7,10
Relação C:N	MAPA2017	g Kg ¹	59,39
P	MAPA2017	g Kg ¹	0,01
K	MAPA2017	g Kg ¹	0,52
Ca	MAPA2017	g Kg ¹	40,42
Mg	MAPA2017	mg Kg ¹	31,26
Al	USEPA 3050B	mg Kg ¹	12,36
Cu	USEPA 3050B	mg Kg ¹	9,98
Fe	USEPA 3050B	mg Kg ¹	9,23
Mn	USEPA 3050B	mg Kg ¹	28,44
Zn	USEPA 3050B	mg Kg ¹	8,66
Ni	USEPA 3050B	mg Kg ¹	nd
Co	USEPA 3050B	mg Kg ¹	nd
Pb	USEPA 3050B	mg Kg ¹	nd
Cd	USEPA 3050B	mg Kg ¹	3,99
Cr	USEPA 3050B	mg Kg ¹	10,98
Ba	USEPA 3050B	mg Kg ¹	Nd

nd: Não Detectado ou abaixo do nível de detecção, ndt: Não determinado, *: Em análise

Análises químicas foram elaboradas no Centro de Estudos e Análises Agropecuárias e Ambientais (CEAgro) Laboratório de Estudos das Relações Solo Planta (LSP) Departamento de Solos do Instituto de Agronomia/UFRRJ.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise de germinação das sementes do Mogno Africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.)

A análise de germinação das sementes do Mogno Africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.) aplicadas entre o substrato (ES) e sobre substrato (SS) dos resíduos do beneficiamento da noz da macadâmia (*Macadamia integrifolia*) são apresentadas nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10. ES (Entre substrato) Valores médios obtidos para as análises de germinação das sementes do Mogno Africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.) dispostas entre os substratos - ES (Entre substrato) dos resíduos do beneficiamento da noz da macadâmia (*Macadamia integrifolia*) (M1, M2, M3, M4):

granulometria	M1	M2	M3	M4
PN	23,0 a	23,5 a	22,75 a	23,0 a
SM	1,88 b	1,25 b	2,25 b	2,0 b
PAN	0,13 c	0,25 c	0,0 c	0,0 c

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna. não diferem entre si pelo Teste Tukey ($p \geq 0,05$).

Nota: M1, M2, M3 e M4 representam diferentes granulometrias.

PN: Plântulas normais, SM: Sementes mortas e PAN: Plântulas anormais.

Tabela 11. SS (Sobre substrato) Valores médios obtidos para as análises de germinação das sementes do Mogno Africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.) dispostas sobre o substrato - SS (Sobre substrato) dos resíduos do beneficiamento da noz da macadâmia (*Macadamia integrifolia*) (M1, M2, M3 e M4):

Granulometria	M1	M2	M3	M4
PN	24,0 a	16,5 a	22,75 a	22,75 a
SM	0,75 b	2,5 b	2,25 b	1,75 b
PAN	0,25 c	2 c	0 c	0,5 c

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna. não diferem entre si pelo Teste Tukey ($p \geq 0,05$).

Nota: M1, M2, M3 e M4 representam diferentes granulometrias.

PN: Plântulas normais, SM: Sementes mortas e PAN: Plântulas anormais.

A avaliação da germinação das sementes de *Khaya ivorensis* A. Chev. utilizando resíduos do beneficiamento da noz da macadâmia (*Macadamia integrifolia*) como substrato revelou resultados satisfatórios em ambas as metodologias de semeadura: entre o substrato (ES) e sobre o substrato (SS), conforme demonstrado nas Tabelas 10 e 11.

Nos testes com sementes dispostas entre o substrato (ES), os valores médios de plântulas normais (PN) oscilaram entre 22,75 e 23,5 para as diferentes granulometrias (M1 a M4), sem diferenças estatísticas significativas pelo teste de Tukey ($p \geq 0,05$). Houve baixa incidência de sementes mortas (SM), variando de 1,25 a 2,25, e mínima ocorrência de plântulas anormais (PAN), limitando-se a 0,25 ou menos em M1 e M2, com ausência total em M3 e M4.

Nos testes realizados sobre o substrato (SS), as plântulas normais também apresentaram médias elevadas, com destaque para M1, M3 e M4 (22,75 a 24). A granulometria M2 apresentou menor desempenho (16,5 PN) e a maior ocorrência de plântulas anormais (2 PAN), evidenciando um comportamento atípico que sugere menor adequação desta fração para esse método de semeadura.

A ausência de plântulas anormais nas granulometrias M4 (ES) e M3 (SS) reforça a indicação dessas frações como mais promissoras na produção de mudas, contribuindo para o vigor e uniformidade das plântulas.

De forma geral, os resíduos de macadâmia apresentaram potencial como substrato alternativo na produção florestal, com bom desempenho germinativo, baixa taxa de mortalidade e viabilidade técnica satisfatória. Esses resultados indicam que a utilização de resíduos agroindustriais pode ser uma estratégia sustentável, integrando práticas de economia circular à cadeia produtiva florestal, com redução de custos e menor impacto ambiental.

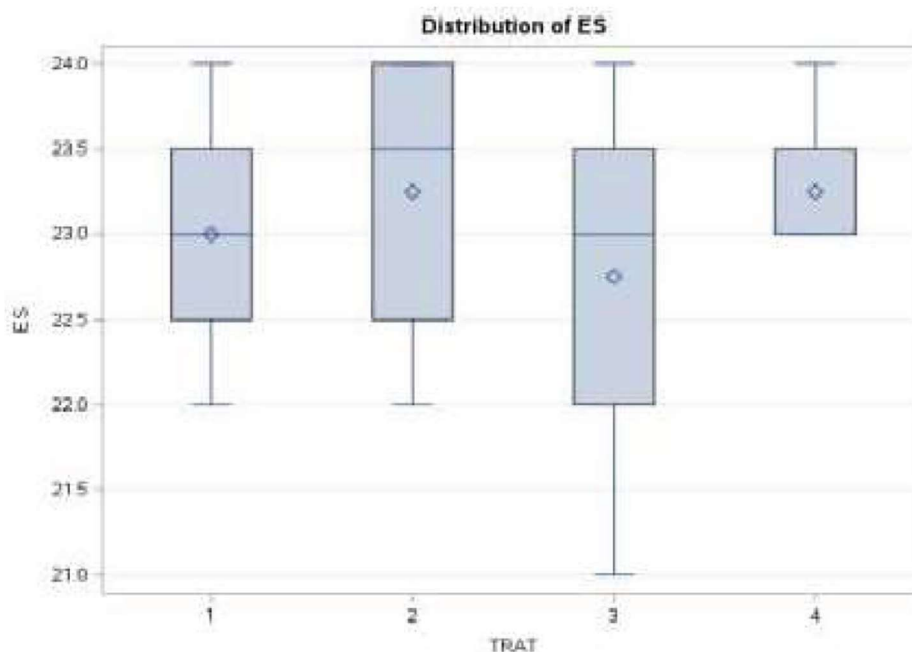


Figura 9. ES (Entre substrato) - Gráficos de boxplot ilustrando o comportamento da germinação em diferentes granulometrias dos resíduos da noz da macadâmia (*Macadamia integrifolia*).

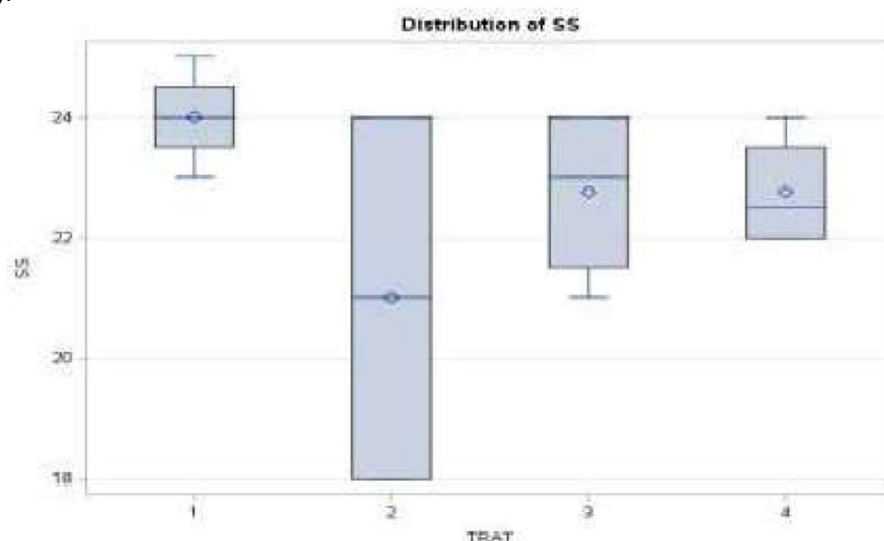


Figura 10. SS (Sobre substrato) - Gráficos de boxplot ilustrando o comportamento da germinação em diferentes granulometrias dos resíduos da noz da macadâmia (*Macadamia integrifolia*).

O processo de germinação depende diretamente das condições do substrato, que atua como meio físico e químico fundamental para a semente. Características como composição, aeração, retenção de água e ausência de patógenos determinam se o ambiente será favorável ou restritivo. Além de fornecer esses requisitos, o substrato também funciona como suporte para o estabelecimento inicial da plântula.

Os macronutrientes, como nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), são fundamentais para processos como a síntese de proteínas, divisão celular e transporte de açúcares. Estudos mostram que substratos ricos em N aumentam a biomassa vegetal e a fotossíntese, enquanto o P é crucial para o desenvolvimento radicular e a formação de flores e frutos (TAIZ et al., 2017). Por outro lado, o K regula a abertura e fechamento estomático, ajudando na tolerância a estresses hídricos e salinos (MARSCHNER, 2012). Pode-se verificar na Tabela 9 a presença desses nutrientes nos resíduos do beneficiamento da noz da macadâmia. Substratos muito ricos em nitrogênio podem levar à toxicidade ou ao desenvolvimento excessivo de microrganismos prejudiciais à germinação (QI et al., 2012). Porém os resíduos neste estudo apresentaram um teor de nitrogênio aproximadamente 7,10 g/ Kg⁻¹.

De acordo com Trujillo et al., (2020), os substratos com N total entre 0,1% e 0,5% são considerados adequados para germinação. O teor de 7,10 g/kg⁻¹ (0,71%) de nitrogênio no resíduo de casca da noz da macadâmia é moderado para substratos de germinação.

Os micronutrientes, como ferro (Fe), zinco (Zn), cobre (Cu), manganês (Mn) e boro (B), embora necessários em menores quantidades, são indispensáveis para o funcionamento de diversas enzimas e para a formação de estruturas celulares (MALAVOLTA, 2006). A deficiência de Fe, por exemplo, pode causar clorose em folhas jovens, enquanto a falta de Zn prejudica a formação de hormônios de crescimento, como as auxinas (EPSTEIN; BLOOM, 2005).

Substratos orgânicos possuem a capacidade de liberar esses nutrientes de forma gradual, promovendo uma nutrição balanceada e sustentável. Além disso, a presença de matéria orgânica melhora a retenção de água e a atividade microbiana do solo, o que potencializa a disponibilidade de nutrientes para as plantas (SOUZA; PEREIRA; LIMA, 2020). Contudo, a composição do substrato pode variar dependendo da matriz orgânica utilizada, sendo necessário realizar análises químicas periódicas para ajustar sua aplicação às necessidades específicas de cada cultura.

Portanto, o uso de substratos orgânicos não apenas favorece o fornecimento equilibrado de macro e micronutrientes, mas também contribui para a redução de insumos químicos, promovendo práticas agrícolas mais ecológicas e economicamente viáveis.

4. CONCLUSÕES

Foi possível obter um rendimento satisfatório entre as diferentes granulometrias do substrato, não houve valores de germinação contrastantes em seus resultados. Este resultado destaca a eficácia deste substrato em fornecer um ambiente propício para o desenvolvimento inicial das sementes.

As análises químicas realizadas em laboratório servirão como futuras referências de composição química do produto.

O uso de resíduos do beneficiamento de noz da macadâmia como substrato para germinação apresentou uma solução sustentável e inovadora. Tradicionalmente, os substratos são compostos por materiais como turfa, vermiculita ou casca de arroz carbonizada. Substituir esses materiais por resíduos do beneficiamento da noz da macadâmia pode reduzir os custos e a dependência de recursos não renováveis. Além disso, esses resíduos podem oferecer características físicas e químicas adequadas ao crescimento inicial de mudas, como boa retenção de água e aeração.

Por ser um recurso renovável, os resíduos de noz da macadâmia tem grande potencial para aproveitamento de resíduos no setor florestal, agrícola e no desenvolvimento sustentável. A utilização de resíduos agroindustriais contribui para práticas agrícolas sustentáveis, permitindo o reaproveitamento de resíduos agrícolas e a redução de impactos ambientais associados ao descarte inadequado desses materiais (FU; ZHANG; GUAN, 2023).

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- INSTITUTO BRASILEIRO DE FLORESTAS. Site institucional.** [SI]: IBF. [s.d.]. Disponível em: <https://www.ibflorestas.org.br/>. Acesso em: 30 ago. 2025.
- LAMPRECHT, H. **Silvicultura nos trópicos: ecossistemas florestais e respectivas espécies arbóreas - possibilidades e métodos de aproveitamento sustentado.** Eschborn: GTZ, 1990. 338 p.
- MARCOS FILHO, J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas.** 2. ed. Londrina: Abrates, 2015. 660 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes.** Brasília: Departamento Nacional de Produção Vegetal, 2009. 399 p.
- CARRIJO, O. A.; LIZ, R. S. **Substratos para produção de mudas e cultivo de hortaliças.** Brasília: Embrapa, 2008. 83 p.
- TAÍZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal.** 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858 p.
- MARC SHNER, H. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants.** London: Academic Press. 2012.
- QI, X.; WU, W.; SHAH, F.; PENO, S.; HUANG, J.; CUI, K.; LIU, H.; NIE, L. Ammonia volatilization from urea-application influenced germination and early seedling growth of dry direct-seeded rice. **Scientific World Journal**, v. 2012, ID 857472, 2012. DOI: 10.1100/2012/857472.
- ALMEIDA, D. de M.; SILVA, B. R. F. da; FILHO, J. O. M. U.; SOUSA, A. N. de; COSTA, T. L. N. da; SANTANA, J. A. da S. Efeito de diferentes substratos no desenvolvimento inicial de mudas de *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC) / Effect of different substrates on the initial development of *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC) seedlings. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 24619-24631, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n5-060.
- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas.** Agronômica Ceres, 2006 638 p ISBN 8531800471.
- EPSTEIN, E.; BLOOM, A. **Mineral nutrition of plants: principles and perspectives.** 2. ed. Sunderland, MA: Sinauer Associates, 2004. 400 p. ISBN 0-87893-172-4.
- SOUZA, G. F.; PEREIRA, M. M.; LIMA, R. S. Influência de substratos orgânicos na nutrição de hortaliças. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 15, n. 2, p. 45-58, 2020.

CAPÍTULO IV

UTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DA NOZ DA MACADAMIA (*MACADAMIA INTEGRIFOLIA*) NA PRODUÇÃO DE TUBETES E PRODUTOS BIODEGRADÁVEIS (PAINÉIS DE PARTÍCULAS)

USE OF MACADAMIA NUT (*MACADAMIA INTEGRIFOLIA*) PROCESSING RESIDUES IN THE PRODUCTION OF TUBES AND BIODEGRADABLE PRODUCTS (PARTICLEBOARDS)

RESUMO

A crescente preocupação com a sustentabilidade na cadeia produtiva do setor florestal tem impulsionado a busca por alternativas inovadoras que substituam materiais derivados de petróleo por opções biodegradáveis e ecologicamente corretas. O uso intensivo de tubetes plásticos representa um desafio ambiental, dada sua baixa taxa de degradação e potencial de acúmulo em aterros sanitários e áreas naturais. Majoritariamente, as resinas à base de formaldeído têm sido usadas como adesivo, ainda que algumas pesquisas apontem para o emprego do poliuretano derivado do óleo de rícino (resina de mamona) como alternativa viável. O aproveitamento de resíduos da macadâmia e sua integração com a resina de mamona abrem caminhos para avanços em várias frentes. Ao integrar os conceitos de economia circular e sustentabilidade, o uso de resíduos da noz da macadâmia na produção de tubetes biodegradáveis pode transformar um passivo ambiental em uma solução prática para a redução do consumo de plástico na produção de mudas florestais. Análises químicas foram elaboradas no Centro de Estudos e Análises Agropecuárias e Ambientais (CEAgro) Laboratório de Estudos das Relações Solo Planta (LSP) Departamento de Solos do Instituto de Agronomia/UFRRJ. Os recipientes de resíduos orgânicos apresentam em média 9,4 cm de altura, 4,3 cm de diâmetro e um volume de aproximadamente 121,14 cm³, produzidos em moldes confeccionados pelo autor. Os tubetes desenvolvidos destacam-se como uma alternativa viável para o reaproveitamento de resíduos agroindustriais. Estudos adicionais são imprescindíveis para assegurar que essas inovações possam ser amplamente implementadas, sem comprometer a qualidade e o desempenho dos produtos finais.

Palavras-chaves: sustentabilidade, biodegradáveis, resina de mamona, noz da macadâmia, tubetes.

ABSTRACT

The growing concern for sustainability in the forestry sector's production chain has driven the search for innovative alternatives to replace petroleum-derived materials with biodegradable and environmentally friendly options. The intensive use of plastic tubes poses an environmental chainage due to their low degradation rate and potential accumulation in landfills and natural areas. Formaldehyde-based resins have been predominantly used as adhesives, although some research points to castor oil-derived polyurethane (Castor Bean Resin) as a viable alternative. The utilization of macadamia waste and its integration with castor bean resin open pathways for advancements on multiple fronts. By integrating the concepts of circular economy and sustainability, the use of macadamia nut waste in the production of biodegradable tubes can transform an environmental liability into a practical solution for reducing plastic consumption in forest seedling production. Chemical analyses were conducted at the Center for Agricultural and Environmental Studies and Analyses (CEAgro), Laboratory of Soil-Plant Relationship Studies (LSP), Soil Department of the Institute of Agronomy/UFRRJ. The organic waste containers have an average height of 9.4 cm, a diameter of 4.3 cm, and a volume of approximately 121.14 cm³, produced in molds made by the author. The developed tubes stand out as a viable alternative for the reuse of agro-industrial waste. Additional studies are essential to ensure that these innovations can be widely implemented without compromising the quality and performance of the final product

Keywords: Sustainability, biodegradable, Castor Resin, macadamia nut, tubes.

1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com a sustentabilidade na cadeia produtiva do setor florestal tem impulsionado a busca por alternativas inovadoras que substituam materiais derivados de petróleo por opções biodegradáveis e ecologicamente corretas. Entre os insumos amplamente utilizados, os tubetes plásticos destacam-se como itens essenciais na produção de mudas de espécies florestais. Contudo, o uso intensivo de tubetes plásticos representa um desafio ambiental, dada sua baixa taxa de degradação e potencial de acúmulo em aterros sanitários e áreas naturais.

Pesquisas indicam que os resíduos gerados pela agroindústria têm ocasionado sérios impactos ambientais. Embora esses subprodutos sejam biodegradáveis, sua decomposição em aterros sanitários pode levar muitos anos. Paralelamente, o crescimento do mercado consumidor, com exigências cada vez mais específicas, vem incentivando o desenvolvimento de novos compósitos de origem vegetal e polimérica, tais como tubetes, painéis de partículas.

Estudos têm se empenhado no desenvolvimento de painéis de partículas com menor impacto ambiental. Em numerosos estudos, a estratégia frequentemente adotada consiste na substituição de cavacos de madeira por biomassas renováveis, tais como fibras agrícolas. Entre os materiais investigados, destacam-se: pinhas (KARAHAN et al., 2025), cascas de avelã conforme norma ASTM D790-02, cascas de amêndoa (BAE; SU, 2013), cascas de coco e bambu, por exemplo. Majoritariamente, as resinas à base de formaldeído têm sido usadas como adesivo, ainda que algumas pesquisas apontem para o emprego do poliuretano derivado do óleo de rícino (resina de mamona) como alternativa viável (FELIX et al., 2012).

A possibilidade de reinserir biomassas como material de reforço em compósitos poliméricos permite que esses resíduos orgânicos, antes descartados, retornem à cadeia produtiva com o objetivo de reduzir ou até eliminar os problemas ambientais. Nesse contexto, os resíduos provenientes do beneficiamento da noz da macadâmia se destaca como material promissor, especialmente pois sua produção tem aumentado na região sudeste do Brasil, onde as indústrias aproveitam apenas 25% do total processado, descartando a maior parte do produto.

Do peso total da noz, entre 60% e 70% é composto por resíduo derivado da casca. Em 2021, a produção global gerou 241.420 toneladas de noz com casca, das quais apenas 65.835 toneladas foram de grãos (a parte aproveitada) e 175.585 toneladas foram de resíduos. Isso significa que, aproximadamente, apenas 27,27% do total processado é aproveitado em forma de grãos, com a maior parte do produto sendo descartada como resíduo. (BALIEIRO, 2023)

No Brasil, a Lei Federal nº 12.305/10 criou a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Esta política estabelece princípios, objetivos, ferramentas, diretrizes e metas para serem aplicados nos níveis federal, estadual, municipal e privado, com o objetivo de gerir adequadamente os resíduos no país. Os princípios centrais desta lei incluem a no geração de resíduos, a redução, reutilização, reciclagem, tratamento e a destinação final adequada dos resíduos produzidos pela sociedade brasileira (BRASIL, 2010).

O aproveitamento de resíduos da macadâmia e sua integração com a resina de mamona abrem caminhos para avanços em várias frentes. Desde a promoção da economia circular até a criação de alternativas ecológicas aos plásticos derivados do petróleo, esta iniciativa possui o potencial de impactar positivamente setores como o agrícola, o industrial e o ambiental. Além disso, a proposta reforça o papel da inovação e da pesquisa no enfrentamento de desafios globais, como o combate às mudanças climáticas e a promoção de padrões de produção e consumo sustentáveis.

Ao integrar os conceitos de economia circular e sustentabilidade, o uso dos resíduos provenientes do beneficiamento da noz da macadâmia na produção de tubetes biodegradáveis pode transformar um passivo ambiental em uma solução prática para a redução do consumo de plástico na produção de mudas florestais. Essa abordagem não apenas atende às exigências de

um mercado cada vez mais comprometido com práticas sustentáveis, mas também promove um impacto positivo na preservação dos recursos naturais e no manejo de resíduos agroindustriais.

A busca por soluções sustentáveis para a redução de resíduos industriais tem se intensificado diante da necessidade de preservar o meio ambiente e promover uma economia circular. Nesse contexto, a utilização de resíduos provenientes do beneficiamento da noz da macadâmia surge como uma alternativa promissora. Ao serem combinados com resina de mamona, um recurso renovável e biodegradável, esses resíduos podem ser transformados em materiais inovadores, como tubetes para mudas e painéis, por exemplo. Essa abordagem não apenas contribui para a redução do desperdício, mas também estimula a adoção de práticas produtivas mais alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela ONU.

Desde a sua descoberta há apenas oito décadas, o poliuretano (PU) despontou como um dos polímeros mais versáteis e amplamente utilizados no mercado (PARASKAR et al., 2021). Sua trajetória ao longo do tempo foi marcada por uma transição significativa das matérias-primas convencionais derivadas do petróleo para uma diversidade de alternativas renováveis.

Essas alternativas incluem óleos vegetais, polissacarídeos, celulose, lignocelulose, amido, entre outros inúmeros produtos e subprodutos agrícolas. Tal mudança não só demonstra a adaptabilidade do PU, mas também reflete um compromisso crescente com a sustentabilidade e inovação na indústria. (PARASKAR et al., 2021, BOROWICZ et al., 2020, LEE; PARK; KIM, 2020; ASHJART et al., 2018; GANG et al., 2017).

Ao empregar esses insumos renováveis na fabricação de poliuretano, observa-se uma redução dos impactos ambientais, como a diminuição da emissão de gases que agravam o efeito estufa e o menor uso de recursos não renováveis. (PARASKAR et al., 2021).

Os óleos vegetais provenientes da mamona, sementes de canola, girassol, semente de uva, palma, entre outros, emergem como uma alternativa revolucionária aos poliíis comerciais de origem petroquímica. Sua abundância, preço imbatível, baixa toxicidade, biodegradabilidade excepcional e facilidade de extração não só os destacam, mas os transformam em protagonistas de uma mudança estrutural na indústria. Essa escolha estratégica não representa apenas uma alternativa viável, ela sinaliza o avanço rumo a um futuro mais sustentável e inovador. (LEE; KIM; OH, 2021).

O óleo vegetal derivado da mamona é identificado como uma alternativa superior entre todos os óleos vegetais devido ao grupo hidroxila presente em sua composição, além de seu baixo custo e grande disponibilidade (ZHANG et al., 2020).

O óleo de mamona é extraído das sementes da planta *Ricinus communis* e sua composição é predominantemente formada por ácido ricinoleico, grupo carboxílico, grupo hidroxila e uma ligação dupla insaturada. Esses componentes conferem uma estrutura robusta ao óleo (MUBOFU, 2016, YUSUF et al., 2015). Dentre os ácidos graxos encontrados no óleo de mamona, destacam-se o ácido ricinoleico, oléico, esteárico, palmítico, linoleico, linolênico, entre outros. O ácido ricinoleico é o principal ácido graxo presente, representando cerca de 90% da composição do óleo. Ele possui 18 átomos de carbono, é monoinsaturado, com uma ligação dupla cis entre os carbonos 9 e 10, além de um grupo hidroxila no carbono 12 (TROVATI et al., 2019; BERUK et al., 2018; PANHWAR et al., 2016). Em razão dessas características, o óleo de mamona é considerado um poliálcool trifuncional, o que o torna adequado para diversas reações químicas e mais vantajoso que outros óleos na produção de poliuretano, já que a hidroxilação da ligação dupla presente não é necessária (LIANG et al., 2018; GURUNATHAN; MOHANTY; NAYAK, 2015). O poliuretano obtido a partir do óleo de mamona tem sido amplamente utilizado em compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais (DE OLIVEIRA et al., 2022; MARTINS et al., 2021; GANDARA et al., 2020; SHAO et al., 2020; ZANINI et al., 2020).

Segundo LEE et al., (2021) e SAYEED; SAYEM; HAIDER (2020), os compósitos poliméricos que utilizam resíduos agroindustriais como reforço têm sido intensamente

pesquisados. Esses resíduos, que são derivados de fibras naturais, possuem propriedades mecânicas excepcionais. Além de serem biodegradáveis e provenientes de fontes renováveis, o que os torna uma escolha ambientalmente adequada. Comparados às fibras sintéticas, esses materiais têm uma densidade menor e um custo reduzido. Outro benefício significativo é que, por serem menos abrasivos, eles ajudam a prolongar a vida útil dos equipamentos utilizados no processo de fabricação.

Khalil et al. (2019) afirmam que os compósitos são materiais formados pela combinação de dois ou mais componentes com características e composições distintas. As propriedades desses materiais são fortemente influenciadas pela adesão entre as fases, sendo a matriz (fase contínua) e o reforço (fase dispersa) fatores cruciais, além de dependerem da composição, dimensão e geometria dos constituintes.

A crescente necessidade de um ambiente sustentável tem impulsionado a utilização de recursos naturais e resíduos agroindustriais em compósitos poliméricos, visando o desenvolvimento de materiais inovadores e ecológicos (DE OLIVEIRA et al., 2022; SAIR et al., 2019).

Diversos resíduos originados dos beneficiamentos agrícolas são classificados como resíduos agroindustriais, abrangendo materiais vegetais múltiplos (VENIL; DEVI; AHMAD, 2020a; MADEIRA et al., 2017). Segundo GUTIERREZ-FERNANDEZ, (2022) e SAMAKSAMAN et al., (2021), a destinação inadequada desses resíduos, seja por meio da queima ou pelo envio a aterros não sanitários, configura práticas ambientalmente prejudiciais, que podem resultarem sérios impactos, como a degradação dos solos, a contaminação da água e a poluição atmosférica.

O setor de painéis de madeira reconstituída tem registrado um crescimento significativo no Brasil e no cenário global, impulsionado pela busca por alternativas sustentáveis e de alto desempenho na indústria de materiais. Esses painéis podem ser fabricados a partir de qualquer material lignocelulósico que apresente elevada resistência mecânica e densidade previamente estabelecida, uma vez que a composição química desses materiais se constitui essencialmente de celulose, hemicelulose e lignina, resultando em um material cujas propriedades são comparáveis às da madeira. Segundo ROWELL, (2012), essa similaridade química possibilita a adequação de diferentes biomateriais para a produção de painéis estruturais e não estruturais, otimizando propriedades físicas e mecânicas conforme a aplicação desejada.

A transformação desses resíduos em matéria-prima para a produção de compósitos de alto valor agregado é uma solução ecologicamente responsável (SADH; DUHAN, 2018). Diante desse contexto, a indústria de poliuretano tem inovado ao desenvolver espumas a partir de materiais renováveis. Isso é alcançado mediante o uso de polióis derivados de óleos vegetais e de fibras naturais obtidas de resíduos agrícolas, que funcionam como reforços em compósitos poliméricos (DAS et al., 2019).

Segundo Lima et al. (2020), a seringueira é uma espécie nativa do Brasil, cuja ocorrência é característica da floresta Amazônica, mas facilmente adaptável na maioria do território nacional. O principal uso da seringueira é a extração do látex, cujo ciclo é viável economicamente por 25 anos. Eufrade Junior et al., (2015), afirmam que a madeira de *Hevea brasiliensis* pode ser utilizada como alternativa em estruturas pequenas e secundárias, construção leve, componentes de edifícios internos, utilidades gerais (molduras, por exemplo), painéis derivados de madeira e móveis.

A seringueira (*Hevea brasiliensis*) e resíduos provenientes do beneficiamento da noz da macadâmia (*Macadamia integrifolia*) foram selecionados para este estudo com o propósito de investigar sua aplicabilidade na fabricação de painéis de partículas homogêneas. A pesquisa concentra-se no uso de indivíduos dessas espécies com idade superior a 25 anos, a fim de avaliar sua viabilidade técnica na produção de painéis aglutinados por adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona (PU-Mamona). A caracterização física e mecânica dos painéis fabricados foi

conduzida conforme os critérios estabelecidos na norma brasileira NBR 14810-1 e 2:2018 (ABNT, 2018), além de parâmetros normativos internacionais correlatos.

O objetivo deste estudo foi produzir tubetes biodegradáveis e painéis de partículas homogêneas de seringueira (*Hevea brasiliensis*) e resíduos do beneficiamento da noz da macadâmia (*Macadamia integrifolia*), utilizando aditivo derivado do óleo de mamona (IMPERVEG AGT 1315), com diferentes proporções de madeira e resíduos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Coleta do material

Para este estudo, foram obtidos os endocarpos da noz de macadâmia (*Macadamia integrifolia*) da unidade industrial de beneficiamento de nozes da TRIBECA, na Fazenda Santa Marta, localizada no Município de Pirai, Estado do Rio de Janeiro.

Os endocarpos foram transportados para o Laboratório de Química da Madeira do Departamento de Produtos Florestais (IF-UFRJ) e armazenadas em sala climatizada a 25°C. e triturados em moinho martelo. Após esse processo o material foi novamente triturado em moinho do tipo Willey, peneirado e selecionado (Figura 11), seguindo as recordações NBR 14660 (ABNT, 2004).



Figura 11. Resíduos da noz da macadâmia coletados triturados em diferentes moinhos: (A) Pós-beneficiamento, (B) Moídos em moinho Martelo e (C) Moídos em Moinho tipo Willey. Fonte: o autor (2024).

2.2. Propriedades dos resíduos da noz de macadâmia:

Após o peneiramento e a classificação dos resíduos da noz de macadâmia, foram determinadas as seguintes propriedades: teor de umidade e densidade do material.

2.2.1 Determinação do teor de umidade dos resíduos

Para a realização desse ensaio, primeiramente foi obtida a massa úmida dos resíduos das nozes de macadâmia que foram colocados em um recipiente com água com temperatura controlada em $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, de forma que os resíduos da noz de macadâmia permaneceram 25 mm abaixo da linha d'água. Após o período de $24\text{h} \pm 36\text{ min}$ de imersão, o material foi retirado do recipiente, removido o excesso de água e pesados em balança com resolução de 0,01 g, obtendo o resultado (MU).

Em seguida, o material foi seco em estufa a $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ até a completa eliminação da água, permanecendo sob essa condição até que a massa dos resíduos se tornasse constante, sem variação superior a 0,1% entre medições consecutivas. As pesagens foram realizadas dentro de um intervalo máximo de seis horas, até a obtenção da massa seca (MS). Para o cálculo de umidade, aplicou-se a equação da umidade do CP:

$$U = \frac{MU-MS}{MS} \times 100$$

onde:

U = Umidade, expressa em porcentagem (%)

MU = Massa úmida, expressa em gramas (g)

MS = Massa seca, expressa em (g)

O teor da umidade (TU) foi calculado segundo norma NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1997).

2.2.2 Determinação da densidade dos resíduos

A densidade básica (Db) foi determinada pelo método do máximo teor de umidade, descrito na norma NBR 11941 (ABNT, 2003), conforme a equação:

$$D_b = \frac{1}{\left(\frac{M_{SAT}}{M_{\%}}\right)} - 0,346$$

Ou D_b = Massa seca estufa (anidra) / volume saturado (g/cm^3).

$$D_b = \frac{M_{\%}}{V_{SAT}}$$

onde:

D_b = Densidade básica da madeira

M_{SAT} = Massa saturada (massa úmida da amostra, em gramas).

$M_{\%}$ = Massa anidra (massa seca em estufa, em gramas).

V_{SAT} = Volume saturado

2.3. Produção dos tubetes

O material selecionado para produção dos tubetes foi composto pelas partículas que passaram na peneira de 8 mesh (2,40 mm) e ficaram retidas na malha de 16 mesh (1,00 mm). Esse material foi homogeneizado utilizando dois tipos de aglutinantes: resina bicomponente à base de poliuretano vegetal, derivada do óleo de mamona (Imperveg AGT 1315).

Após a homogeneização do material com a resina de mamona, realizou-se a prensagem em prensa hidráulica com controle de temperatura (Figuras 10 e 11). Os equipamentos utilizados foram desenvolvidos pelo próprio autor para a produção dos protótipos deste estudo.



Figura 12. Equipamento adaptado para confecção dos tubetes.

Fonte: o autor (2024)



Figura 13. Prensagem utilizando a prensa hidráulica. Moldes utilizados para a fabricação dos tubetes e dimensões após moldagem.

Fonte: o autor (2024)

Os tubetes fabricados com os resíduos do processamento da noz da macadâmia foram padronizados para possuírem volume interno semelhante ao dos utilizados comercialmente na propagação de mudas de espécies florestais (94 mm de altura, 43 mm de diâmetro e um volume de aproximadamente 121,14 cm³) (Figura 14), atendendo às dimensões mínimas dos tubetes disponíveis no mercado.



Figura 14. Tubetes confeccionados com os resíduos da noz da macadâmia.
Fonte: o autor (2024)

Os tubetes de polipropileno (Figura 15) adotados como padrão no presente estudo possuíam diâmetro externo de 64 mm, diâmetro interno de 53 mm e altura de 135 mm, com capacidade volumétrica de 175 cm³.



Figura 15. Tubete de polipropileno utilizado em produção de mudas.
Adaptado de: Agromania (s.d.).

Os experimentos foram realizados nos Laboratórios de Química da Madeira (LQM) e Laboratório de Processamento da Madeira (LPM) do Instituto de Florestas/UFRRJ, município de Seropédica, estado do Rio de Janeiro.

2.4. Produção de painéis de partículas

O adesivo bicomponente foi obtido pela mistura de uma parte de polioli (à base de óleo de mamona) com uma parte de pré-polímero (isocianato). Após a trituração do em picador industrial, o material foi peneirado em peneiras montadas em agitador elétrico para a classificação das partículas. (Figura 16)



Figura 16. Partículas dos resíduos do processamento da noz da macadâmia (Laboratório de Processamento da Madeira/IF/UFRRJ).

Fonte: o autor (2025)

Foram utilizadas três peneiras; o fundo não foi considerado, pois nele se depositaram as frações finas, inadequadas para o propósito do trabalho. Após a peneiração e pesagem, acrescentou-se o adesivo à base de óleo de mamona, e as partículas foram misturadas manualmente, garantindo uniformidade à massa.

Os painéis foram fabricados conforme as especificações apresentadas na Tabela 12, empregando quatro proporções distintas de resíduos da noz de macadâmia. Partículas de serragem da madeira da seringueira (*Hevea brasiliensis*) e adesivo à base de óleo de mamona. Este adesivo é composto por uma parte de polioli e uma parte de isocianato, garantindo a coesão e a resistência mecânica dos painéis.

Tabela 12. Composição dos painéis de resíduos da noz da macadâmia e partículas de serragem da madeira da seringueira (*Hevea brasiliensis*).

RESINA/MATERIAL%	Resíduos da noz da macadâmia (a)	Partículas de madeira (b) (ml)	Resina de mamona (poliol+ isocianato) (%)
100%(A)	2100	0	25%
75%(A) +25%(B)	1575	525	25%
50%(A) +50%(B)	1050	1050	25%
25%(A) +75%(B)	525	1575	25%

O processo de prensagem teve como meta garantir a uniformidade do colchão, considerando a interação entre a cura da resina, a pressão aplicada e a temperatura. Neste experimento, utilizou-se um limitador de altura com 12,0 mm para prensar o colchão de partículas de modo a determinar a espessura final do painel.

A prensagem foi realizada por 10 minutos sob uma pressão aproximada de 195 bar e temperatura de 110°C. Após o término, os painéis permaneceram em ambiente de temperatura controlada por 72 horas, a fim de completar a cura da resina, e foram, posteriormente, cortados conforme a norma NBR 14810-2 (2013) para retirada dos corpos de prova (Figura 17).



Figura 17. Corpos de prova para avaliação das propriedades dos painéis. Fonte: o autor (2025)

2.5. Avaliação das propriedades físicas dos painéis

2.5.1 Determinação da densidade

A determinação da densidade dos corpos de prova foi realizada com base na norma ABNT NBR 14810-2:2013, envolvendo a obtenção precisa da massa e do volume das amostras extraídas dos painéis, correspondentes aos diferentes tratamentos com proporções de 25%, 50%, 75% e 100% de resíduo de macadâmia.

Para a mensuração das dimensões lineares, utilizou-se um paquímetro com resolução de 0,01 mm, destinado à medição do comprimento (b_1) e da largura (b_2). A espessura das amostras foi determinada com um micrômetro digital da marca Digimess, com capacidade de 0 a 25 mm e resolução de 0,001 mm. A massa foi aferida por meio de uma balança digital da marca Bel, com resolução de 0,01 g.

Com base nessas medições, foi calculado o volume e a densidade dos corpos de prova, conforme metodologia padronizada. (Figura 18)

Para a validação das densidades, as espessuras dos corpos de prova foram registradas por meio da média de cinco pontos distintos em cada amostra, sendo uma medição realizada no centro e as demais próximas aos vértices, com resolução de 0,01 mm.

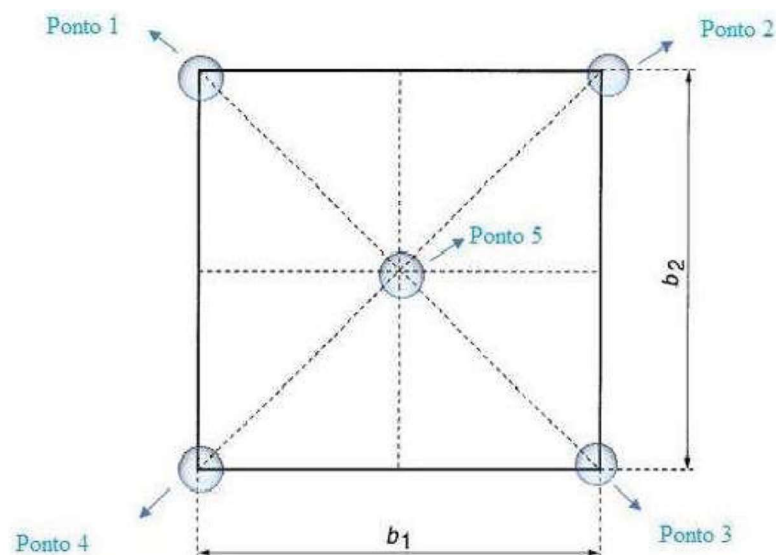


Figura 18. Esquema ilustrativo dos pontos de medição da espessura dos corpos de prova utilizados na determinação da densidade.

Fonte: Adaptado da NBR 14810-2/2013

Para o cálculo da densidade, aplicou-se a equação de densidade do CP:

$$D = \frac{M}{V} \times 10^6$$

E equação do volume do CP, conforme norma NBR 14.810 de 2013:

$$D = L \cdot C \cdot E$$

Sendo:

D → Densidade do corpo de prova, em quilogramas por metro cúbico (kg/m³);

M → Massa do corpo de prova, em gramas (g);

V → Volume do corpo de prova, em milímetros cúbicos (mm³);

L → Largura do corpo de prova, em milímetros (mm);

C → Comprimento do corpo de prova, em milímetros (mm);

E → Espessura do corpo de prova, em milímetros (mm).

2.5.2. Inchamento em Espessura

Para determinar o Inchamento em Espessura (IE), cada corpo de prova teve sua região central devidamente demarcada e a espessura nessa área foi aferida com um micrômetro de precisão. Após esse procedimento, os corpos de prova foram imersos em água por um período de 2 horas, e posteriormente realizadas novas medições. Em seguida, os corpos de prova permaneceram submersos até completarem 24 horas de imersão, tendo suas medidas novamente tomadas. O inchamento em espessura foi calculado utilizando-se a equação abaixo:

$$IE = \frac{E_2 \text{ ou } E_{24} - E_0}{E_0} \cdot 100$$

Onde:

IE = inchamento em espessura, em %;

E₂ ou E₂₄ = espessura após 2 horas ou 24 em água, em mm;

E₀ = espessura inicial, em mm.

2.5.3. Absorção de Água

Para a determinação o da absorção de água (AA), os corpos de prova foram inicialmente submetidos à pesagem em estado seco, seguida de imersão em água por um período de 2 horas. Decorrido esse tempo, foram retirados da água, cuidadosamente secos para a remoção do excesso superficial e novamente pesados. Em seguida, os corpos de prova foram mantidos em imersão por um período total de 24 horas, ao término do qual foram submetidos a uma nova etapa de secagem superficial e pesagem, permitindo a análise da variação de massa em função do tempo de exposição à água. A absorção de água é calculada a partir da massa das amostras, utilizando-se a equação:

$$AA = \frac{M_{2 \text{ ou } 24} - M_0}{M_0} \cdot 100$$

Onde:

AA = absorção de água, em %;

M₂ ou M₂₄ = massa após 2 horas ou 24 horas em água, em g;

M₀ = massa inicial, em g.

2.6. Avaliação das propriedades mecânicas dos painéis

2.6.1. Determinação da resistência a flexão e módulo de elasticidade

As dimensões dos corpos de prova foram obtidas usando-se um paquímetro com resolução de 0,01 mm, um micrômetro com resolução de 0,001 mm, medindo-se a espessura dos corpos de prova no ponto de intersecção das diagonais com o micrômetro e a largura (B) com o paquímetro, conforme apresentada nas figuras 19 e 20.



Figura 19. Esquema de medição das dimensões dos corpos de prova: largura (B) obtida com paquímetro digital e espessura medida no ponto de intersecção das diagonais com micrômetro digital.

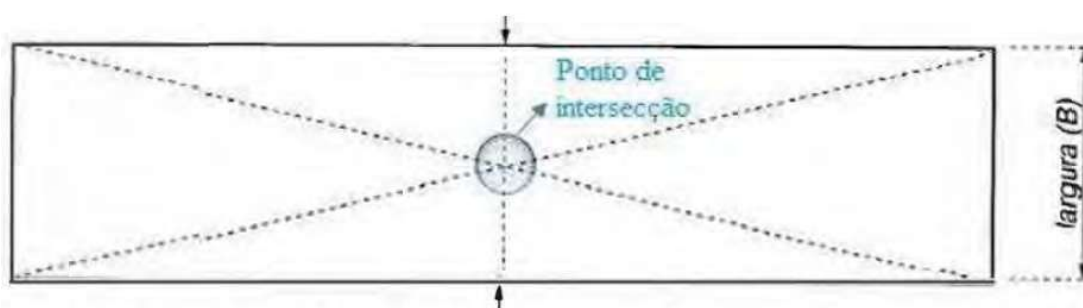


Figura 20. Pontos de medidas dos corpos de prova.
Fonte: Adaptado da NBR 14.810-2/2013

Após a determinação das medidas, os corpos de prova foram colocados nos apoios da máquina de ensaio, como determina a norma (Figura 21)

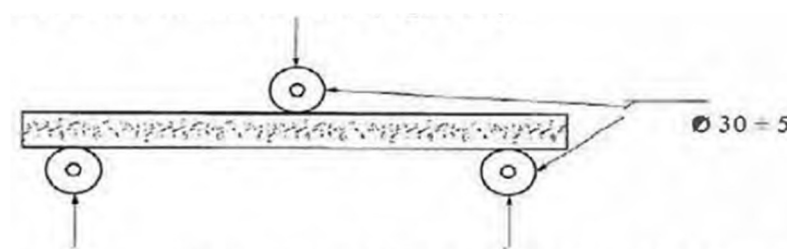


Figura 21. Esquema ilustrativo mostrando corpo de prova posicionado sobre os apoios da máquina universal de ensaios
Fonte: Adaptado da NBR 14.810-2/2013

A aplicação da carga para o ensaio realizado em máquina universal de ensaios, modelo UMC 300, deve ser lenta e gradual. Zerou-se o indicador de carga da máquina, acionando-a com velocidade constante, para que a ruptura acontecesse no intervalo indicado anteriormente (Figura 22).



Figura 22. Montagem do corpo de prova no dispositivo de ensaio.

Fonte: Autor

Para o cálculo do módulo de elasticidade (MOE), utilizou-se a equação:

$$MOE = \frac{P \cdot L^3}{(d \cdot 4 \cdot b \cdot h^3)}$$

Sendo:

MOE → Módulo de elasticidade, expresso em Newtons por milímetro quadrado (N/mm²);

P → Carga do limite proporcional lida no indicador de cargas, expressa em Newtons(N);

L → Distância entre apoios do aparelho, expressa em milímetros (mm);

d → Deflexão, correspondente à carga P1, expressa em milímetros (mm);

b → Largura do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);

h → Espessura do corpo de prova, expressa em milímetros (mm).

O cálculo do módulo de ruptura (MOR), foi realizado conforme a equação:

$$MOR = \frac{1,5 (P \cdot L)}{b \cdot h^2}$$

Onde:

MOR → Módulo de resistência à flexão estática, expresso em Newtons por milímetro quadrado (N/mm²);

P → Carga de ruptura lida no indicador de cargas, expressa em Newtons (N);

L → Distância entre apoios do aparelho, expressa em milímetros (mm);

b → Largura do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);

h → Espessura do corpo de prova, expressa em milímetros (mm).

2.6.2 Determinação da resistência a tração perpendicular

Os procedimentos para determinação da resistência à tração perpendicular, estão descritos a NBR 14810/2013, bem como a preparação dos corpos de prova, conforme (Figura 23). O ensaio de tração perpendicular às faces analisa a ligação entre as partículas e o adesivo estando diretamente relacionada a densidade do painel, ao tempo c a temperatura utilizada na

fase de prensagem, bem como a quantidade de resina utilizada na mistura. Para este teste, foram selecionados corpos de prova colados em blocos de tração, (dispositivos para montagem e fixação das amostras), sendo um posicionado como base e outro como topo conforme apresentado na figura 23, com adesivo específico.

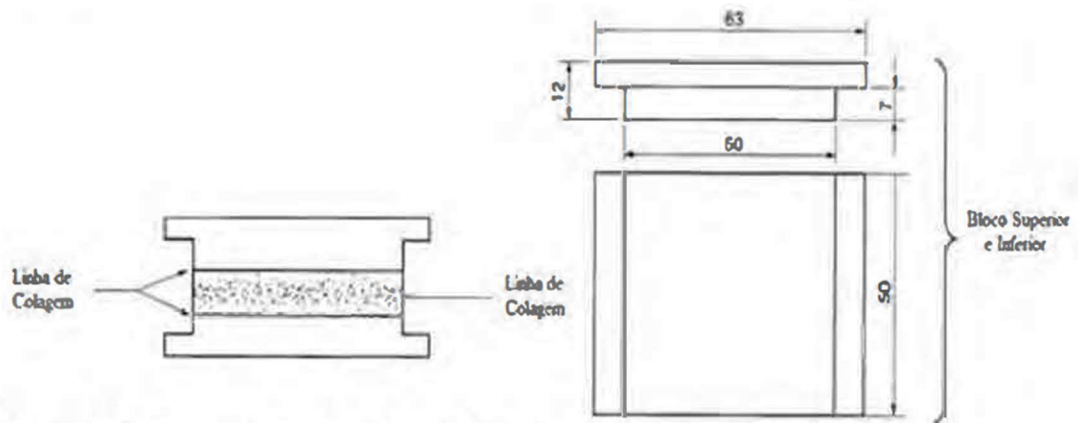


Figura 23. Blocos de fixação e área de colagem.

Fonte: Adaptado da NBR 14.810-2/2013

Os dispositivos contendo os corpos de prova montados entre os blocos de tração, foram colocados na máquina universal de ensaios e submetidos a carregamentos crescentes à tração, até que ocorresse à ruptura. (Figura 24).



Figura 24. Corpos de prova colados aos suportes durante ensaio de tração perpendicular.

Fonte: Autor

A resistência a tração perpendicular foi calculada através da equação:

$$TP = \frac{P}{S}$$

Onde:

TP → Resistência à tração perpendicular, expressa em Newtons por milímetro quadrado (N/mm²);

P → Carga da ruptura, expressa em Newtons (N);

S → Área superficial do corpo de prova, expressa em milímetros quadrados (mm²).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Propriedades físicas dos resíduos da noz de macadâmia: teor de umidade, densidade básica e densidade aparente

A Tabela 13 apresenta o teor médio de umidade dos resíduos da noz da macadâmia. Pereira et al. (2020) observaram que esse teor de umidade, de cerca de 89,1%, apresenta resultados satisfatórios em termos de durabilidade do material, e que madeiras com menor teor de umidade apresentam também maior resistência.

Tabela 13. Valores médios de teor de umidade, densidade dos resíduos da noz da macadâmia.

Teor de Umidade (% AS)	Densidade Básica (g/cm ³)	Densidade Aparente (g/cm ³)
89,1	0,950	0,417

3.2 Produção de tubetes

As Figuras 25 a 28 ilustram as características dos tubetes produzidos.



Figura 25. Tubete obtido no experimento.

Fonte: o autor (2024)



Figura 26. Tubetes confeccionados com os resíduos da noz da macadâmia.

Fonte: Autor (2024)



Figura 27 - A, B e C. tubetes com diferentes formulações, onde utilizamos a Resina de Mamona bicomponentes.

Fonte: o autor (2024)



Figura 28. Mudas implantadas nos tubetes do experimento.

Fonte: o autor (2024)

3.3 Produtos: Painéis de Partículas

3.3.1 Resultados da avaliação dos ensaios físicos

A seguir são apresentadas a avaliação e análise dos resultados das propriedades físicas dos painéis com partículas homogêneas dos resíduos da noz de macadâmia e partículas da madeira da seringueira (*Hevea brasiliensis*), tendo como material ligante a resina à base de mamona bi-componente, referentes aos ensaios de densidade, teor de umidade, inchamento em espessura 24h, e absorção de água 24h.

3.3.2 Ensaio de determinação da densidade

A partir do ensaio realizado para determinação da densidade dos painéis, foi possível calcular a densidade média correspondente. Os valores obtidos foram comparados aos requisitos estabelecidos pela norma NBR 14810-2:2013, bem como aos dados reportados na literatura. Na Figura 29, são apresentados os valores médios de densidade dos painéis, conforme os diferentes tratamentos avaliados.

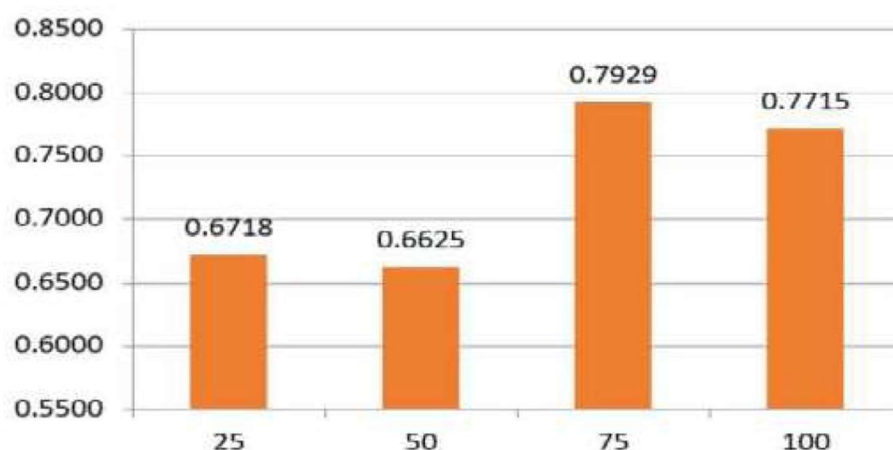


Figura 29. Densidade média dos painéis em g/cm³ em função da porcentagem das misturas utilizadas.

A densidade média dos painéis variou de acordo com as diferentes proporções da mistura utilizadas na formulação. Observou-se que com 25% e 50% da mistura, as densidades foram de 0,672 g/cm³ e 0,663 g/cm³, respectivamente, indicando valores relativamente baixos e próximos entre si (Figura 29). A maior densidade foi registrada na proporção de 75%, atingindo 0,793 g/cm³, o que sugere uma melhor compactação e interação entre os componentes nesta composição. Na proporção de 100%, embora ainda tenha sido obtida uma densidade elevada (0,772g/cm³), houve uma leve redução em relação ao ponto ótimo observado em 75%. Esses resultados indicam que a adição do resíduo em até 75% contribui positivamente para o aumento da densidade dos painéis, enquanto teores superiores podem comprometer essa característica, possivelmente devido à saturação da matriz ou à menor coesão entre as partículas.



Figura 30. Painéis de partículas, onde foi utilizada resina de mamona bicomponente. Fonte: o autor (2024).

3.3.3. Ensaio de determinação do inchamento em espessura 24h e 2h

A exposição dos painéis à umidade provoca alterações significativas em suas propriedades físicas, como o aumento da espessura. Essa característica pode restringir seu uso em determinadas aplicações, uma vez que maiores índices de inchamento resultam em variações dimensionais mais acentuadas.

No que diz respeito ao inchamento total, os resultados (Figura 31) evidenciaram um comportamento inverso ao observado para a densidade. A proporção de 25% apresentou o maior valor médio de inchamento, ultrapassando 2,0%, indicando uma maior absorção de água e menor estabilidade dimensional. Por outro lado, as proporções de 50%, 75% e 100% apresentaram valores significativamente reduzidos, todos abaixo de 0,2%, revelando uma performance superior quanto à resistência à umidade. Esse resultado sugere que a maior presença do resíduo na formulação favorece a estabilidade dos painéis frente à absorção de água, sendo especialmente relevante a expressiva redução do inchamento ao se aumentar a proporção de 25% para 50%.

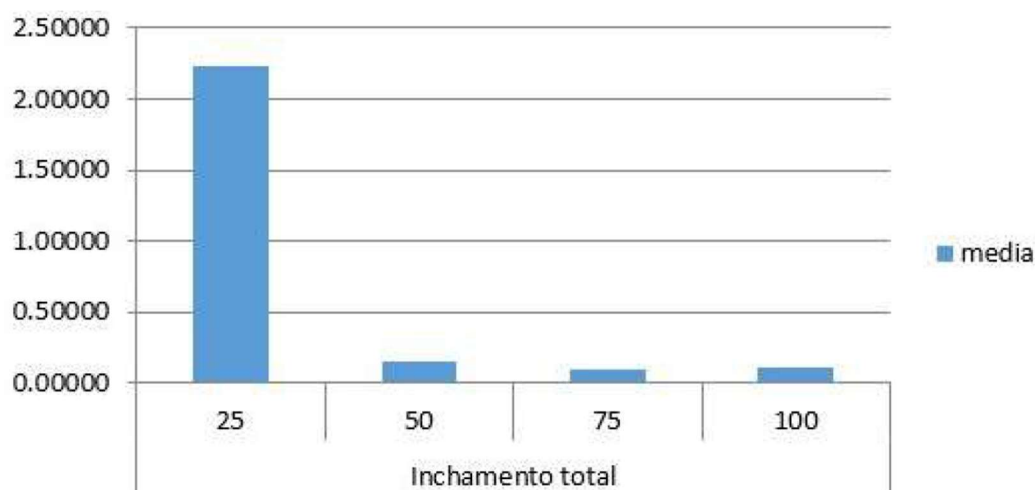


Figura 31. Inchamento em Espessura (TE) após 24h de imersão em água dos painéis (% médias em função da % da mistura).

Em relação à retração total, observou-se (Figura 32) um comportamento no linear entre as diferentes proporções testadas. A maior retração média foi registrada na formulação com 50% da mistura (cerca de 0,122%), enquanto o menor valor foi verificado na proporção de 75% (aproximadamente 0,082%), indicando maior estabilidade dimensional nesta condição. As formulações com 25% e 100% apresentaram valores intermediários, em torno de 0,088 e 0,096, respectivamente. Esses resultados reforçam a tendência observada nas análises anteriores, em que a proporção de 75% do resíduo se destacou como a mais equilibrada em termos de desempenho físico, sugerindo uma composição ideal para a produção de painéis com boas propriedades de compactação e estabilidade frente a umidade e variações dimensionais.

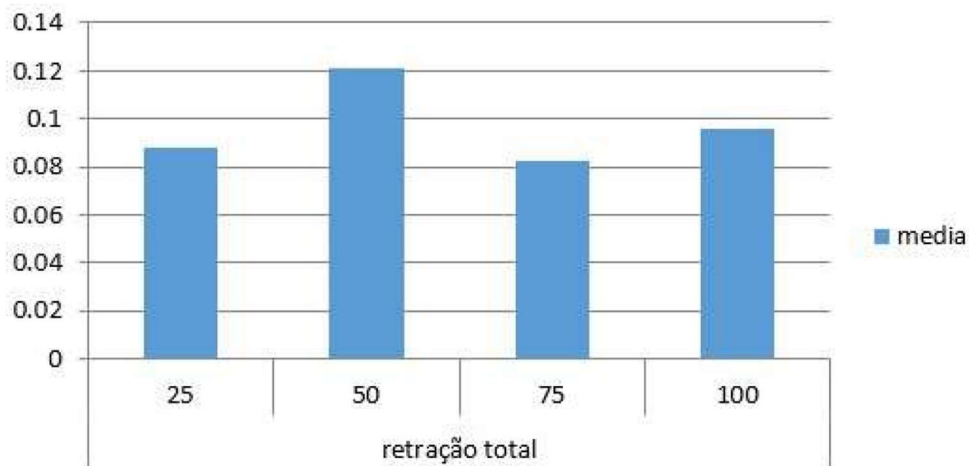


Figura 32. Retração total (médias em função da porcentagem da mistura).

A Figura 33 ilustra o desvio padrão (d.p.) do inchamento total de painéis em diferentes proporções (25%, 50%, 75% e 100%), indicando a variabilidade dos dados em cada condição testada. Observa-se que a maior variabilidade está associada à amostra com 50%, que apresenta um desvio padrão significativamente superior aos demais grupos. Este resultado pode sugerir uma instabilidade na estrutura do painel nesta proporção específica, possivelmente relacionada a uma distribuição heterogênea dos componentes ou à interação desfavorável entre os materiais utilizados. Já os demais tratamentos (25%, 75% e 100%) demonstram valores bastante inferiores de d.p., o que indica maior homogeneidade nos resultados e, possivelmente, maior controle no processo de produção ou melhor compatibilidade dos materiais nessas proporções. Esses dados ressaltam a importância de avaliar não apenas a média dos resultados, mas também a dispersão, para uma melhor compreensão do comportamento dos painéis quanto ao inchamento.

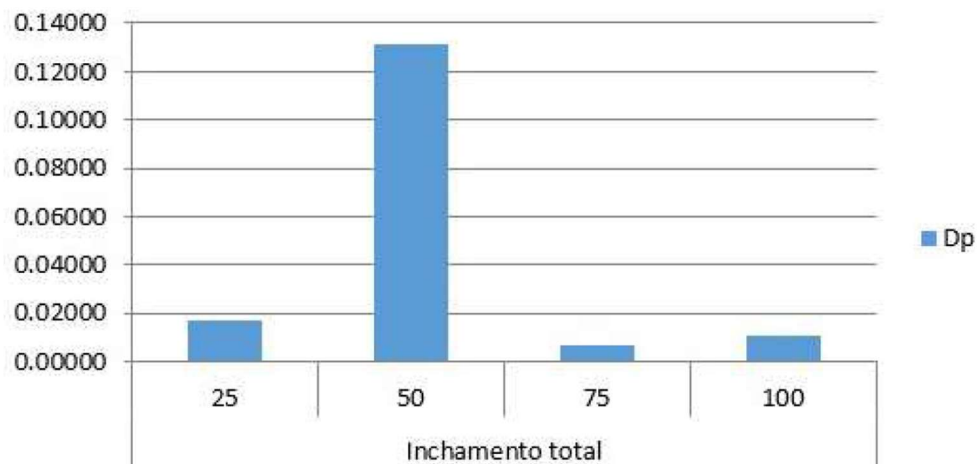


Figura 33. Inchamento total (desvio padrão).

A análise dos dados de retração total (Figura 34) para a formulação com 50% de adição revelou uma variabilidade significativamente maior em comparação com as demais proporções avaliadas (25%, 75% e 100%). O desvio padrão observado inicialmente foi de 0,82, valor notavelmente superior aos registrados nos demais grupos.

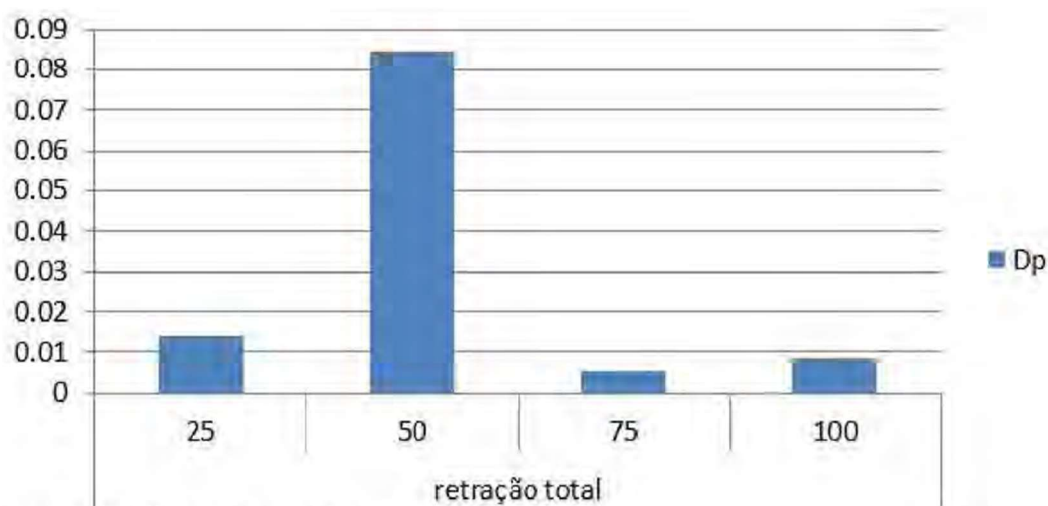


Figura 34. Retração total (desvio padrão).

O gráfico do coeficiente de variação (CV%) do inchamento total (Figura 35) evidencia uma expressiva discrepância na variabilidade relativa dos dados entre os diferentes tratamentos. O tratamento com 50% apresenta um CV% extremamente elevado, próximo a 90%, indicando grande dispersão dos valores em relação à média e, conseqüentemente, baixa consistência nos resultados obtidos. Em contrapartida, os tratamentos com 25%, 75% e 100% apresentam coeficientes significativamente menores, abaixo de 20%, o que sugere maior homogeneidade e reprodutibilidade dos dados nestas proporções. O alto CV% observado no tratamento de 50% pode estar relacionado a uma composição crítica do material, na qual a interação entre os componentes resulta em comportamento instável frente à absorção de umidade. Esses achados reforçam a importância do coeficiente de variação como um indicador robusto para a avaliação da confiabilidade dos dados experimentais em estudos com materiais compósitos.

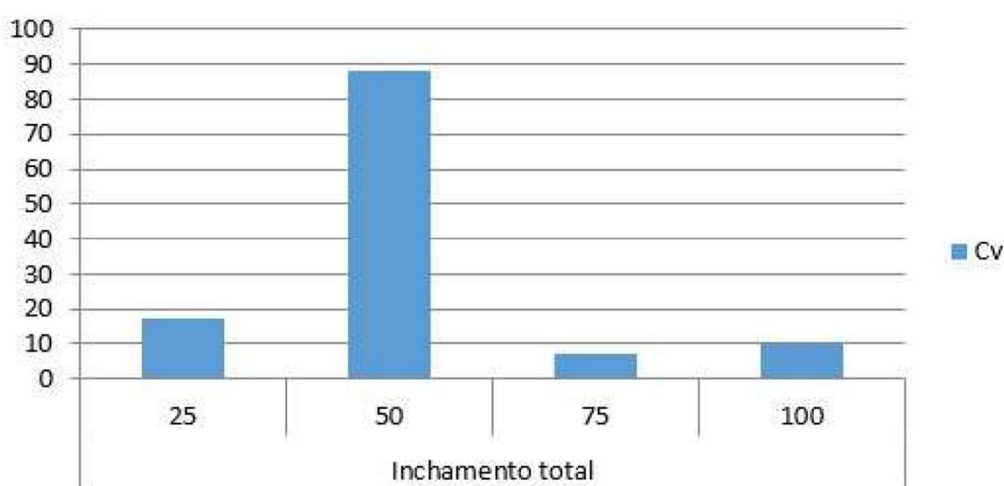


Figura 35. Inchamento Total (CV%).

A análise do gráfico (Figura 36) do coeficiente de variação (CV%) da retração total revela uma variação considerável na homogeneidade dos dados ao longo dos diferentes teores representados no eixo x (25, 50, 75 e 100). Observa-se que menor valor de CV% (536%) ocorre na concentração de 100, indicando maior consistência e menor dispersão dos dados nesse ponto.

Em contraste, os teores de 50 (17.16%) e 75 (19.90%) apresentaram os maiores coeficientes de variação, sugerindo maior variabilidade entre as amostras. O valor intermediário de 8,25% em 25 também indica uma razoável homogeneidade. Esses resultados apontam que a maior estabilidade na retração total foi alcançada com a substituição total (100%). enquanto níveis parciais de substituição demonstraram maior instabilidade nos resultados.

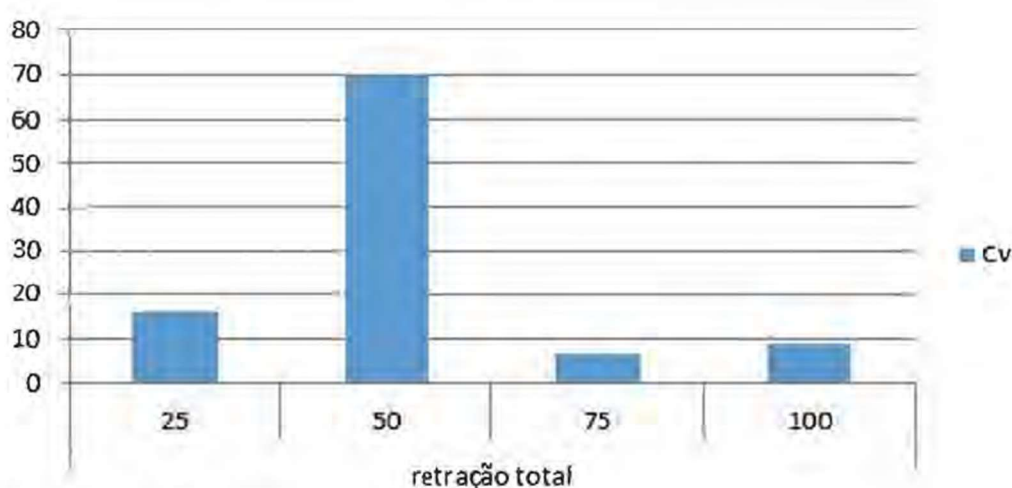


Figura 36. Retração total (CV em porcentagem).

Os painéis particulados produzidos com diferentes proporções de resíduos da casca de noz de macadâmia e partículas de madeira apresentaram variações significativas em suas propriedades físicas e mecânicas. Tais resultados estão em consonância com os achados de Ferreira (2013), que avaliou a substituição da madeira por casca de macadâmia em teores crescentes (0 %, 30 %, 60 % e 100 %) e identificou uma acentuada redução no módulo de ruptura (MOR), módulo de elasticidade (MOE) e resistência à tração perpendicular à Face a partir de 30 % de substituição. A geometria irregular da casca, sua elevada dureza e baixa capacidade de ligação foram apontadas como fatores que prejudicam a eficiência do adesivo.

No presente estudo, verificou-se também que o aumento da proporção de casca nos compósitos resultou em maior absorção de água e inchamento em espessura. Esse comportamento está alinhado com o observado por Mirindi et al. (2021), que avaliaram painéis fabricados com casca de macadâmia e goma arábica, destacando que os teores mais altos de resina (50 %) reduziram significativamente a absorção de umidade e melhoraram as propriedades mecânicas. Apesar disso, a higroscopicidade elevada dos painéis com maior proporção de casca permanece como desafio técnico, especialmente para aplicações em ambientes úmidos.

Por outro lado, o uso de adesivo vegetal à base de óleo de mamona demonstrou efeito positivo na estabilidade dimensional dos painéis. A literatura corrobora essa tendência: revisões como a de Mirindi et al. (2021) indicam que bioadesivos como o de mamona, quando bem formulados, podem reduzir significativamente a absorção de água sem comprometer a resistência. Além disso, são livres de formaldeído, o que representa um avanço ambiental em relação aos adesivos sintéticos convencionais.

A densidade aparente dos painéis produzidos manteve-se dentro da faixa recomendada para painéis de média densidade (600 - 850 kg/m³), resultado comparável ao obtido por Mirindi et al. (2021) em painéis produzidos com casca de macadâmia e goma arábica. Esse comportamento demonstra que, apesar da estrutura densa da casca, é possível manter um perfil

físico adequado para aplicações estruturais, desde que o processo de prensagem e formulação do adesivo sejam otimizados.

Do ponto de vista ambiental, a substituição de adesivos sintéticos por bioadesivos é uma estratégia alinhada com as demandas de sustentabilidade da indústria de painéis.

Estudos como o de Sotande et al. (2012) já haviam apontado o potencial de adesivos naturais para reduzir impactos ambientais e melhorar a biodegradabilidade dos produtos finais.

Por fim, destaca-se que a incorporação de fibras vegetais (como sisal, juta ou linho) aos compósitos com casca de macadâmia representa uma estratégia viável para reforço mecânico, conforme observado em estudos recentes como o de Bourmaud et al. (2019), que demonstraram melhora significativa nas propriedades estruturais e estabilidade dimensional em compósitos híbridos.

Assim, os resultados obtidos neste estudo confirmam a viabilidade técnica da utilização dos resíduos da noz de macadâmia para a produção de painéis particulados ecológicos. Contudo, ressalta-se a importância de ajustes na proporção de partículas, controle da umidade, escolha do bioadesivo e possíveis reforços fibrosos, a fim de se alcançar equilíbrio entre desempenho físico-mecânico e sustentabilidade.

3.3.4. Resultado das avaliações dos ensaios mecânicos

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios das propriedades mecânicas dos painéis particulados confeccionados com diferentes proporções de resíduos de casca de noz de macadâmia e partículas de madeira de seringueira (*Hevea brasiliensis*), utilizando como agente aglutinante um adesivo bicomponente à base de óleo de mamona. As análises compreenderam a determinação da resistência à flexão estática e dos respectivos módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR), conforme os procedimentos especificados na norma ABNT NBR 14810-3 (2018).

Parei aqui (capítulo 4)

Adicionalmente, foi realizada a avaliação da resistência à tração perpendicular às faces dos painéis, de acordo com as normas ABNT NBR 14810-3 (2018), ABNT NBR 7190 (1997) e ASTM D143-14 (2014), com o objetivo de assegurar a confiabilidade e a comparabilidade dos resultados frente aos parâmetros normativos estabelecidos.

3.3.5. Determinação da resistência à flexão e módulo de elasticidade

Os testes relacionados à determinação da resistência à flexão e do módulo de elasticidade possibilitaram a obtenção dos resultados apresentados.

- **Módulo de Elasticidade (MOE)**

O procedimento para a determinação da resistência à flexão e do módulo de elasticidade, conforme as diretrizes estabelecidas pela NBR 14810-2/2013, especifica que o comprimento dos corpos de prova deve ser equivalente a 20 vezes a espessura da peça, com um comprimento mínimo de 100 mm. Esta configuração visa assegurar que o ponto de aplicação da carga coincida com o centro do corpo de prova. Além disso, os cilindros utilizados para a aplicação de carga e apoio devem apresentar diâmetro de 30 mm, com uma tolerância de ± 5 mm. A carga aplicada deve ser incremental e progressiva. Todos esses critérios foram rigorosamente cumpridos durante o procedimento.

3.3.6. Módulo de Ruptura – MOR

Os resultados do ensaio de flexão estática conforme a norma ASTM D 143, realizado em painéis com diferentes proporções de resíduo da casca de noz de macadâmia. A seguir, são apresentados os valores médios de Módulo de Ruptura (MOR) e Módulo de Elasticidade (MOE).

Tratamento	MOR (MPa)	MOE (GPa)
25%	7.83	1.57
50%	8.58	1.72
75%	8.92	1.78
100%	8.95	1.78

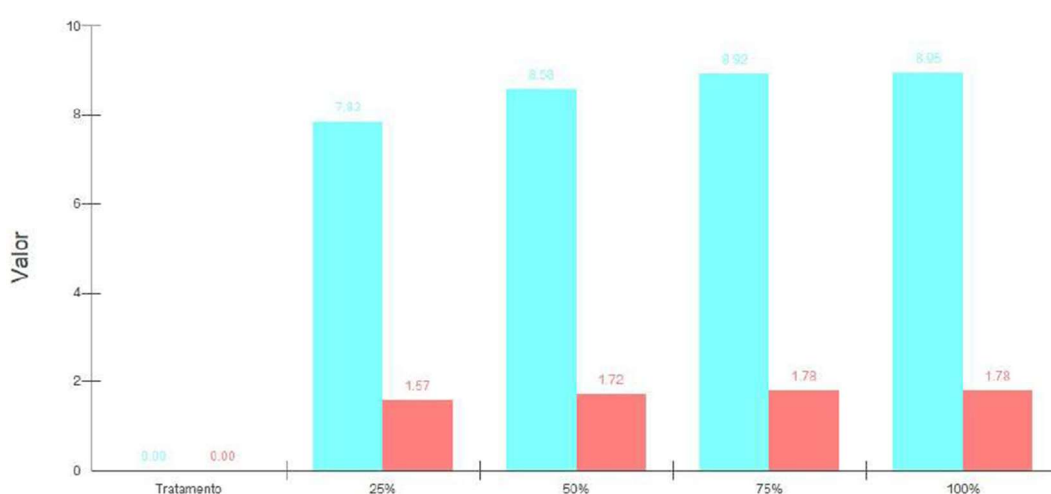


Figura 37. Módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) por tratamento

A análise demonstra que o aumento da proporção de resíduo de noz de macadâmia resultou em melhorias nos parâmetros mecânicos dos painéis. O tratamento com 100% de resíduo apresentou o melhor desempenho, com MOR médio de 8.95 MPa e MOE de 1.78 GPa, indicando boa viabilidade técnica do material desenvolvido.

3.3.7 Determinação da resistência a tração perpendicular

Com base nos dados dos ensaios de tração perpendicular à face (também conhecidos como ensaios de tração perpendicular à camada) realizados conforme a norma ASTM D 143 e, conforme a NBR 7190, com diferentes proporções, totalizando 83 amostras avaliadas. A Tabela 14 apresenta a faixa de resistência obtida, a média estimada e observações gerais para cada grupo.

Tabela 14. Desempenho mecânico em tração perpendicular à face: faixa, média e observações.

Trat	Faixa (MPa)	Média estimada (visual)	Observações
100%	25,10 – 26,37	-25,9	Desempenho mais alto
75%	25,45 – 26,11	-25,8	Similar ao grupo 100
50%	25,65 – 26,32	-25,9	Estável, mas com leve queda
25%	24,43 – 26,11	-25,4	Maior variação e menor resistência

As tensões de ruptura variaram entre 24,43 e 26,37 MPa. Os tratamentos com 100%, 75% e 50% apresentaram médias muito próximas ($\approx 25,8$ -25,9 MPa), evidenciando desempenho semelhante e estável. Já o grupo com 25% apresentou maior dispersão dos resultados e a menor média (-25,4 MPa), o que indica redução da resistência e maior variabilidade estrutural, sugerindo que a diminuição mais acentuada da proporção compromete a homogeneidade e o desempenho do material, ainda que as diferenças absolutas entre médias sejam relativamente pequenas.

3.3.8. Influência da proporção de materiais

Tratamentos com as proporções 100%, 75% e 50% mantêm resistência de tração perpendicular próximas, com médias entre 25,7 e 26,3 MPa, dentro de uma faixa considerada boa para painéis estruturais leves. O Tratamento 25 % apresenta queda visível na resistência, com amostras abaixo de 25 MPa, o que indica que a redução do material lignocelulósicos principal ou do adesivo compromete a integridade coesiva do painel.

Conformidade com as normas

A ASTM D 143 não especifica um valor mínimo aceitável para a tração perpendicular, pois isso depende da madeira e aplicação. Porém, em painéis, valores superiores a 0,3 MPa (30 kgf/cm² ou 29,42 MPa) são geralmente desejáveis em aplicações estruturais. Os valores aqui giram em torno de 25-26 MPa, o que indica bom desempenho, embora um pouco abaixo do ideal estrutural rígido, mas satisfatório para usos leves ou semiflexíveis.

A NBR 7190, para madeiras estruturais tropicais, adota valores de referência na faixa de 0,3 a 03 MPa para tração perpendicular, o que em MPa absolutos daria 30 a 50 MPa - os valores aqui não atingem esse limite, o que sugere limitação para uso estrutural pleno, embora aceitos para compósitos ou uso secundário.

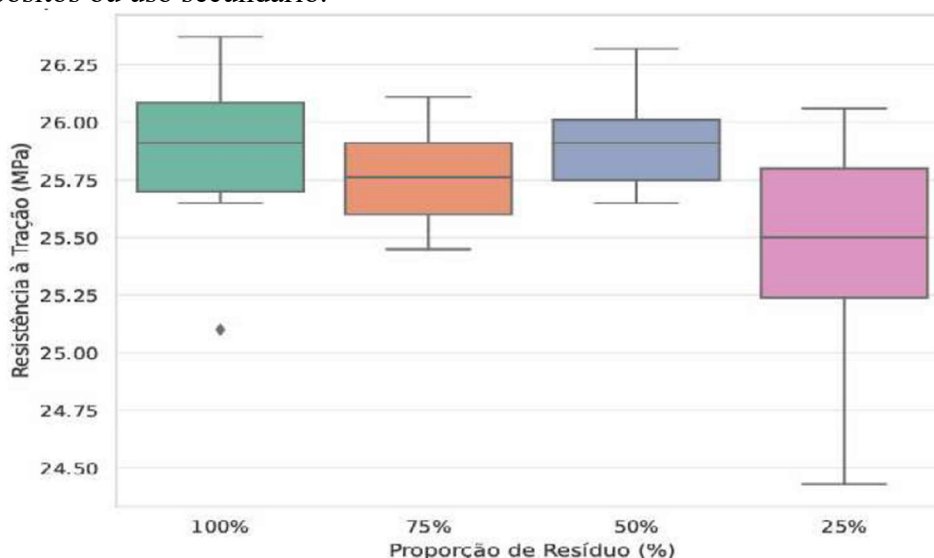


Figura 38. Distribuição da Tração Perpendicular por Grupo

Análise Estatística: ANOVA e Teste de Tukey - Ensaios de Tração Perpendicular ANOVA (Análise de Variância)

Fonte	Soma dos Quadrados	GL	F	Valor-p
Grupo	2.4751	3	9.52	<0.0001
Resíduo	6.8492	79	-	-

O valor de $p < 0.0001$ indica que há diferenças estatisticamente significativas entre pelo menos dois dos grupos testados (25%, 50%, 75% e 100%) quanto à resistência à tração perpendicular. Esse resultado confirma que ao menos um dos grupos apresenta média significativamente diferente dos demais.

Teste de Tukey ($\alpha = 0,05$)

Comparações múltiplas para identificar quais grupos diferem entre si:

Grupo 1	Grupo 2	Diferença de Médias	p-valor	Intervalo de Confiança (95%)	Diferença Significativa?
100%	25%	0.632	0.000	[0.27, 1,00]	Sim
100%	50%	0.198	0.340	[-0.15, 0.541]	Não
100%	75%	0.186	0.382	[-0.17, 0.53]	Não
25%	50%	-0.434	0.004	[-0.77, -0.101]	Sim
25%	75%	-0.446	0.003	[-0.78, -0.11]	Sim
50%	75%	-0.012	0.999	[-0.34, 0.32]	Não

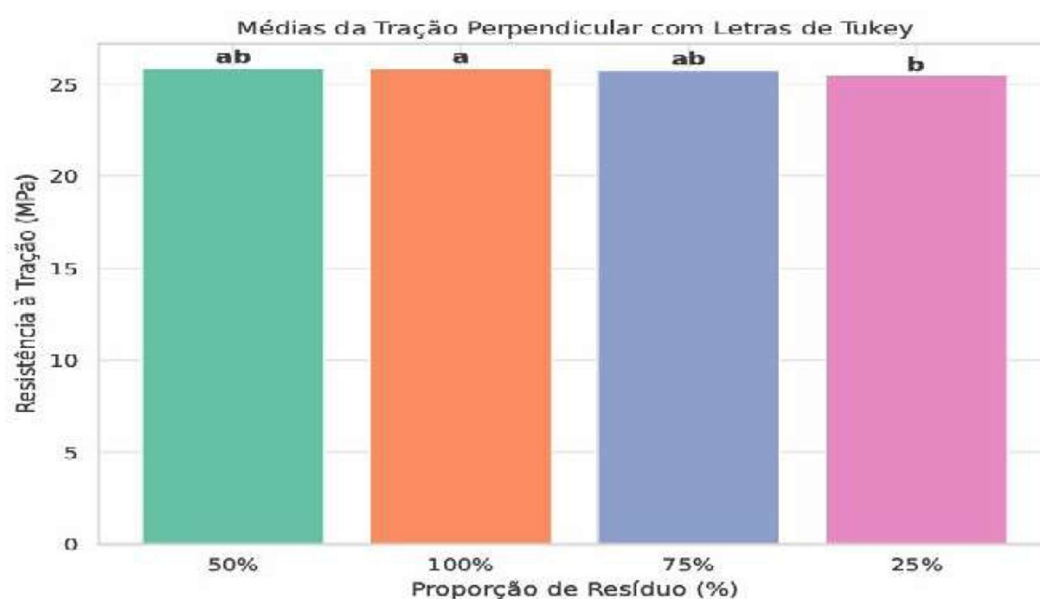


Figura 39. Médias da tração perpendicular com letras de Tukey

O tratamento com proporção 25% apresenta resistência significativamente menor em comparação aos tratamentos com proporções 50%, 75% e 100%. Não houve diferença significativa entre os grupos 50%, 75% e 100%. Isso sugere que a redução para 25% de resíduo afeta negativamente a resistência à tração perpendicular, mas as demais proporções são estatisticamente similares entre si.

4. CONCLUSÕES

Essa abordagem não apenas reduz o desperdício de recursos naturais, mas também fortalece a transição para práticas produtivas mais sustentáveis, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU, 2018).

Algumas combinações de resíduos podem promover diferenças no tempo de degradação em razão do tipo, quantidade e compatibilidade de reforço e matriz. Bastos (2022),

Além disso, a aplicação desses materiais em setores como a agricultura e a manufatura contribui para a disseminação de tecnologias de baixo impacto ambiental, promovendo uma integração eficaz entre inovação tecnológica e responsabilidade ambiental. A economia circular, que busca minimizar a produção de resíduos e preservar a utilidade dos materiais, desempenha um papel crucial na realização desses objetivos.

Os tubetes desenvolvidos destacam-se como uma alternativa viável para o reaproveitamento de resíduos agroindustriais. São confeccionados a partir de resíduos vegetais de fácil obtenção, biopolímeros (resina de mamona) e flocos de papel reciclado, bem como utilizando fécula de mandioca, livres de plásticos sintéticos e com capacidade de biodegradação. Esse processo não só contribui para a sustentabilidade ambiental, mas também promove o uso eficiente de recursos renováveis, ressaltando a importância da inovação no manejo de resíduos e na produção de materiais ecologicamente corretos.

Partículas lignocelulósicas de alta densidade, como a casca (endocarpo) da noz-macadâmia, possuem uma excelente capacidade de absorção de água. Isso pode facilitar tanto o tempo de permanência no viveiro quanto o processo de biodegradação. Ademais, essa característica preserva a resistência estrutural e mecânica das partículas, especialmente em formulações que utilizam 100% deste material como reforço, assegurando a viabilidade dos recipientes. Esse efeito positivo é especialmente notável na integridade física e durabilidade dos tubetes, tornando seu uso altamente recomendado na prática.

Com base nos resultados obtidos, verifica-se que todas as formulações dos tubetes apresentam potencial para biodegradação, ainda que em taxas diferenciadas, quando expostas às condições de irrigação contínua características de ambientes de viveiro. Contudo, persistem limitações de ordem técnica que demandam abordagens específicas para serem superadas. Nesse sentido, são imprescindíveis estudos adicionais que respaldem a viabilidade técnica e operacional do uso em larga escala dessas formulações, garantindo a estabilidade estrutural e o desempenho funcional dos tubetes ao longo do seu ciclo de vida.

Adicionalmente, é recomendável a realização de uma análise de viabilidade econômica, comparando os custos de produção em relação aos tubetes convencionais, com o objetivo de identificar oportunidades de otimização nos processos produtivos. Também se faz necessária a avaliação de parâmetros como durabilidade, tempo de degradação sob diferentes condições ambientais, potencial de reutilização, viabilidade do plantio direto no solo sem a necessidade de remoção do tubete e os efeitos dessas formulações na sobrevivência e no desenvolvimento das mudas pós plantio.

Materiais biodegradáveis, como os painéis aglomerados de partículas, têm um papel estratégico na mitigação dos impactos ambientais, uma vez que são desenvolvidos para sofrer decomposição natural por meio da atividade microbiológica, reduzindo a geração de resíduos sólidos e favorecendo práticas sustentáveis em diversos segmentos industriais.

Diante dos resultados obtidos, é possível concluir que a proporção dos materiais utilizados na formulação dos painéis exerce influência significativa sobre a estabilidade dimensional dos compósitos. Os tratamentos com 25%, 75% e 100% apresentaram baixos valores de desvio padrão e coeficiente de variação (CV) tanto para o inchamento total quanto para a retração total, indicando maior homogeneidade e reprodutibilidade dos dados. Em

contrapartida, o tratamento com 50% destacou-se por apresentar os maiores valores de variabilidade, com CVs superiores a 85% para o inchamento total e para a retração total, evidenciando um comportamento instável e pouco confiável para aplicações que exigem desempenho dimensional consistente.

Os principais parâmetros normativos estabelecidos para painéis particulados, conforme a norma ABNT NBR 14810-3:2018 (para painéis de partículas de média densidade - MDP), com complementos indicativos das normas ABNT NBR 7190:1997 e ASDM D143-14, no caso de ensaios específicos como tração perpendicular, podem ser vistos na tabela 15.

Tabela 15. Parâmetros normativos para painéis particulados (MDP).

Propriedade Mecânica	Unidade	Requisito mínimo	Norma de Referência	Observações
Densidade aparente	kg/m ³	650 a 750	ABNT NBR 14810-3:2018	Faixa recomendada para painéis MDP
Resistência à flexão (MOR)	MPa	≥11 (uso geral)	ABNT NBR 14810-3:2018	Para aplicação em ambientes secos
Módulo de elasticidade(MOE)	MPa	≥1600	ABNT NBR 14810-3:2018	Para painéis com 15 mm de espessura
Resistência à tração perpendicular as faces	MPa	≥0,40	ABNT NBR 14810-3:2018 ASTM D1037 NBR 7190	ASTM D143-14 também pode ser utilizada para madeiras e derivados
Inchamento em espessura (24h)	%	≤18	ABNT NBR 14810-3:2018	Após imersão em água por 24 horas
Umidade do painel	%	5 a 13	ABNT 14810-3:2018 NBR	Faixa aceitável após prensagem e condicionamento

Esses resultados sugerem que proporções intermediárias de resíduo podem comprometer a integridade dos painéis, possivelmente devido a uma interação inadequada entre os componentes OU à formação de estruturas internas menos coesas. Assim, a análise do coeficiente de variação revela-se uma ferramenta essencial para a avaliação da qualidade e do desempenho dos materiais, reforçando a importância de selecionar proporções que garantam maior estabilidade dimensional na produção de painéis sustentáveis à base de resíduos lignocelulósicos.

Com base nos resultados obtidos quanto às propriedades físicas, esta pesquisa demonstrou que os painéis produzidos a partir de resíduos da casca da noz de macadâmia, associados a partículas de madeira de seringueira (*Hevea brasiliensis*) e adesivo bicomponente à base de resina de mamona, para aplicação em escala comercial. Sugere-se que sejam feitos trabalhos futuros e a realização de novos ensaios para determinação de propriedades físicas e mecânicas com variados parâmetros.

Os resultados demonstram comportamento coeso e bom desempenho mecânico até a formulação com 50% do componente principal. Amostras com apenas 25% já indicam perda de resistência significativa, tornando-se menos recomendáveis para aplicações que exijam resistência à delaminação ou coesão em colagem. Recomenda-se o uso de composições entre 50% e 100% para garantir resistência mínima conforme critérios de qualidade para uso em painéis ou mobiliário. Para uso estrutural, os valores são aceitáveis em contextos não críticos, mas podem estar abaixo dos exigidos pela NBR 7190 em alguns casos.

Esses resultados confirmam que a proporção de 75% representa uma condição de equilíbrio ideal entre o teor de resíduo da casca e a resina de mamona, resultando em melhor desempenho mecânico sem comprometer a integridade do painel. A similaridade estatística entre os tratamentos de 75% e 100% sugere que teores mais altos de resíduo podem ser viáveis, desde que observadas condições adequadas de prensagem e formulação do adesivo.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). NBR 7190: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.
- ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). NBR 11941:2003 - Madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). NBR 14660:2004 - Madeira - Amostragem e preparação para análise. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). NBR 14810-2:2013 - Painéis de partículas de média densidade - Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- AGROMANIA. Kit Tubete 135mm x 64mm 175cm³ 1000 unidades. Piracicaba: Agromania, [s.d.]. Disponível em: <https://www.agromania.com.br/kit-tubete-135mm-x-64mm-175cm3-1000-unidades>. Acesso em: 31 ago. 2025.
- ASHJARI, H.R.; DORRAJI, M.S.S.; FAKHRZADEH, V.; ESLAMI, H.; RASOULIFARD, M.H.; RASTGOUY-HOUJAGHAN, M.; GHOLIZADEH, P.; KAFIL, H.S.; Starch-based polyurethane/CuO nanocomposite foam: Antibacterial effects for infection control. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 111. p. 1076-1082.9 2018. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.01.137>. Acesso em: 13 de out.2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14810-3: Painéis de madeira - Requisitos para painéis de madeira compensada - Parte 3: Especificações para painéis de madeira compensada com resistência estrutural. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14810-3: Painéis de madeira - Requisitos para painéis de madeira compensada - Parte 3: Especificações para painéis de madeira compensada com resistência estrutural. Rio de Janeiro. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14810-3: Painéis de madeira - Requisitos para painéis de madeira compensada - Parte 3: Especificações para painéis de madeira compensada com resistência estrutural. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D143-14: Standard test methods for small clear specimens of timber**. West Conshohocken: ASTM International, 2014.
- BAE, J-S; SU, S. Compósitos de carbono derivados da casca da noz de macadâmia para captura de CO₂ pós-combustão. **Revista Internacional de Controle de Gases de Efeito Estufa**, v. 19, p. 174-182,2013.
- BALIEIRO, L. C. S. **Revalorização dos resíduos provenientes da casca de noz da macadâmia como enchimento em compósitos de poliuretano derivado do óleo de mamona**. 2023. 83 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Engenharia, Rio de Janeiro, 2023.

BASTOS, C. R. Tubetes biodegradáveis e compostáveis produzidos a partir de resíduos agroindustriais. BR 10 2020 013631 3 A2. Brasília: INPI, 11 jan. 2022. Disponível em: <https://busca.inpi.gov.br/pePl/servlet/PatenteServletController?Action=detail&CodPed=BR1020200136313>. Acesso em: 1 set. 2025.

BERUK, A. B.; ABEL, W. O.; ASSEFA, A. T.; SINTAYEHU, S. H.; Studies on Ethiopian castor seed (*Ricinus communis* L.): extraction and characterization of seed oil. *Journal of Natural Production Resource*, v.4, p.188-190, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.30799/jnpr.064.18040204>. Acesso em: 06 de out. 2024.

BOROWICZ, M.; PACIOREK-SADOWSKA, J.; ISBRANDT, M. Synthesis and application of new bio-polyols based on mustard oil for the production of selected polyurethane materials. *Industrial Crops and Products*, v. 155, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112831>. Acesso em: 12 de out.2024.

BOURMAUD, A.; MÉROTTE, J.; SINISCALCO, D.; LE GALL, M.; GAGER, V.; LE DUGOU, A.; PIERRE, F.; BEHLOULI, K.; ARNOULD, O.; BEAUGRAND, J.; BALEY, C. Main criteria of sustainable natural fibre for efficient unidirectional biocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 124, p. 105504, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105504>.

BRASIL. Lei nº 12305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 08 de nov. 2024.

DAS, S.; KUMAR, S.; MOHANTY, S.; NAYAK, S. K. Synthesis, characterization and application of bio-based polyurethane nanocomposites. In: INAMUDDIN; THOMAS, S.; KUMAR MISHRA, R.; ASIRI, A. (Ed.). **Sustainable polymer composites and nanocomposites**. Cham: Springer, 2019. p. 1097-1125. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-05399-4-39>. Acesso em: 14 ago. 2025.

DE OLIVEIRA, B.P.; BALIEIRO, L.C.S.; MAIA, L.S.; ZANINI N.C.; TEIXEIRA, E.J.O.; CONCEIÇÃO, M.O.T.; MEDEIROS, S.F.; MULINARI, D.R.; Ecofriendly polyurethane foams based on castor polyol reinforced with açaí residues for Building insulation. *Journal of Material Cycles Waste Management*, v.24, p.553-568, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01341-1>. Acesso em: 08.out.2024.

EUFRATE JUNIOR, H. J.; OHTO, J. M.; SILVA, L. L.; PALMA, H. A. L.; BALLARIN, A. W. Potential of rubberwood (*Hevea brasiliensis*) for structural use after the period of latex extraction: a case study in Brazil. **Journal of Wood Science**, v. 61, p. 384-390, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10086-015-1478-7>. Acesso em: 14 ago. 2025.

FELIX, J.; ISELLA, F.; BOSETTI, O.; NERÍN, C. Analytical tools for identification of non-intentionally added substances (NIAS) coming from polyurethane adhesives in multilayer packaging materials and their migration into food simulants. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, v. 403, p. 2869-2882, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00216-012-5965-z>.

FERREIRA, B. S. Propriedades físico-mecânicas de painéis particulados de *Eucalyptus saligna* e casca de noz macadâmia. 2013. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2013.

GANDARA, M.; MULINARI, DR.; MONTICELL, FM., CAPRI, M.R. Sugarcane Bagasse Fibers Reinforced in Polyurethane for Sorption of Vegetal Oil. Journal of Natural Fibers, p. 1-12, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/115440478.2019.1710653>. Acesso em: 15 de out. 2024.

GANG, H. LEE, D.; CHOL K.-Y.; KIM, H.-N.; RYU, H. LEE, D.-S.; KIM, B.-G. Development of high-performance polyurethane elastomers using vanillin-based green polyol chain extender originating from lignocellulosic biomass. ACS Sustainable Chem. Eng., v.5, p.582-4588, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b02960>. Acesso em: 13 de out.2024.

GURUNATHAN, T.; MOHANTY, S.; NAYAK, S.K. Isocyanate terminated castor oil-based polyurethane prepolymer: Synthesis and characterization. Progress in Organic Coatings, v.80, p.39-48, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2014.11.017>. Acesso em: 13 de out.2024.

GUTIÉRREZ-FERNÁNDEZ, G. A.; BISCHOFF, W.-A.; RICKER, M.; SIEBE, C. Co-composting of biochar and nitrogen-poor organic residues: nitrogen losses and fate of polycyclic aromatic hydrocarbons. Waste Management, v. 143, p. 84-94, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.02.025>. Acesso em: 14 ago. 2025.

KARAHAN, S.; GULER, C. Some physical and mechanical properties of particle boards produced from industrial wood chips and Scots pine (*Pinus sylvestris*) cones. **Maderas, Ciencia y Tecnología**, v. 27, 2025.

KHALIL, A.; CHONG, E.; OWOLABI, F.; Enhancement of basic properties of polysaccharide based composites with organic and inorganic fillers: a review. J Appl Polym Sci. v.136, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/app.47251>. Acesso em 17 de set. 2024.

LEE, J.H.; KIM, S.M. OH, K.W. Bio-Based Polyurethane Foams with Castor Oil Based Multifunctional Polyols for improved Compressive Properties. Polymers v. 13, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym13040576>. Acesso em 13 de out.2024.

LEE, J.H.; PARK, S.H.; KIM, S.H.; Fabrication of bio-based polyurethane nanofibers incorporated with a triclosan/cyclodextrin complex for antibacterial applications. RSC Advances, v.10, p. 3450-3458, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/C9RA06992E>. Acesso em: 13 de out. 2024.

LIANG, D.; ZHANG, Q.; ZHANG, W.; LIU, L.; LIANG, H.; QUIRINO, R.L.; CHEN, J.; LIU, M.; LU, Q.; ZHANG, C.; Tunable thermo-physical performance of castor oil-based polyurethanes with tailored release of coated fertilizers. J. Clean. Prod. p. 1207-1215, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.047>. Acesso em: 13 de out.2024.

LIMA, I. L.; BERGAMO, R.; BERMUDEZ, K. R.; MORAES, M. L. T.; GARCIA, J. N. Caracterização das propriedades mecânicas da madeira de clones de *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A.DC.). Scientia Forestalis, v. 48, n. 125, p. e2877, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.18671/scifbr.v48n125.04>.

MADEIRA JR. IV.; CONTESINI, F.J.; CALZADO, F.; RUBIO, M.V.; ZUBIETA, M.R.; LOPES, D.B; Agro-industrial residues and microbial enzymes: an overview on the ecofriendly bioconversion into high value-added products. **Biotechnology of Microbial Enzymes**. p. 475-511, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803725-6.00018-2>. Acesso em 13 de out.2024.

MARTINS. L.S.; ZANINE, N.; PINHEIRO, L.; MULINARI, D.; Valorization of Banana Peel Waste Used as Filler in Castor Oil Polyurethane Foam for Vegetable Oil Sorption. *Journal Natural Fibers*, v. 19, p. 7806-781, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1958414>. Acesso em: 13 de ago.2024.

MIRINDI, D.; ONCHIRI, R. O.; THUO, J. Physico-mechanical properties of particleboards produced from macadamia nutshell and gum arabic. **Applied Sciences**, v. 11, n. 23, p. 11138, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app112311138>.

MUJBOFU, E. B.; Castor oil as a potential renewable resource for the production of functional materials. *Sustainable Chemical Processes*. v.4, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1186/s40508-016-0055-8>. Acesso em: 13 de out.2024.

ONU. PNUMA. Transformando nosso mundo: A agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. **Ambientalmente sustentável**, v. 25. n. 1, p. 171-190, 2018.

PANHWAR, T.; MAHESAR. S. A.; MAHESAR, A. W.; KANDHRO, A. A.; TALPLJR, F. N.; LAGHARI, Z. H.; CHANG, A. S.; HUSSAIN SHERAZI, S. T. Characteristics and composition of a high oil yielding castor variety from Pakistan. **Journal of Oleo Science**, v. 65, n. 6, p. 471-476, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5650/jos.ess15208>.

PARASKAR, P.M.; PRABHIDESEI, M.S.; HATKAR, V.M.; KULKARNI, R.D.; Vegetable oil. based polyurethane coatings - A sustainable approach: A review. **Progress in Organic Coatings**, v.156, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106267>. Acesso em: 19 de set.2024.

PEREIRA, A. C. O.; PÁDUA, F. A.; YAMAJI. K M Análise da influência da umidade do material na produção e resistência de briquetes. 6p. Anais... Cibio (Congresso Internacional de Biomassa, Curitiba / PR - Brasil, 2020. Disponível em: <https://doity.com.br/media/doity/suhmissoes/artigoh3d995h9d6h252h7hdee76cafc90461eae2deb08-arquivo.pdf>. Acesso em: out.2023.

ROWELL, R.; PETTERSEN, R.; HAN, J.; ROWELL, J.; TSHABALALA, M. Cell wall chemistry. In: ROWELL, R. M. (Ed.). *Handbook of wood chemistry and wood composites*. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2012.

SADHI, P. K.; DUHAN, S.; DUHAN, S.; Agro-industrial wastes and their utilization using solid state fermentation: a review. **Bioresour. Bioprocess**. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s40643-017-0187-z>. Acesso em: 13 de out.2024.

SAIR, S.; MANSOURI, S.; TANANE, O.; ABBOD, Y.; EL BOUARI, A. Alfa fiber-polyurethane composite as a thermal and acoustic insulation material for building applications. **SN Applied Sciences**, v. 1. p. 667, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0685-z>.

SAMAKSAMAN. U.; PATTARAPRAKORN, W.; NERAMITTAGAPONG, A.; KANCIANATIP, E. Solid fuel production from macadamia nut shell: effect of hydrothermal carbonization conditions on fuel characteristics. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 13, p. 2225-2232, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01330-2>.

SAYEED. M. M. A.; SAYEM, A. S. M.; HAIDER J. Opportunities with renewable jute fiber composites to reduce eco- impact of nonrenewable polymers. In: Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials. [S.l.]: Elsevier. 2020. v. 2, p. 810-821. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11583-8>.

SHAO, H.; ZHANG. Q.; LIU, H.; GUO, W.; JLANG, Y.; CHEN. L.; SHUPE, T. F: Renewable natural resources reinforced polyurethane foam for use of lightweight thermal insulation. *Materials Research Express*. v.7, 2020. Disponível em: <https://doi :10.1088/2053-1591/ah8d87>. Acesso em 13 de out.2024.

SOTANNDE, O. A.; OLUWADARE, A. O.; OGEDOH, O.; ADEOGUN, P. F. Evaluation of cenicient-bonded particle board produced from Afzelia africana wood residues. **Journal of Engineering Science and Technology**, v. 7. n. 6, p. 732-743, 2012.

TROVATI, O.; SUMAN, M. V. N.; SANCHES. E. A.; CAMPELO, P. H.; BESSAN NETO, R.; CLARO NETO. S.; TROVATI, L. R. Production and characterization of polyurethane castor oil (*Ricinus communis*) foam for nautical fender. **Polymer Testing**, v. 73, p. 87-93,2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.11.010>.

VENIL, C.K.; DEVI, P.R.; AHMAD, W.A. Agro-industrial waste as substrate for the production of bacterial pigment, in Valorization of Agro-industrial Residues. Springer. p.149-162. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-39137-9>. Acesso em 13 de out.2024.

YUSUF. A.; MAMZA, P.; AHMED, A.; AGUNWA, U.; Extraction and characterization of castor seed oil from wild *Ricinus communis* Linn. *International Journal of Science. Environment and Technology*. v.4, 2015.

ZANINI. N. C.; DE SOUZA, A. O.; BARBOSA, R. F. S.; ROSA, D. S.; MULINARI, D. R.; A novel hybrid polyurethane composites with ZnO particles and sheath palm residues: Synergistic effect. *Polymer Composites*, 2020. Disponível em: <https://doi:10.1002/pc.25845>. Acesso em 13 de out.2024.

ZHANG, Y.; LIU, B.; HUANG, K.; WANG, S.; QURINO, R. L.; ZHANG, Z.-X.; ZHANG, C. Eco-friendly castor oil-based delivery system with sustained pesticide release and enhanced retention. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v, 12, n. 33, p. 37607-37618, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsami.0c10620>.

6. CONCLUSÕES GERAIS

A presente tese evidenciou o potencial de valorização dos resíduos do beneficiamento da noz de macadâmia (*Macadamia integrifolia*) como recurso agroindustrial multifuncional, destacando suas aplicações nas áreas de biotecnologia vegetal, produção de substratos, alelopatia e desenvolvimento de materiais biodegradáveis. Os resultados demonstraram que o extrato metanólico obtido a partir desses resíduos é rico em compostos fenólicos, flavonoides, triterpenoides e alcaloides, apresentando expressiva capacidade antioxidante. Além disso, sua adição em meio de cultura mostrou-se promissora para o cultivo in vitro de *Adenanthera pavonina*, especialmente em baixas concentrações, o que abre possibilidades para sua utilização como bioestimulante natural.

A pesquisa também revelou um efeito alelopático significativo do extrato aquoso dos resíduos sobre a germinação de sementes de alface, indicando seu potencial uso como bioinibidor natural no manejo sustentável de plantas daninhas. No que se refere ao uso como substrato para germinação de sementes, os resíduos demonstraram desempenho compatível com materiais tradicionais, sendo uma alternativa economicamente viável e ambientalmente responsável. Esse reaproveitamento se insere no contexto da economia circular e da busca por práticas agrícolas sustentáveis, contribuindo para a redução de impactos ambientais associados ao descarte inadequado de resíduos agro industriais.

A aplicação desses resíduos na formulação de tubetes e painéis biodegradáveis reforça a viabilidade do seu uso na fabricação de materiais ecológicos, com destaque para a estabilidade dimensional de compósitos com proporções específicas de resíduo. A utilização da casca da noz de macadâmia, associada a biopolímeros e partículas de madeira, resultou em produtos com potencial para substituição de plásticos convencionais, promovendo o desenvolvimento de tecnologias de baixo impacto ambiental. Os resultados obtidos reforçam a importância da inovação no reaproveitamento de resíduos e indicam caminhos promissores para futuras pesquisas, incluindo estudos de viabilidade técnica e econômica, testes em escala comercial e análise de desempenho em condições reais de uso.

Dessa forma, conclui-se que os resíduos da noz de macadâmia representam uma alternativa sustentável e versátil, com grande potencial de aplicação nos setores agrícola, florestal e de materiais, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente no que se refere ao consumo e produção responsáveis, inovação e infraestrutura sustentável.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa teve como objetivo principal avaliar o potencial de aproveitamento dos resíduos do beneficiamento da noz da macadâmia (*Macadamia integrifolia*) em diferentes aplicações, com foco na sustentabilidade e na inovação tecnológica. As análises e experimentações realizadas ao longo dos quatro capítulos permitiram compreender, de maneira integrada, a viabilidade de uso desses resíduos nas áreas de biotecnologia vegetal, alelopatia, produção de substratos e desenvolvimento de materiais biodegradáveis.

Inicialmente, verificou-se que a extração com metanol resultou em maiores rendimentos de compostos bioativos dos resíduos, com destaque para substâncias fenólicas, flavonoides, triterpenoides e alcaloides. Tais compostos, identificados por meio de espectroscopia de FTIR, apresentaram relevante atividade antioxidante. Além disso, o extrato metanólico exerceu efeitos positivos no cultivo in vitro de *Adenanthera pavonina* quando utilizado em baixas concentrações, indicando seu potencial como aditivo de crescimento vegetal. Em contrapartida, concentrações elevadas do extrato resultaram em toxicidade e mortalidade das plântulas, demonstrando a necessidade de uso criterioso em aplicações biotecnológicas.

No que se refere ao estudo de alelopatia, constatou-se que o extrato aquoso do resíduo de noz de macadâmia apresentou forte inibição da germinação e da velocidade de desenvolvimento de sementes de alface em concentrações de 75% e 100%. Tal evidência sugere a aplicabilidade desses resíduos como bioinibidores naturais no manejo agroecológico de plantas daninhas, promovendo uma alternativa sustentável ao uso de herbicidas sintéticos.

Complementarmente, os resíduos foram testados como componentes de substratos alternativos para germinação, apresentando desempenho satisfatório e similar entre diferentes granulometrias. As análises indicaram que o resíduo oferece boas condições físicas e químicas, como retenção de água e aeração, constituindo-se em uma alternativa promissora aos substratos convencionais à base de turfa, vermiculita ou casca de arroz carbonizada. Essa substituição pode reduzir custos, promover a economia circular e diminuir a dependência de recursos no renováveis.

Ainda, foi possível desenvolver tubetes e painéis biodegradáveis a partir dos resíduos lignocelulósicos de macadâmia, em combinação com biopolímeros (resina de mamona), fécula de mandioca, flocos de papel reciclado e partículas de madeira de seringueira (*Hevea brasiliensis*). As formulações apresentaram capacidade de biodegradação, boa integridade estrutural e retenção hídrica, especialmente em composições com 25%, 75% e 100% de casca de macadâmia. Os resultados indicaram maior estabilidade dimensional nessas proporções, em contraste com a instabilidade observada no tratamento com 50%, que apresentou coeficientes de variação superiores a 85%.

O desenvolvimento de materiais alternativos livres de plásticos sintéticos reforça o alinhamento da pesquisa com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas, especialmente no que se refere à inovação responsável, à produção e ao consumo sustentáveis. Os painéis e tubetes demonstraram viabilidade para uso em viveiros, destacando-se como soluções ecológicas com potencial de aplicação em escala comercial.

Portanto, conclui-se que os resíduos do beneficiamento da noz da macadâmia constituem uma matéria-prima promissora para múltiplas aplicações sustentáveis. A pesquisa oferece subsídios relevantes para a promoção de tecnologias de baixo impacto ambiental, a redução da geração de resíduos e a valorização de subprodutos agroindustriais. Contudo, recomenda-se a realização de estudos complementares voltados à avaliação técnico-econômica, à durabilidade dos materiais sob diferentes condições ambientais e ao desempenho funcional dos produtos ao longo de seu ciclo de vida. Tais ações são essenciais para consolidar a aplicação prática das soluções propostas e ampliar seu alcance no contexto da bioeconomia e da sustentabilidade ambiental.

8. RECOMENDAÇÕES

Diante da relevância científica, técnica e ambiental apresentada nesta produção, recomenda-se fortemente a divulgação e continuidade das pesquisas envolvendo o aproveitamento dos resíduos do beneficiamento da noz de macadâmia (*Macadamia integrifolia*). Os resultados obtidos ao longo da investigação demonstram de forma consistente o potencial desses resíduos como insumo alternativo em diversas frentes de atuação, tais como: substratos agrícolas, aditivos bioativos em biotecnologia vegetal, agentes alelopáticos para manejo agroecológico, além da fabricação de materiais biodegradáveis aplicáveis ao setor florestal e industrial.

A pesquisa desenvolvida integra, de maneira inovadora, os princípios da sustentabilidade, da economia circular e da bioeconomia, contribuindo diretamente para o cumprimento de metas globais como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Nesse contexto, a originalidade da abordagem, aliada à robustez metodológica e à aplicabilidade prática dos resultados, confere à presente produção não apenas mérito científico, mas também relevância social e ambiental.

Recomenda-se, portanto, que os conhecimentos gerados por esta investigação sejam difundidos em periódicos científicos qualificados, apresentados em eventos acadêmicos e tecnológicos, bem como considerados por instituições públicas e privadas que atuam nas áreas de agricultura, silvicultura, inovação tecnológica e gestão de resíduos. Além disso, sugere-se o estímulo à continuidade dos estudos e o fomento à realização de parcerias interinstitucionais e com o setor produtivo, visando à aplicação em larga escala das soluções sustentáveis aqui propostas.