

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIAS - ICET
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA PARA
RECURSOS AMAZÔNICOS –
PPGCTRA

NOELLE CARNEIRO DE FIGUEIREDO

Síntese verde de nanopartículas metálicas mediadas por extratos de *Endopleura uchi* com potencial alelopático: investigando abordagens sustentáveis na agricultura

Linha de pesquisa 2: Prospecção química, biológica e desenvolvimento de substâncias bioativas.

Orientador: Prof. Dr. Paulo José de Sousa Maia
Coorientador: Prof. Ms. Joel dos Santos Batista

ITACOATIARA – AM

2026

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIAS - ICET
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA PARA
RECURSOS AMAZÔNICOS –
PPGCTRA

NOELLE CARNEIRO DE FIGUEIREDO

Síntese verde de nanopartículas metálicas mediadas por extratos de *Endopleura uchi* com potencial alelopático: investigando abordagens sustentáveis na agricultura

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia para Recursos Amazônicos da Universidade Federal do Amazonas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia para Recursos Amazônicos.

Orientador: Prof. Dr. Paulo José de Sousa Maia
Coorientador: Prof. Ms. Joel dos Santos Batista

ITACOATIARA-AM

2026

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

-
- F475s Figueiredo, Noelle Carneiro de
Síntese verde de nanopartículas metálicas mediadas por extratos de
Endopleura uchi com potencial alelopático: investigando abordagens
sustentáveis na agricultura / Noelle Carneiro de Figueiredo. - 2026.
100 f. : il., color. ; 31 cm.
- Orientador(a): Paulo José de Sousa Maia.
Coorientador(a): Joel dos Santos Batista.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa
de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia para Recursos Amazônicos,
Itacoatiara-AM, 2026.
1. Síntese verde. 2. Nanopartículas de prata. 3. Endopleura uchi (uxi
amarelo). 4. Alelopatia. 5. Germinação. I. Maia, Paulo José de Sousa. II.
Batista, Joel dos Santos. III. Universidade Federal do Amazonas. Programa
de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia para Recursos Amazônicos.
IV. Título
-



Poder Executivo
Ministério da Educação
Universidade Federal do Amazonas
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia
para Recursos Amazônicos - PPGCTRA



Noelle Carneiro de Figueiredo

**Síntese Verde de Nanopartículas Metálicas
Mediadas por extratos de *Endopleura uchi*
com potencial alelopático: Investigando
Abordagens Sustentáveis na Agricultura**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia para Recursos Amazônicos da Universidade Federal do Amazonas, como parte do requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia para Recursos Amazônicos, área de concentração Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Recursos Amazônicos.

Aprovado(a) em 27.05.26.

Documento assinado digitalmente
PAULO JOSE DE SOUSA MAIA
Data: 28/05/2026 23:27:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo José de Sousa Maia (Presidente e Orientador)

Documento assinado digitalmente
PAULA JULIANE BARBOSA DE OLIVEIRA
Data: 27/05/2026 18:09:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Paula Juliane Barbosa de Oliveira (Compostec LTDA)

Documento assinado digitalmente
IVALDO GOMES PEREIRA FILHO
Data: 27/05/2026 23:09:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Nivaldo Gomes Pereira Filho (USP,

Rua Nossa Senhora do Rosário, 3863, Tiradentes. CEP: 69103-128 – Itacoatiara/AM

Telefone: (92) 99271-8661 e-mail: secretariappgctra@ufam.edu.br

**“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor,
mas lutei para que o melhor fosse feito.
Não sou o que deveria ser,
mas graças a Deus,
não sou o que era antes.”**

(Marthin Luther King)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado saúde, força e serenidade para superar as dificuldades e por ter iluminado meu caminho ao longo desta jornada.

Agradeço especialmente ao Prof. Dr. Paulo José de Sousa Maia, meu orientador, pela confiança, pelo incentivo e pelas contribuições que foram determinantes para a realização deste trabalho. Agradeço também ao meu coorientador, Prof. MSc. Joel dos Santos Batista, pelas correções e orientações, e à professora Sanderleia de Oliveira dos Santos, que não mediu esforços para contribuir com seus conhecimentos durante o desenvolvimento da pesquisa.

Aos meus pais, Oscar Soares de Figueiredo e Maria Gely Jacquiminouth Carneiro, agradeço pelos ensinamentos desde a infância, especialmente por me mostrarem que a conquista deve estar associada à honestidade, aos estudos, ao esforço e à dedicação, sem que as adversidades comprometam o caráter e a integridade.

Aos meus filhos, Manoella Figueiredo de Almeida e Kauã Lucas Figueiredo Neves, agradeço por me inspirarem a ser melhor todos os dias, por serem minha maior motivação e pela compreensão diante dos muitos momentos de ausência necessários para a dedicação ao mestrado. Ao meu bem, Abner Andrade Cavalcante, pelo apoio, incentivo e companheirismo. Este resultado também é por vocês e para vocês.

Agradeço aos companheiros desta jornada, Alef Nunes da Silva Torres e Fabiana Silva de Souza, pela amizade verdadeira, pelo apoio e pela parceria construída ao longo do curso. Agradeço, em especial, a Mateus Feitosa Santos, pelas contribuições na realização dos experimentos, pelo suporte sempre que necessário e pelo incentivo constante. Ter vocês ao meu lado foi fundamental para meu crescimento e para minha confiança durante o processo.

Aos professores membros da banca examinadora, agradeço pela disponibilidade, pela leitura cuidadosa e pelas contribuições que auxiliaram no aprimoramento deste trabalho.

Agradeço aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia para Recursos Amazônicos (PPGCTRA/UFAM) pelo ensino, apoio e colaboração. Agradeço também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) pelo apoio institucional.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

O uso intensivo de agrotóxicos na agricultura tem ampliado a necessidade de estratégias mais sustentáveis para o manejo vegetal e para a redução de impactos ambientais. Nesse contexto, a síntese verde de nanopartículas metálicas mediada por extratos vegetais constitui uma alternativa promissora, pois permite empregar metabólitos secundários como agentes redutores e estabilizantes em meio aquoso. Este trabalho teve como objetivo sintetizar nanopartículas de prata (AgNPs) mediadas por extrato aquoso do caule de *Endopleura uchi* e avaliar seu potencial alelopático em espécies de interesse agrônomo. A pesquisa envolveu o preparo do extrato vegetal, a avaliação de sua estabilidade por espectroscopia UV-Vis, a prospecção fitoquímica, a produção e o monitoramento da estabilidade das AgNPs e a análise da atividade alelopática. O extrato apresentou estabilidade espectroscópica por até dois dias após o preparo e revelou a presença de classes de metabólitos secundários relevantes, como compostos fenólicos, flavonoides, taninos, terpenos, saponinas e alcaloides. Na síntese das AgNPs, a condição pH 8,0, 30 °C e concentração de extrato de 1,0% apresentou os maiores valores médios de absorbância e melhor estabilidade ao longo de oito dias. A ANOVA tipo III com correção robusta para heterocedasticidade indicou que a concentração do extrato foi a principal fonte de variação do sistema, seguida pelo efeito do pH, enquanto a temperatura não apresentou efeito relevante dentro da faixa investigada. Nos bioensaios de germinação, o coentro manteve elevada porcentagem final de germinação em todos os tratamentos, sem diferenças significativas, enquanto a melancia apresentou respostas mais sensíveis, especialmente em parâmetros temporais. Os resultados indicam que o extrato de *E. uchi* e as AgNPs obtidas por síntese verde modulam a germinação de modo espécie-dependente, reforçando o potencial da nanotecnologia verde como ferramenta de investigação para aplicações agrícolas sustentáveis.

Palavras-chave: síntese verde; nanopartículas de prata; *Endopleura uchi*; alelopatia; germinação.

ABSTRACT

The intensive use of pesticides in agriculture has increased the demand for more sustainable strategies for plant management and for reducing environmental impacts. In this context, the green synthesis of metallic nanoparticles mediated by plant extracts is a promising alternative, as secondary metabolites can act as reducing and stabilizing agents in aqueous media. This study aimed to synthesize silver nanoparticles (AgNPs) mediated by an aqueous stem extract of *Endopleura uchi* and to evaluate their allelopathic potential in species of agronomic interest. The research included preparation of the plant extract, assessment of its stability by UV-Vis spectroscopy, phytochemical screening, production and stability monitoring of AgNPs, and evaluation of allelopathic activity. The extract showed spectroscopic stability for up to two days after preparation and contained relevant classes of secondary metabolites, including phenolic compounds, flavonoids, tannins, terpenes, saponins, and alkaloids. For AgNP synthesis, the condition pH 8.0, 30 °C, and 1.0% extract concentration provided the highest mean absorbance values and better stability over eight days. Type III ANOVA with heteroscedasticity-consistent correction showed that extract concentration was the main source of variation in the system, followed by pH, whereas temperature had no relevant effect within the investigated range. In the germination bioassays, coriander maintained a high final germination percentage in all treatments, with no significant differences, whereas watermelon showed more sensitive responses, particularly in temporal parameters. These findings indicate that *E. uchi* extract and green-synthesized AgNPs modulate germination in a species-dependent manner, supporting the potential of green nanotechnology as an investigative tool for sustainable agricultural applications.

Keywords: green synthesis; silver nanoparticles; *Endopleura uchi*; allelopathy; germination.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura molecular e centros quirais da Bergenina.....	29
Figura 2 – Preparo do extrato de <i>Endopleura uchi</i>	39
Figura 3 – Preparo das soluções para atividade alelopática.....	44
Figura 4 – Sementes de melancia e coentro organizadas nas bandejas em contato com concentrações de AgNPs / extrato aquoso / controle (água destilada).....	45
Figura 5 – Espectro eletrônico do extrato aquoso de <i>Endopleura uchi</i> em função do tempo.....	50
Figura 6 – Comprimento máx. de absorção do extrato de <i>Endopleura uchi</i> em função do tempo.....	52
Figura 7 – Reação qualitativa para fenóis e taninos: 7 a) Fenóis e 7 b) Taninos.....	53
Figura 8 – Reação qualitativa para Antocianinas, antocianidinas e flavonoides: 8a (-), 8b (+ flavonas) 8c (-) e 8d (-).....	54
Figura 9 – Reação confirmatória para identificação de flavonoides.....	55
Figura 10 – Esquema da reação oxalo-bórica.....	56
Figura 11 – Teste confirmatório para taninos: 11a) Cloreto férrico, 11b) Acetato de cobre, 11c) Acetato de chumbo 3 e 11d) Reação com gelatina.....	56
Figura 12 – Teste confirmatório para terpenos 12a.....	57
Figura 13 – Teste para saponinas: 13 a) Saponina (Reação Geral) e 13 b) Teste confirmatório (Saponinas triterpênicas).....	58
Figura 14 – Teste para identificação de alcaloides: 14a) e 14b) reações qualitativas com reagentes específicos.....	58
Figura 15 – Mudança de coloração na formação de AgNPs: 15a) cor amarelada e 15b) com laranja.....	60
Figura 16 – Influência das variáveis – pH, temperatura e tempo / estabilidade.....	61
Figura 17 – Espectro de infravermelho do extrato em pó de <i>E. uchi</i> na região de 4000-400 cm ⁻¹	66
Figura 18 – Espectros de infravermelho das nanopartículas de prata sintetizadas com extrato aquoso de <i>Endopleura uchi</i> e comparação com o extrato precursor.....	67
Figura 19 – (A) Micrografia MEV-BSE do extrato vegetal seco, mostrando morfologia irregular e agregada. (B) Micrografia MEV-BSE das AgNPs, evidenciando agregados granulares e regiões de maior contraste eletrônico. (C) Espectros de EDS do extrato e das AgNPs, indicando predominância de C e O no extrato e elevado teor de Ag no material sintetizado. As imagens de MEV foram obtidas em aumento de 1000×.....	69
Figura 20 – Correlações entre capacidade (FGP) e parâmetros de energia germinativo (GE, GV, GI) para coentro e melancia.....	75
Figura 21 – Correlações de tempo de início de germinação (TIG) com IGV e MGT.....	76
Figura 22 – Correlação entre uniformidade (U) e coeficiente de variação de tempo (CVt).....	77
Figura 23 – Correlações de sincronia (Z) com uniformidade (U), coeficiente de variação de tempo (CVt) e entropia (H).....	78
Figura 24 – Correlações do valor de pico (PV) com IVG, GR e FGP.....	79
Figura 25 – Correlações integrativas entre valor de germinação e parâmetros cinéticos.....	80
Figura 26 – Correlação entre valor de germinação (GV) e entropia (H).....	81

Figura 27 — Biplot da análise de componentes principais (PCA) para parâmetros germinativos de coentro e melancia sob diferentes tratamentos com AgNPs.....	82
Figura 28 — Correlações de concentração de AgNPs com parâmetros germinativos (FGP, IVG, sincronia e entropia).....	83
Figura 29 — Curvas de Kaplan-Meier para a probabilidade de não germinação de sementes de coentro e melancia expostas a diferentes concentrações de AgNPs.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – – Constituintes químicos e cor.....	40
Tabela 2 – – Relação dos constituintes e cores esperadas.....	40
Tabela 3 – – Relação dos constituintes e cores esperadas.....	41
Tabela 4 – – Relação dos constituintes e cores esperadas.....	42
Tabela 5 – – Comparação de desempenho de diferentes transformações nos testes de pressupostos estatísticos para os dados de absorbância (AgNPs).....	43
Tabela 6 – – Contagem de germinação em função de dias.....	46
Tabela 7 – – Desempenho de transformações para variáveis de germinação.....	48
Tabela 8 – – Matriz experimental completa.....	59
Tabela 9 – – Estatísticas descritivas de absorbância (UA) e agrupamento de Duncan para oito condições do fatorial 23.....	62
Tabela 10 – – ANOVA fatorial 23 com correção de heterocedasticidade (HC3) com dados transformados por log10.....	63
Tabela 11 – – Sensibilidade do efeito principal da concentração a diferentes transformações da absorbância (AgNPs).....	63
Tabela 12 – – Coeficientes do modelo de regressão linear múltipla (escala log10) para a absorbância da AgNPs. As variáveis predetoras (pH, concentração do extrato e temperatura) foram codificadas no intervalo de 95% de confiança.....	64
Tabela 13 – – Dados completos de todas as réplicas experimentais para coentro e melancia submetidas a diferentes tratamentos de AgNPs e controle.....	71
Tabela 14 – – Estimativas CE50 para parâmetros germinativos sob exposição a AgNPs.....	72
Tabela 15 – – Matriz de correlação de Pearson completa entre todos os parâmetros germinativos avaliados (n= 40 observações combinadas de coentro e melancia). Os valores apresentam o coeficiente de correlação r.....	73
Tabela 16 – – Testes de log-rank para comparação das curvas de germinação.....	84
Tabela 17 – – Resumo dos testes de normalidade (Shapiro-Wilk) por grupo experimental.....	85
Tabela 18 – – Componentes de variância dos modelos mistos lineares.....	85
Tabela 19 – – Coeficientes significativos do modelo de regressão stepwise para FGP.....	86
Tabela 20 – – Médias e desvios padrão de parâmetros complementares de germinação.....	87

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – - Os 12 princípios da Química Verde.....	20
Quadro 2 – - Trabalhos realizados com NP metálicas mediadas por extratos vegetais.....	24
Quadro 3- Características do gênero Endopleura.....	27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ag – Prata

AGEs – Produtos finais de glicação avançada

AgNO₃ – Nitrato de prata

AgNPs – Nanopartículas de prata

ANOVA – Análise de variância

Au – Ouro

AUC – Área sob a curva de germinação

BOD – Câmara de germinação

CA – Comprimento da parte aérea

CE50 – Concentrações efetivas para 50% de inibição ou estímulo

CHCl₃ – Clorofórmio

COX-2 – Ciclooxygenase – 2

CR – Comprimento da raiz

CVt – Coeficiente de variação de tempo

DMAP – 4-dimetilaminopiridina

DPPH – 2,2-difenil-1-picrilhidrozil

EROs – Espécies reativas de oxigênio

E. uchi – *Endopleura uchi*

FGP – Porcentagem final de germinação

FRAP – Recuperação da fluorescência após fotobranqueamento

GE – Energia de germinação

GI – Índice de germinação

GLS – Mínimos quadrados generalizados

GP% - Porcentagem final de germinação

GR – Regulador de germinação

GV – Velocidade de germinação

H – Entropia

H₃BO₃ – Ácido bórico

HCl – Ácido clorídrico

IGV – Índice de velocidade de germinação

MAE – Erro absoluto médio

MF – Massa fresca

MGT – Tempo médio de germinação
MS – Massa seca
NaOH – Hidróxido de sódio
NPs – Nanopartículas
NT - Nanotecnologia
OH – Hidroxila
PCA – Análise de componentes principais
PRL – Comprimento da raiz primária
PT – Tempo de pico
PV – Valor de pico
RMSE – Raiz do erro quadrático médio
T1 – Concentrações de nanopartículas de prata 25 $\mu\text{g mL}^{-1}$
T2 - Concentrações de nanopartículas de prata 50 $\mu\text{g mL}^{-1}$
T3 - Concentrações de nanopartículas de prata 100 $\mu\text{g mL}^{-1}$
T4 – Controle (água destilada)
T5 – Extrato aquoso de *Endopleura uchi*
T50 – Tempo para 50% de germinação
TIG – Tempo de início de germinação
U – Uniformidade
UA – Estatísticas descritivas de absorbância
UV-Vis – Espectroscopia no ultravioleta – visível
Z – Sincronia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
2 OBJETIVOS.....	18
2.1 Objetivo geral	18
2.2 Objetivos específicos	18
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
3.1 Nanotecnologia	19
3.2 Química verde.....	19
3.3 Nanopartículas e síntese verde.....	23
3.4 Família Humiriaceae.....	25
3.5 Gênero Endopleura	26
3.6 Espécie Endopleura uchi.....	27
3.7 Bergenina	29
3.8 Alelopatia.....	32
3.9 Coriandrum sativum L. (coentro)	33
3.10 Citrullus lanatus (Thunb.) Matsum. & Nakai (melancia)	35
4 METODOLOGIA.....	38
4.1 Coleta do vegetal e preparo do extrato de Endopleura uchi	38
4.2 Teste de estabilidade do extrato vegetal	39
4.3 Teste de prospecção fitoquímica.....	39
4.3.1 Teste para fenóis e taninos	39
4.3.2 Teste para antocianinas, antocianidinas e flavonoides.....	40
4.3.3 Teste para leucoantocianidinas, catequinas e flavonas	40
4.3.4 Teste para identificação de terpenos	41
4.3.5 Teste para identificação de saponinas	41
4.3.6 Teste para identificação de alcaloides.....	42
4.4 Produção e estabilidade das nanopartículas de prata	42
4.4.1 Análise estatística.....	42
4.5 Atividade alelopática	44
4.5.1 Preparo das soluções	44
4.5.2 Bioensaio de germinação	45
4.5.3 Monitoramento e análise de parâmetros germinativos.....	46
4.5.4 Modelo estatístico para análise da germinação	48
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1 Caracterização do extrato aquoso de Endopleura uchi por espectroscopia UV-Vis.....	50
5.2 Estabilidade do extrato aquoso de Endopleura uchi	51
5.3 Perfil fitoquímico do extrato aquoso de Endopleura uchi	52
5.4 Produção e estabilidade das nanopartículas de prata	59
5.5 Caracterização complementar das AgNPs por FTIR, MEV e EDS.....	65
5.6 Atividade alelopática	71
5.6.1 Avaliação do efeito alelopático de AgNPs sintetizadas por via verde.....	71
6 CONCLUSÃO.....	88
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

1 INTRODUÇÃO

O Brasil figura entre os maiores consumidores mundiais de agrotóxicos, cenário que reforça a necessidade de estratégias sustentáveis para o manejo agrícola. Embora esses insumos contribuam para o controle de pragas e plantas daninhas, seu uso intensivo pode gerar impactos ambientais relevantes, especialmente pela contaminação do solo, da água superficial e de lençóis freáticos, além de riscos à saúde humana e à biodiversidade (Steffen et al., 2011).

Nesse contexto, a busca por alternativas menos agressivas tem impulsionado pesquisas envolvendo produtos naturais, extratos vegetais e nanomateriais. A integração entre química verde, nanotecnologia e prospecção de espécies vegetais permite explorar rotas de síntese mais simples, com menor uso de reagentes tóxicos e maior compatibilidade com aplicações biológicas e ambientais (Elias, 2014).

A fitonanotecnologia, ou nanotecnologia mediada por materiais vegetais, destaca-se por empregar extratos de plantas como fontes de metabólitos capazes de reduzir íons metálicos e estabilizar nanopartículas. Essa abordagem apresenta vantagens como o uso de meio aquoso, condições reacionais brandas, menor geração de resíduos e potencial obtenção de nanomateriais biocompatíveis, razão pela qual é frequentemente associada ao conceito de síntese verde (Kuppusamy, 2016).

Nos sistemas de síntese verde, compostos fenólicos, flavonoides, taninos, terpenos, açúcares redutores e outros metabólitos secundários podem participar da redução do precursor metálico e da estabilização coloidal das nanopartículas. Grupos funcionais como hidroxilas, carbonilas e carboxilatos favorecem interações com a superfície metálica, influenciando nucleação, crescimento, tamanho, estabilidade e possível atividade biológica dos nanomateriais formados (Khan, 2017).

Entre os nanomateriais metálicos, as nanopartículas de prata (AgNPs) se destacam em razão de suas propriedades ópticas, antimicrobianas, catalíticas e biológicas. Na agricultura, esses materiais têm sido investigados tanto por seus efeitos sobre microrganismos quanto por sua possível influência em processos fisiológicos de sementes e plântulas, incluindo germinação, crescimento inicial e respostas associadas ao estresse oxidativo (Ahmed et al., 2016; Álvarez, 2016).

Apesar do crescente número de estudos sobre AgNPs sintetizadas por via verde, ainda são escassas as investigações que relacionam extratos de *Endopleura uchi*, espécie amazônica de interesse etnobotânico e fitoquímico, com a síntese de nanopartículas de prata e a avaliação de seus efeitos alelopáticos. Assim, este trabalho propõe a síntese de AgNPs mediadas pelo

extrato aquoso do caule de *E. uchi* e a avaliação de seu potencial alelopático frente a espécies de interesse agrônomo.

Além disso, torna-se relevante destacar que o uso de espécies amazônicas em processos de síntese verde contribui não apenas para o avanço científico, mas também para a valorização da biodiversidade regional. A Amazônia, por sua riqueza fitoquímica, oferece um vasto repertório de metabólitos secundários que podem ser explorados em aplicações tecnológicas inovadoras. Essa perspectiva reforça a importância da bioprospecção responsável, que alia conservação ambiental ao desenvolvimento de soluções sustentáveis para a agricultura.

Outro aspecto que merece atenção é a possibilidade de que nanomateriais obtidos por rotas verdes apresentem menor toxicidade ambiental e maior seletividade biológica. Isso abre espaço para aplicações que vão além do controle de pragas, incluindo o estímulo ao crescimento vegetal e a mitigação de efeitos negativos associados ao estresse abiótico. Dessa forma, a síntese de nanopartículas mediada por extratos vegetais pode ser vista como uma estratégia multifuncional, capaz de integrar benefícios agrônômicos e ambientais.

Por fim, a investigação de espécies como *Endopleura uchi* no contexto da nanotecnologia verde contribui para ampliar o conhecimento científico sobre recursos naturais amazônicos e seus potenciais aplicações. Ao mesmo tempo, promove a construção de alternativas tecnológicas alinhadas às demandas globais por práticas agrícolas mais seguras e sustentáveis, fortalecendo a interface entre ciência, inovação e conservação da biodiversidade.

2 OBJETIVOS

2.1 *Objetivo geral*

Sintetizar nanopartículas de prata mediadas pelo extrato aquoso do caule de *Endopleura uchi* e avaliar seu potencial alelopático em espécies de interesse agronômico.

2.2 *Objetivos específicos*

- Preparar e avaliar a estabilidade do extrato aquoso do caule de *Endopleura uchi*;
- Sintetizar nanopartículas de prata por rota verde utilizando o extrato vegetal como agente redutor e estabilizante;
- Monitorar a formação e a estabilidade das nanopartículas por espectroscopia UV-Vis e por análise estatística das condições de síntese;
- Avaliar a atividade alelopática do extrato e das AgNPs sobre parâmetros de germinação de coentro e melancia.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Nanotecnologia

O termo nanotecnologia (NT) foi empregado na literatura em 1974 por Norio Taniguchi, no trabalho intitulado *On the Basic Concept of Nanotechnology*. Entretanto, as bases conceituais da área já haviam sido antecipadas por Richard Feynman em 1959, na palestra *There is Plenty of Room at the Bottom*, na qual discutiu a possibilidade de manipulação da matéria em escalas extremamente reduzidas (Tonet; Leonel, 2019).

A nanotecnologia é um campo interdisciplinar que envolve a ciência e a engenharia aplicadas à compreensão, produção e manipulação de materiais em escala nanométrica. Nessa escala, a elevada razão área/volume e os efeitos quânticos e superficiais podem modificar propriedades ópticas, elétricas, químicas e biológicas, ampliando o uso desses materiais em áreas como medicina, eletrônica, catálise, agricultura, cosméticos e indústria farmacêutica (Macedo et al., 2022; Pereira et al., 2024).

Nas ciências da saúde e nas ciências agrárias, o interesse pela nanotecnologia decorre da possibilidade de obter sistemas mais eficientes, seletivos e responsivos. A manipulação da matéria em escala nanométrica permite desenvolver estruturas com organização controlada, maior área superficial e capacidade de interação específica com moléculas, células, microrganismos ou tecidos vegetais (Claudiano, 2021).

Sarkar et al. (2019) descrevem a nanotecnologia como o estudo e o desenvolvimento de estruturas extremamente pequenas, denominadas nanoestruturas, bem como a investigação das propriedades físico-químicas que emergem nessa escala. Assim, a relevância científica dos nanomateriais não reside apenas em seu tamanho, mas na relação entre dimensão, composição, morfologia, superfície e funcionalidade.

Haleem et al. (2023) ressaltam que a nanotecnologia se consolidou como uma das plataformas tecnológicas mais promissoras do século XXI. Essa expansão é particularmente importante em estudos que buscam materiais de menor impacto ambiental, pois permite integrar funcionalidade, eficiência de processo e uso racional de recursos, princípios que se aproximam diretamente da química verde.

3.2 Química verde

A Química Verde é definida como o design, o desenvolvimento e a implementação de produtos e processos químicos para reduzir ou eliminar o uso e a geração de substâncias perigosas à saúde humana e ao meio ambiente (Anastas; Warner, 1998). Diferente das

abordagens tradicionais de remediação, que focam no tratamento de efluentes e resíduos após sua formação (o chamado end-of-pipe), a Química Verde estabelece um paradigma proativo. Este conceito fundamenta-se na premissa de que a sustentabilidade deve ser incorporada na fase de planejamento molecular, transformando a periculosidade em uma variável de design passível de controle e mitigação (Erythropel et al., 2018).

A operacionalização da Química Verde consolidou-se com a formulação dos Doze Princípios, que orientam a avaliação e o planejamento de produtos e processos químicos de menor impacto. Esses princípios não devem ser entendidos apenas como recomendações regulatórias, mas como uma estrutura de decisão que integra eficiência sintética, segurança, redução de resíduos, menor toxicidade e responsabilidade ambiental. O Quadro 1 sintetiza esses princípios e sua relação com discussões contemporâneas da área.

Quadro 1: Os 12 princípios da Química Verde.

PRINCÍPIOS	FUNDAMENTOS E TEORIAS	DISCUSSÃO
1. Prevenção de Resíduos	Síntese "one-pot", processos integrados, intensificação de processos, economia circular e métrica E-Factor.	É economicamente e ambientalmente superior prevenir a formação de resíduos do que tratá-los após criados. A escolha de matérias-primas e caminhos reacionais impacta diretamente a saúde pública e os ecossistemas.
2. Economia de Átomos	Métricas de eficiência sintética, reações de rearranjo, acoplamento e cicloadição, e metátese de Grubbs.	Métodos sintéticos devem maximizar a incorporação de todos os materiais usados no processo do produto final. O foco mudou de simples "rendimento" para a utilização total da massa atômica.
3. Síntese Química Menos Perigosa	Avaliação de Ciclo de Vida (LCA), catálise não metálica e funcionalização de ligações C-H.	Onde praticável, as metodologias devem usar e gerar substâncias com pouca ou nenhuma toxicidade. O uso de carbonatos de dialquila é um exemplo de substituição de reagentes perigosos.
4. Design de Produtos Seguros	Modelos (Q)SAR, estudos ADME, bancos de dados como ToxCast e triagem de alto rendimento (HTS).	Produtos químicos devem ser desenhados para manter sua eficácia funcional enquanto sua toxicidade é reduzida. O uso de métodos computacionais permite prever efeitos adversos precocemente.

5. Solventes e Auxiliares Seguros	Solventes bio-sustentáveis, líquidos iônicos, líquidos expandidos por gás e reações sem solvente.	O uso de substâncias auxiliares deve ser desnecessário ou inócuo. A água e solventes bio-originados são alternativas críticas para reduzir o impacto ambiental.
6. Eficiência Energética	Mecanoquímica, sonoquímica, micro-ondas, fotocatalise e reações à temperatura ambiente.	Os impactos ambientais e econômicos do uso de energia devem ser minimizados. Avanços em reatores permitem o fornecimento não convencional de energia para maior eficiência.
7. Uso de Matérias-primas Renováveis	Biorrefinarias integradas, biomassa para produtos químicos e uso de resíduos como matéria-prima.	Matérias-primas devem ser renováveis em vez de esgotáveis sempre que técnica e economicamente viável. O processamento de algas e biomassa é um pilar da sustentabilidade.
8. Redução de Derivados	Química de fluxo, eletrossíntese e "Click Chemistry".	Deve-se evitar derivatizações desnecessárias (como grupos de proteção), pois exigem reagentes adicionais e geram resíduos. A química de fluxo permite controle preciso e redução dessas etapas.
9. Catálise	Biocatálise, nanocatálise, organocatálise e catálise por metais abundantes.	Reagentes catalíticos (tão seletivos quanto possível) são superiores aos reagentes estequiométricos. A catálise melhora a economia de átomos e reduz as necessidades energéticas.
10. Design para Degradação	Polímeros degradáveis, gatilhos moleculares e bancos de dados de biodegradação.	Produtos devem ser desenhados para que, ao fim de sua função, se decomponham em produtos de degradação inócuos e não persistam no ambiente. Isso é vital na indústria farmacêutica.
11. Análise em Tempo Real	Espectroscopia, sensores, cromatografia e monitoramento em fluxo contínuo.	Metodologias analíticas precisam de desenvolvimento para permitir monitoramento e controle em tempo real para prevenir a formação de substâncias perigosas.
12. Química Inerentemente Segura	Produção on-site de materiais perigosos e substituição de substâncias inflamáveis ou explosivas.	As substâncias usadas em processos devem ser escolhidas para minimizar o potencial de acidentes como explosões, incêndios e liberações tóxicas.

Fonte: A autora (2026).

No âmbito da eficiência sintética, a química verde introduz a teoria da Economia de Átomos, que desafia o conceito tradicional de rendimento percentual. Enquanto o rendimento foca na quantidade de produto obtido, a economia de átomos exige que os métodos sintéticos

sejam desenhados para maximizar a incorporação de todos os reagentes no produto final (Anastas; Warner, 1998). Esta abordagem é essencial para a redução do fator E (fator ambiental), uma métrica que quantifica a massa de resíduos gerada por quilograma de produto, evidenciando que a prevenção na fonte é superior a qualquer tecnologia de tratamento posterior (Erythropel et al., 2018).

A evolução da Química Verde ao longo das últimas duas décadas, frequentemente ilustrada pela metáfora da "Árvore da Química Verde" (Green ChemisTREE), revela uma diversificação profunda nas ferramentas de controle reacional. A substituição de reagentes estequiométricos por catalisadores (especialmente biocatalisadores e organocatalisadores) e a troca de solventes orgânicos voláteis por sistemas inócuos ou reações em fase sólida representam avanços críticos (Erythropel et al., 2018). Segundo Baird e Cann (2012), a redução da demanda energética por meio de processos conduzidos em condições ambientes de temperatura e pressão não apenas diminui os custos operacionais, mas reduz drasticamente a pegada de carbono associada à produção química global.

Por fim, o princípio da Química Inerentemente Segura destaca a importância da prevenção de acidentes desde a concepção do processo químico. A escolha de substâncias e estados físicos que minimizem riscos de explosões, incêndios e liberações tóxicas é um pilar da sustentabilidade industrial (Anastas; Warner, 1998). Integrada ao design para degradação, onde os produtos são projetados para se decompor em fragmentos inócuos ao final de seu ciclo de vida, a Química Verde configura-se como a ferramenta científica essencial para a viabilização da Economia Circular e a preservação da biosfera a longo prazo (Baird; Cann, 2012).

A convergência entre a prospecção de recursos amazônicos e a nanotecnologia biogênica exemplifica a aplicação do Princípio 7, relacionado ao uso de matérias-primas renováveis. O emprego de extratos de *Endopleura uchi* como agentes redutores e estabilizantes substitui, ao menos parcialmente, reagentes químicos convencionais de maior toxicidade por biomoléculas de origem vegetal, aproximando a síntese proposta dos princípios da química menos perigosa e da prevenção de resíduos.

A execução experimental da síntese biogênica também se relaciona ao Princípio 5, pois utiliza água como solvente extrator e meio reacional, reduzindo a dependência de solventes orgânicos voláteis. Além disso, as condições brandas de temperatura e pressão reforçam o Princípio 6, voltado à eficiência energética, sobretudo quando comparadas a rotas físico-químicas que demandam temperaturas elevadas, agentes redutores fortes ou estabilizantes sintéticos (Erythropel et al., 2018).

No contexto agrícola, a avaliação do potencial alelopático de nanopartículas obtidas por rota verde amplia a discussão sobre tecnologias menos impactantes. A proposta não substitui diretamente estudos agrônômicos de campo, mas contribui para compreender como nanomateriais mediados por extratos vegetais podem modular processos germinativos e, futuramente, subsidiar estratégias de manejo vegetal baseadas em materiais mais compatíveis com princípios de sustentabilidade (Baird; Cann, 2012).

3.3 Nanopartículas e síntese verde

As nanopartículas (NPs) são estruturas com dimensões tipicamente compreendidas entre 1 e 100 nm. Nessa faixa, alterações na área superficial, na energia de superfície e no confinamento espacial podem modificar a reatividade, a estabilidade coloidal e a interação com sistemas biológicos. Por isso, as NPs têm sido empregadas em diferentes aplicações, incluindo veiculação de fármacos, catálise, sensores, controle microbiológico e sistemas voltados à agricultura (Haider et al., 2022; Da Silva-Câmara et al., 2021).

No âmbito da química bioinorgânica e da química verde, a síntese de nanomateriais tem buscado rotas que reduzam toxicidade, consumo energético e geração de resíduos. A síntese verde atende a essa demanda ao empregar fontes biológicas, como extratos vegetais e microrganismos, que fornecem moléculas capazes de atuar simultaneamente como agentes redutores e estabilizantes (De Sousa, 2020; Marques, 2023; Silva Junior, 2022).

A síntese verde minimiza ou elimina o uso de substâncias químicas agressivas por meio da utilização de extratos de plantas, solventes naturais ou água como meio reacional. Nesses sistemas, a formação das nanopartículas depende das interações entre compostos bioativos do extrato e íons metálicos, processo que pode ser influenciado pelo pH, temperatura, concentração do extrato, tempo de reação e natureza do precursor metálico (Sharma et al., 2021; Singh et al., 2020).

Na síntese de nanopartículas de prata, o nitrato de prata (AgNO_3) é frequentemente utilizado como precursor metálico em razão de sua elevada solubilidade em água e da disponibilidade de íons Ag^+ . Na presença de metabólitos redutores, esses íons podem ser convertidos a prata metálica, enquanto outras moléculas presentes no extrato contribuem para limitar a agregação e estabilizar a superfície das partículas (Viana et al., 2021).

Compostos como flavonoides, antocianinas, taninos e ácidos fenólicos são particularmente relevantes nesse processo, pois apresentam grupos funcionais capazes de doar elétrons, complexar íons metálicos e interagir com a superfície das nanopartículas. Assim, a

composição fitoquímica do extrato não apenas participa da formação das AgNPs, mas também pode influenciar sua estabilidade e sua resposta biológica (Lemos et al., 2021).

Diversos estudos têm investigado nanopartículas metálicas mediadas por extratos vegetais, com diferentes respostas biológicas e físico-químicas. O Quadro 2 apresenta exemplos de trabalhos que demonstram a diversidade de espécies vegetais, metais e aplicações associadas à síntese verde.

Quadro 2: Trabalhos realizados com nanopartículas metálicas mediadas por extratos vegetais.

Título, Autor e Ano	Tipo de Estudo	Resultados Obtidos
1º) Síntese e caracterização de nanopartículas de prata em curcumina e extrato de caju <i>Anacardium occidentale</i> . Viana et al., (2021)	Procedimento Experimental	Tanto o extrato de curcumina quanto o extrato de caju foram capazes de sintetizar e estabilizar as nanopartículas de prata com formas esféricas e aproximadamente 20nm de tamanho e mantiveram-se estáveis em todo o tratamento desenvolvido.
2º) Síntese, caracterização e análise antimicrobiana de nanopartículas de prata utilizando extrato de <i>Humirianthera ampla</i> como agente redutor. Sena et al., (2021)	Procedimento Experimental	As análises de UV-Vis e DLS mostraram a formação de nanopartículas esféricas de tamanho em torno de 47nm. As nanopartículas obtidas por via verde apresentaram atividade antimicrobiana diferente das utilizando boroidreto como estabilizador.
3º) A utilização da síntese verde para obtenção de nanopartículas de prata a partir de extratos de girassol <i>Helianthus annuus</i> . Lemos et al., (2021)	Procedimento Experimental	As AgNPs foram obtidas nos espectros UV-vis em torno de 20 nanômetros. Os picos variaram de 414 nm a 422 nm (λ_{max} 422 nm) e extrato de <i>Helianthus annuus</i> foi capaz de estabilizar com efeito de formação de halo nas linhagens de <i>S. aureus</i> (16 mm), <i>E. coli</i> (12 mm) e <i>P. aeruginosa</i> (10 mm), diferente das AgNPs que não foram estabilizadas com girassol não apresentaram o halo de inibição.
4º) Síntese verde de nanopartículas de prata utilizando extrato metanólico de <i>Podocarpus lambertii</i> Dias et al., (2021)	Procedimento Experimental	A melhor condição para síntese de AgNPs foi observada em 180µL de NaOH 0,001mol/L ⁻¹ e 1440 µL contendo a solução de extrato de <i>Podocarpus lambertii</i> . A melhor temperatura utilizada foi de 90°C e tempo de 60 minutos para a síntese. Fatores como pH, temperatura são determinantes para a síntese das AgNPs.
5º) Nanopartículas metálicas de ouro (Au) e prata (Ag) associadas a substâncias naturais: uma proposta de síntese biogênica pouco explorada Zan et al., (2022)	Procedimento Experimental	As NPs não apresentaram atividade antimicrobiana até concentrações de 5 mg. mL ⁻¹ , diferente das nanopartículas de prata que nos testes realizados apresentaram atividade antimicrobiana contra três cepas bacterianas (<i>E. coli</i> , <i>K. pneumoniae</i> e <i>S. aureus</i>) altamente resistentes a múltiplas drogas e apresentaram atividade bactericida maior contra um antibiótico padrão (Ampiclox, GlaxoSmithKline plc, London, UK), utilizando-se AgNO ₃ (1 mM) como controle positivo e como controle negativo o extrato da planta (PE).
6º) Potencial antioxidante e síntese de nanopartículas de óxido de cobre a partir de extratos vegetais de <i>Piper amalago</i> L. (Piperaceae) Abel et al., (2022)	Procedimento Experimental	As nanopartículas desenvolvidas não apresentaram acentuada antioxidante. Os resultados sugerem que a potencialidade antioxidante evidenciada pelos extratos de <i>P. amalago</i> está relacionada, principalmente à presença de compostos fenólicos, e que complementam a síntese verde das nanopartículas de óxido de cobre.

7º) Atividade in vitro de nanopartículas de zinco contra agentes patogênicos de peixes Carvalho <i>et al.</i> , (2022)	Procedimento Experimental	O extrato de aroeira (10 mg/L e 15 mg/L) e o nanocomposto (15 mg/L) apresentaram efeito contra a <i>A. hydrophila</i> , e somente o nanocomposto (15 mg/L) apresentou efeito sobre <i>S. agalactiae</i> o que leva a concluir que o nanocomposto e o extrato de aroeira são mais eficientes que a NPZnO-Q no controle dos agentes patogênicos.
8º) Síntese verde de nanopartículas de óxido de zinco (ZnO-NPs) usando extratos de frutas de <i>Ailanthus altissima</i> e atividade antibacteriana. Awwad <i>et al.</i> , (2020)	Procedimento Experimental	As nanopartículas desenvolvidas apresentaram atividade antimicrobiana moderada e mantiveram-se estáveis, porém são necessários testes complementares afim de compreender com mais detalhes os mecanismos utilizados pelas nanopartículas metálicas.

Fonte: A autora (2026).

3.4 Família Humiriaceae

Humiriaceae é uma família botânica pertencente à ordem Malpighiales, composta por árvores e arbustos distribuídos principalmente em regiões tropicais. Atualmente, reúne aproximadamente sessenta espécies distribuídas em oito gêneros, com ocorrência desde a América Central até a América do Sul, incluindo ampla representação na Amazônia brasileira (Cuatrecasas, 1961; Nepomuceno, 2022).

A distribuição geográfica dessa família botânica no Brasil já foi confirmada no Norte (Acre, Amapá e Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima e Tocantins), Nordeste (Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Pernambuco e Sergipe), Centro-Oeste (Distrito Federal, Goiás, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso), Sudeste (Espírito Santo, Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo) e Sul (Santa Catarina) (Medeiros., 2019; Falcão et al.,2022).

Medeiros (2015) registrou aproximadamente trinta e cinco espécies da família no Brasil, distribuídas em oito gêneros: Duckesia Cuatrec., Endopleura Cuatrec., Humiria A. St. -Hil., Hylocarpa Cuatrec., Sacoglottis Mart., Schistostemon (Urb.) Cuatrec. e Vantanea Aubl. Entre essas espécies, dezessete são consideradas endêmicas, e a Região Norte concentra cerca de vinte e sete registros, com destaque para o estado do Amazonas.

A identificação botânica da família Humiriaceae envolve características morfoanatômicas como tronco de coloração marrom-escuro a avermelhada, porte elevado, copa densa, folhas glabras, flores hermafroditas, cálice com sépalas e frutos com sementes em número variável. Esses caracteres são importantes para a distinção taxonômica entre gêneros e espécies (Medeiros, 2019; Nepomuceno, 2022).

Os frutos de Humiriaceae são geralmente classificados como drupas, com polpa carnosa e endocarpo lenhoso. Em alguns gêneros, o endocarpo apresenta estruturas associadas à germinação e à dispersão. Além do valor alimentar, esses frutos participam de interações

ecológicas relevantes, pois podem ser dispersos por água e por animais como roedores, antas, primatas, aves e morcegos (Nepomuceno, 2022; Dias et al., 2025).

3.5 Gênero *Endopleura*

O gênero *Endopleura* pertence à família Humiriaceae e tem como principal representante a espécie *Endopleura uchi* (Huber) Cuatrec., conhecida popularmente como uxi-amarelo. Sua ocorrência está fortemente associada à região amazônica, embora registros também sejam descritos em outros territórios da América do Sul, especialmente em ambientes de floresta tropical úmida, solos ricos em matéria orgânica e maior disponibilidade hídrica (Bastos, 2020; De Sá et al., 2020; De Lima et al., 2024).

Taxonomicamente, o gênero *Endopleura* foi estabelecido por Cuatrecasas (1961) como um gênero monotípico, tendo como espécie-tipo a *Endopleura uchi* (Huber) Cuatrec. A distinção deste gênero frente aos demais integrantes da família Humiriaceae baseia-se primordialmente na morfologia das anteras e na estrutura do endocarpo. Segundo Cuatrecasas (1961), o gênero é caracterizado por apresentar estames (20 a 30) com filamentos papilosos e anteras que possuem um conectivo alongado, agudo e espesso, com quatro tecas subglobosas disjuntas, posicionadas lateralmente.

A classificação botânica do gênero *Endopleura* é apresentada a seguir:

Reino: Plantae

Filo: Tracheophyta

Classe: Magnoliopsida

Ordem: Malpighiales

Família: Humiriaceae

Uma das características das espécies pertencentes ao gênero *Endopleura* é acerca de seu habitat. Pois as espécies desse gênero devido a sua grande diversidade possuem caracteres específicos apresentados a seguir no Quadro 3:

Quadro 3: Características do gênero *Endopleura*.

Característica do gênero <i>Endopleura</i>
Hábito e Porte: Árvores caracterizadas por possuírem de médio a grande porte, as quais podem atingir até 30 metros de altura; Tronco reto, geralmente com casca rugosa e fissurada (Bastos., 2020).
Folhas e Aspecto Foliar: Árvores que possuem folhas simples, com filotaxia alterna e geralmente são coriáceas marcadas por apresentarem (textura dura e resistente) além disso a maioria das espécies desse gênero apresentam folhas com forma elíptica a lanceolada e margens inteiras (Bastos., 2020).
Flores: As árvores desse gênero possuem flores com traços brancos e levemente amareladas marcadas por inflorescências do tipo axilar com polinização realizadas por insetos que na maioria das vezes são abelhas (Bastos., 2020).
Frutos: Os frutos desse gênero são do tipo drupa , casca dura e bem resistente (Bastos., 2020).

Fonte: A autora (2026).

Complementando a descrição morfológica, Cuatrecasas (1961) detalha que as sépalas são orbiculares e imbricadas, fundidas na base, enquanto as pétalas são livres e oblongas. No que concerne à frutificação, o endocarpo lenhoso é uma estrutura diagnóstica crucial, apresentando-se 5-alado-costado, onde as costelas são bífidas (exceto na base), resultando em uma seção transversal com figura radiada de dez pontas. Além disso, o endocarpo é operculado, possuindo cinco valvas que facilitam a germinação, com um mesocarpo densamente fibroso situado entre as costelas (Cuatrecasas, 1961).

3.6 Espécie *Endopleura uchi*

A espécie *Endopleura uchi* foi originalmente descrita como *Sacoglottis uchi* por Jacques Huber e, posteriormente, reavaliada por José Cuatrecasas. A análise de características como a estrutura das anteras e do endocarpo mostrou diferenças em relação ao gênero *Sacoglottis*, o que levou à proposição do gênero *Endopleura* para abrigar a espécie.

Dessa forma, a nomenclatura atualmente aceita é *Endopleura uchi* (Huber) Cuatrec., tendo *Sacoglottis uchi* Huber como sinônimo botânico. Trata-se de uma espécie monotípica, ou seja, a única reconhecida no gênero *Endopleura*, conforme a delimitação proposta por Cuatrecasas (1961).

Endopleura uchi (Huber) Cuatrec. é conhecida na Amazônia como uxi, uxi-amarelo, cumatê, pururu, uxi-liso, uxi-ordinário ou uchi-pucu. A árvore pode atingir entre 25 e 30 m de altura, com caule avermelhado e diâmetro de até 1 m. O fruto apresenta morfologia oblongo-elipsoide, mede cerca de 5 a 7 cm de comprimento e 3 a 4 cm de diâmetro, com peso médio entre 50 e 70 g. Durante a maturação, passa de coloração verde-amarelada para pardo-escura (Nepomuceno, 2022; Falcão et al., 2022; Bastos, 2022).

O fruto do uxi-amarelo desempenha um papel fundamental na alimentação e subsistência de diversas comunidades rurais isoladas. No entanto, ao longo da última década, tem sido observado um mercado em expansão na região periurbana nos estados do Amazonas e Belém, especialmente durante os quatro meses de frutificação, proporcionando uma fonte de renda para várias famílias que desenvolvem diversos produtos para a venda (Prestes et al., 2023).

A polpa, quando consumida in natura, pode ser ingerida diretamente ou utilizada na produção de derivados, como sorvetes e licores. Além de seu valor econômico e alimentar para os seres humanos, o fruto constitui uma importante fonte de alimento para a fauna silvestre, o que o torna um recurso amplamente utilizado por caçadores na construção de armadilhas (Prestes et al., 2023; De Almeida et al., 2020).

Estudos recentes sobre os frutos de *Endopleura uchi* na região amazônica evidenciaram sua significativa relevância econômica e alimentar, destacando a presença de compostos com propriedades terapêuticas e/ou nutricionais, o que sugere seu potencial como alimento funcional (De Freitas et al., 2018). Além disso, pesquisas apontaram a ocorrência de atividade antimicrobiana moderada associada a seus constituintes (De Freitas et al., 2018).

Diferentes partes da espécie incluindo raízes, cascas e sementes, são amplamente empregadas na medicina tradicional. As sementes e cascas, em particular, têm sido utilizadas no tratamento de diversas condições, como gastralgia, disenteria, hemorroidas, infecções intestinais, processos inflamatórios, hepatite e outras doenças hepáticas. Além disso, são relatadas aplicações no manejo da tuberculose, anemia, infecções do trato geniturinário, cálculos renais, hemorragias e como agente regulador do ciclo menstrual (Branco et al., 2018).

Um estudo realizado por Hyacienth et al. (2020) permitiu constatar que as cascas do caule de *E. uchi* são tradicionalmente utilizadas na medicina popular durante o parto a fim de favorecer o nascimento e existem informações que as cascas podem atuar como um poderoso agente contraceptivo. Outros estudos como o de Silva e Teixeira (2015) evidenciaram que o extrato de *E. uchi* possui atividade antidiabética atuando na inibição da α -glicosidase, além de atividade bacteriostática e bactericida contra bactérias gram-negativas como a *Pseudomonas aeruginosa*, Nunomura et al. (2009) descreveram o potencial anti-inflamatório da espécie por inibição da ciclooxigenase-2 (COX-2) assim como os estudos de Tacon e Freitas (2013) descrevem o potencial antioxidante da espécie e Oliveira et al. (2017), o potencial antiobesidade.

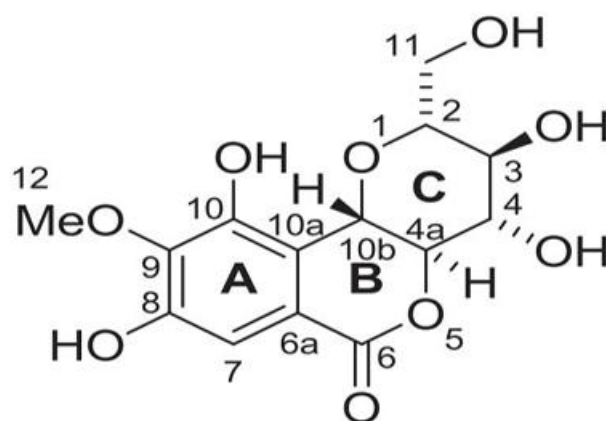
O perfil fitoquímico de *Endopleura uchi* é diversificado. Nunomura et al. (2009) relataram a presença de cumarinas nas cascas do caule, com destaque para a bergenina como

composto majoritário. Outros estudos descreveram esteróis, como β -sitosterol e estigmasterol, além de triterpenos pentacíclicos, como 3-oxo-friedelina e pseudotaraxasterol, reforçando o interesse químico e farmacológico da espécie (Lagos, 2006; Ferreira, 2005; Magalhães et al., 2007).

3.7 *Bergenina*

Como podemos observar na Figura 1, a bergenina ($C_{14}H_{16}O_9$), uma lactona do ácido C-glicosil gálico, apresenta uma arquitetura molecular complexa que a define como um derivado da isocoumarina. Do ponto de vista biossintético, a molécula é originada por via do ácido xiquímico, tendo como precursores imediatos o ácido gálico e a UDP-glucose (Hay; Haynes, 1958, Taneyama, 1979). Estudos radiotrópicos seminais indicam que a formação do esqueleto da bergenina ocorre por meio da condensação do ácido 3-dehydroshikímico com unidades de glicose, seguida por processos de aromatização e lactonização intracíclica, resultando na formação da ligação C-glicosídica estável característica deste metabólito (Frick et al., 1991, Hay; Haynes, 1958, Taneyama, 1979).

Figura 1: Estrutura molecular e centros quirais da bergenina.



Fonte: Bajracharya (2015)

A reatividade química da bergenina permite diversas modificações estruturais visando o aprimoramento de sua lipofilia e bioatividade. No âmbito da alquilação, o composto pode ser convertido em éteres pentametílicos ou derivados específicos como a 8,10-di-O-metilbergenina por meio da reação com iodeto de metila ou diazometano (Ramaiah et al., 1979, Yoshida et al., 1982, Taneyama et al., 1983). Tais derivados alquilados têm demonstrado propriedades farmacológicas relevantes, incluindo a capacidade de inibir o óxido nítrico e o fator de necrose

tumoral alfa (TNF- α), além de apresentarem atividade anti-inflamatória moderada (Shah et al., 2012).

As reações de acilação representam outra via estratégica de modificação, resultando na formação de pentaacetilbergenina quando tratada com anidrido acético ou cloreto de acetila em presença de bases como piridina ou DMAP (Borges et al., 2011, Hay; Haynes, 1958, Jung et al., 2011, Lim et al., 2001, Nazir et al., 2007, Nazir et al., 2011, Ramaiah et al., 1979, Tanaka; Matsunaga, 1988, Tiwari; Khosa, 2009). Comparados à bergenina precursora, esses derivados acilados exibem eficácia biológica acentuada, com destaque para a ação hepatoprotetora contra citotoxicidade induzida por D-galactosamina e efeitos antinociceptivos em modelos animais (Borges et al., 2011, Lim et al., 2001, Lim et al., 2000). Além disso, monoacilatos de bergenina apresentam potente atividade antiglicação, atuando nas três etapas de formação de produtos finais de glicação avançada (AGEs), o que sugere potencial terapêutico em complicações secundárias do diabetes (Kumar et al., 2011).

A modificação da porção glicídica por esterificação seletiva com ácidos graxos ou sob condições de Mitsunobu tem sido explorada para a produção de ésteres de bergenina e norbergenina (Kashima; Miyazawa, 2012, Kumar et al., 2011, Takahashi et al., 2003). Esses derivados demonstram uma capacidade significativamente maior de sequestro de radicais livres e proteção contra a morte neuronal induzida por espécies reativas de oxigênio (Takahashi et al., 2003). Notavelmente, o derivado 11-O-protocatecuoilbergenina destaca-se como um potente inibidor da tirosinase e da enzima β -secretase, indicando um caminho promissor para o tratamento de hiperpigmentação e desordens neurodegenerativas (Kashima; Miyazawa, 2012, Kashima; Miyazawa, 2013a, Kashima; Miyazawa, 2013b). Adicionalmente, processos de dimerização via biotransformação fúngica produzem derivados acoplados C-C que chegam a dobrar a capacidade antioxidante in vitro em relação ao monômero (Wang et al., 2005).

Historicamente, a primeira síntese laboratorial da bergenina foi relatada em 1958 por Hay e Haynes, estabelecida pela reação do brometo de tetra-O-acetil- α -D-glucopiranosila com 4-O-metil galato de metila (Hay; Haynes, 1958). Nas décadas seguintes, o foco voltou-se para a síntese total de derivados metilados, com rotas variando de dez etapas com baixo rendimento global a sínteses mais curtas mediadas por paládio (Frick; Schmidt, 1991, Herzner; Palmacci; Seeberger, 2002, Rousseau; Martin, 2000, Sakamaki et al., 2012). A consolidação da síntese total da bergenina de forma eficiente ocorreu apenas recentemente (2014), por meio de uma estratégia de seis etapas envolvendo acoplamento cruzado de Suzuki-Miyaura e hidroboração-oxidação diastereosseletiva, atingindo um rendimento global de 40% (Parkan; Pohl; Kotora, 2014).

A estabilidade da bergenina frente à degradação hidrolítica é uma de suas propriedades físico-químicas mais relevantes para a indústria farmacêutica. Diferentemente dos O-glicosídeos, a ligação direta carbono-carbono entre a porção anomérica da glicose e o anel aromático confere resistência à clivagem por β -glicosidases gástricas e intestinais (Salimo et al., 2023). Estruturalmente, a molécula é descrita como 2- β -D-glucopiranosil-4,8,11-trihidroxi-5-metoxi-1,2,3,4,4a,10b-hexahidro-8H-pirano [3,2-c]isocromen-6-ona. Essa configuração (Figura 1), permite que a bergenina apresente baixa lipofilicidade, o que influencia diretamente sua farmacocinética e perfil de permeabilidade em membranas biológicas (Bajracharya, 2015).

No que tange à sua ocorrência botânica na região amazônica, a bergenina é o principal marcador químico das cascas de *Endopleura uchi*. A extração deste composto é frequentemente realizada por meio de solventes polares, como metanol e acetona, dada a natureza hidrofílica das múltiplas hidroxilas presentes na porção glicídica (salimo et al., 2023). Pesquisas fitoquímicas demonstram que a concentração de bergenina em espécimes de uxi-amarelo pode variar conforme a sazonalidade e o estágio de maturação da planta, evidenciando a robustez deste composto como sentinela quimiotaxonômica para a família Humiriaceae (Magalhães et al., 2007).

Os mecanismos de ação farmacológica da bergenina têm sido elucidados por meio de modelos de biologia molecular. A atividade anti-inflamatória, por exemplo, não se limita à neutralização inespecífica de radicais livres, mas envolve a modulação específica de cascatas de sinalização intracelular (Salimo et al., 2023, Swarnalakshmi et al., 1984.). Estudos indicam que a bergenina é capaz de suprimir a ativação das Proteínas Quinases Ativadas por Mitógenos e inibir a translocação nuclear do fator NF- κ B (Salimo et al., 2023).

Adicionalmente, o potencial terapêutico da bergenina estende-se ao manejo de distúrbios metabólicos e gástricos. Na atividade antidiabética, o composto atua como um inibidor competitivo das enzimas α -glucosidase e α -amilase, retardando a absorção de carboidratos e mitigando picos glicêmicos pós-prandiais (Bajracharya, 2015). Quanto à ação gastroprotetora, a bergenina estimula a síntese de muco gástrico e a liberação de prostaglandinas endógenas, protegendo a mucosa contra agentes ulcerogênicos, como o etanol e anti-inflamatórios não esteroidais (Goel et al., 1997). Esse perfil multifuncional reafirma a bergenina como um andaime molecular (scaffold) valioso para o planejamento de novos fármacos.

3.8 Alelopatia

O termo alelopatia tem origem no grego, derivando de allélon, que significa “mútuo” ou “entre si”, e páthos, associado a “sofrimento” ou “efeito”. O conceito foi introduzido por Hans Molisch, em 1937, para descrever os efeitos inibitórios ou estimulantes que uma planta pode exercer sobre outra por meio de substâncias químicas liberadas no ambiente (Willis, 2007).

Rice, em 1984, definiu alelopatia como a influência de uma planta sobre outra decorrente da liberação de substâncias químicas, denominadas aleloquímicos. Atualmente, o termo é empregado de modo mais amplo para descrever interações diretas ou indiretas nas quais metabólitos liberados por um organismo modulam processos fisiológicos de organismos vizinhos (Almeida-Bezerra, 2020; Oliveira et al., 2020).

O interesse pela alelopatia surgiu com o intuito de estudar fenômenos agrônômicos, como a quebra de safra e a infertilidade do solo. Nos ecossistemas naturais, as interações químicas entre as plantas começaram a receber maior atenção a partir do século XX. Nos últimos anos, a alelopatia tem se destacado em diversos estudos científicos voltados para a fisiologia vegetal, uma vez que os compostos aleloquímicos demonstram um elevado potencial para aplicação como herbicidas, inseticidas e nematicidas naturais (Almeida-Bezerra, 2020).

Os aleloquímicos podem exercer efeitos de diversas maneiras. Nos organismos-alvo, a ação dos aleloquímicos é influenciada por fatores como a permeabilidade das membranas celulares, a absorção direta de água e nutrientes, além de processos fisiológicos como respiração, fotossíntese, síntese de proteínas e ácidos nucleicos, e a regulação do crescimento (Martins et al., 2021).

Estudos recentes indicam que nanopartículas metálicas mediadas por extratos vegetais podem interferir em processos de germinação e crescimento inicial. Torres (2023), por exemplo, observou que nanopartículas de cobre sintetizadas com *Aloe vera* alteraram parâmetros germinativos de sementes de alface. Embora esse resultado não possa ser transferido diretamente para AgNPs, ele indica que o efeito alelopático de nanomateriais depende da composição, concentração, pH, espécie vegetal e condições de exposição.

Os estudos realizados por Yin et al. (2012) concluíram que AgNPs revestidas com goma arábica reduziram a taxa de germinação em cultivares de *Scirpus cyperinus* (gramínea), *Juncus effusus* (junco solto) e *Persea americana* (louro-abacate), além de ocasionarem um aumento frente o processo de velocidade de germinação de sementes de *Allium fistulosum* (cebolinha).

AgNPs sintetizadas com extratos vegetais também podem atuar como moduladores ecológicos indiretos. Além de sua atividade antimicrobiana, esses materiais podem alterar comunidades microbianas associadas à degradação de aleloquímicos, modificar interações na rizosfera e influenciar a disponibilidade ou persistência de metabólitos no ambiente. Esses mecanismos reforçam que a avaliação alelopática deve considerar tanto respostas diretas da semente quanto efeitos mediados pelo sistema químico-biológico (Bernardo, 2020).

Segundo Seif (2011) em seu estudo concluiu que ao utilizarem nanopartículas de prata de tamanho de 25 nm sobre cultivares de *Borago officinalis* (borrage) estas induziram o desenvolvimento da planta e de suas partes aéreas e comprimento radicular assim como Kumari et al. (2009) avaliou o potencial genotóxico de nanopartículas de prata sobre *Allium cepa* (cebola).

3.9 *Coriandrum sativum* L. (coentro)

O *Coriandrum sativum* L., popularmente conhecido como coentro, é uma erva anual aromática pertencente à família Apiaceae (anteriormente Umbelliferae). Taxonomicamente, a espécie é a única representante de importância econômica do gênero *Coriandrum*. Sua classificação hierárquica posiciona-a no Reino Plantae, Divisão Tracheophyta, Classe Magnoliopsida, Ordem Apiales e Família Apiaceae (Paarakh, 2009; Sonhani et al., 2022). A espécie apresenta uma constituição diploide de $2n = 22$ cromossomos e é amplamente estudada devido à sua variabilidade fenotípica e diversidade genética (Diederichsen et al., 2020).

No que tange à sua distribuição geográfica, o coentro é nativo das regiões do Mediterrâneo e do Sudoeste da Ásia. Devido à sua adaptabilidade a diferentes condições climáticas, seu cultivo estendeu-se globalmente, sendo produzido em larga escala em países como Índia, Marrocos, Paquistão, Rússia e nas Américas (Sobhani et al., 2022). De acordo com Diederichsen et al. (2020), a espécie é cultivada tanto em regiões temperadas quanto tropicais, embora a composição química de seus óleos essenciais seja significativamente influenciada pelas condições edafoclimáticas e pela altitude do local de cultivo.

Morfologicamente, o *C. sativum* caracteriza-se como uma planta herbácea ereta, que pode atingir alturas variando de 20 a 120 cm. O sistema radicular é do tipo pivotante e os caules são cilíndricos, delgados e ramificados (Paarakh, 2009). Uma das características botânicas mais marcantes da espécie é o dimorfismo foliar: as folhas basais e inferiores são longamente pecioladas e apresentam limbos ovados ou trilobados com margens serradas, enquanto as folhas

caulinares superiores são sésseis e profundamente divididas em segmentos lineares ou filiformes (Paarakh, 2009; Sobhani et al., 2022).

A inflorescência do coentro ocorre na forma de umbelas compostas, com flores pequenas, hermafroditas e de coloração branca ou levemente rosada. O fruto é um esquizocarpo globoso, de 1,5 a 5 mm de diâmetro, que não se separa facilmente em mericarpos quando maduro (Diederichsen et al., 2020). Com base no tamanho do fruto, a espécie é frequentemente subdividida em duas variedades botânicas principais: *C. sativum* var. *vulgare* Alef. (frutos grandes, com 3 a 5 mm) e *C. sativum* var. *microcarpum* DC. (frutos pequenos, com 1,5 a 3 mm), sendo esta última geralmente associada a maiores teores de óleo essencial (Diederichsen et al., 2020).

O *C. sativum* é amplamente reconhecido na literatura científica não apenas por suas propriedades aromáticas e culinárias, mas principalmente por sua robusta versatilidade farmacológica. As atividades biológicas desta espécie são atribuídas à presença de compostos bioativos, com destaque para o álcool monoterpênico linalool, que compõe a maior fração do seu óleo essencial, além de uma rica variedade de polifenóis e flavonoides presentes tanto nas sementes quanto nas partes vegetativas (Laribi et al., 2015). O potencial terapêutico do coentro é fundamentado em mecanismos moleculares que permitem sua atuação como agente antioxidante, antimicrobiano, hipolipidêmico, antidiabético e neuroprotetor.

A atividade antioxidante do *C. sativum* é um dos pilares de sua aplicação biológica, sendo essencial na neutralização de espécies reativas de oxigênio (EROs). Estudos de fracionamento e ensaios como DPPH e FRAP demonstram que os extratos das folhas e sementes possuem alta capacidade de sequestro de radicais livres, correlacionada diretamente ao teor de compostos fenólicos como o ácido clorogênico e a quercetina (Wangenstein; Samuelsen; Malterud, 2004). Essa propriedade confere à planta um papel protetor contra o estresse oxidativo celular, prevenindo danos em macromoléculas biológicas e inibindo a peroxidação lipídica em sistemas alimentares e biológicos.

No que tange à atividade antimicrobiana, o óleo essencial de coentro exibe eficácia contra uma vasta gama de patógenos humanos e de origem alimentar. Conforme revisado por Laribi et al. (2015), o linalool atua na desrupção da membrana citoplasmática bacteriana, levando ao extravasamento de constituintes intracelulares e à morte celular. Pesquisas indicam inibição significativa de bactérias Gram-positivas e Gram-negativas, como *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* e *Salmonella typhimurium*, além de propriedades antifúngicas contra leveduras do gênero *Candida* (Silva et al., 2011). Essa tripla ação, antibacteriana, antifúngica e antioxidante, viabiliza o uso do coentro como conservante natural e agente terapêutico.

O potencial metabólico do *C. sativum* é evidenciado por suas funções hipolipidêmicas e antidiabéticas. A administração de sementes de coentro em modelos experimentais demonstrou uma redução significativa nos níveis de colesterol total e triglicerídeos, acompanhada por um aumento nas lipoproteínas de alta densidade (Chithra; Leelamma, 1997). Paralelamente, a atividade antidiabética manifesta-se por meio da estimulação da secreção de insulina pelas células beta pancreáticas e pelo aumento da captação de glicose nos tecidos periféricos, mimetizando ou potencializando a ação insulínica (Gray; Flatt, 1999).

Finalmente, as atividades neurofarmacológicas e cardiovasculares expandem o escopo clínico desta espécie. O extrato de coentro apresenta efeitos ansiolíticos e sedativos comparáveis a fármacos de referência, como o diazepam, sem os efeitos colaterais motores típicos (Emamghoreishi et al., 2005). No sistema cardiovascular, o *C. sativum* exerce ação hipotensora e diurética mediada pela ativação de canais de potássio e antagonismo de canais de cálcio, promovendo vasodilação e redução da resistência vascular periférica (Jabeen et al., 2009; Nadeem et al., 2013; Paarakh, 2009). Esses dados corroboram o uso tradicional e impulsionam o desenvolvimento de fitoterápicos baseados em coentro.

Singh et al. (2021) destacam que extratos de coentro combinados com nanopartículas metálicas podem apresentar atividade alelopática mais pronunciada sobre a germinação de plantas daninhas. Essa observação justifica o uso de *C. sativum* como espécie-modelo em ensaios de germinação, pois permite avaliar se nanomateriais obtidos por rota verde interferem na dinâmica germinativa de uma espécie de interesse agrônomo.

3.10 *Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. & Nakai (melancia)

A classificação taxonômica da melancia é fundamental para a distinção entre as formas cultivadas e seus parentes silvestres. A espécie *Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. & Nakai pertence à família Cucurbitaceae, inserida na ordem Cucurbitales dentro da classe Magnoliopsida. Historicamente, a nomenclatura da espécie passou por revisões significativas; originalmente descrita como *Momordica lanata* por Thunberg em 1794, foi posteriormente reclassificada para o gênero *Citrullus* por Matsumura e Nakai em 1916 (Fursa, 1972; Nakai, 1943). Esta organização sistemática é crucial para o delineamento de estratégias de melhoramento genético e conservação de germoplasma (Fehér, 1993).

No âmbito da diversidade infraespecífica, pesquisadores como Fursa (1972) propuseram a divisão da espécie em subespécies e variedades para acomodar a vasta variabilidade genética. Destacam-se as subespécies *Citrullus lanatus* subsp. *vulgaris*, que compreende as variedades

cultivadas de polpa doce, e a subsp. *lanatus*, que engloba tipos ancestrais e silvestres (Fursa, 1972). A correta identificação taxonômica permite a exploração de parentes próximos, como *Citrullus colocynthis*, como fontes de genes de resistência a estresses bióticos e abióticos (Jeffrey, 1980).

A origem geográfica de *Citrullus lanatus* é majoritariamente associada ao continente africano, especificamente às zonas áridas e semiáridas. Teorias clássicas postulam que o centro de domesticação inicial se localiza na região do Kalahari, na África Austral, onde a planta era historicamente utilizada como uma reserva vital de água durante as estações secas (Davis; Whitaker, 1962). No entanto, evidências filogenéticas mais recentes sugerem que o Nordeste e o Oeste da África desempenharam papéis fundamentais como centros de diversificação primária, de onde a cultura se expandiu para o Vale do Nilo e, posteriormente, para o Mediterrâneo e a Ásia (Lim, 2016).

Atualmente, a melancia apresenta uma distribuição cosmopolita, sendo cultivada em larga escala em regiões tropicais, subtropicais e temperadas quentes. A espécie ocupa uma posição de destaque na olericultura mundial, com a China consolidando-se como o maior produtor global, seguida por países como Turquia, Irã e Brasil (Fehér, 1993). A ampla dispersão geográfica é resultado da notável plasticidade adaptativa da planta, que prospera em solos arenosos e bem drenados, exigindo elevada radiação solar e temperaturas consistentes para o desenvolvimento pleno e maturação dos frutos (Lim, 2016).

Botanicamente, *Citrullus lanatus* caracteriza-se como uma planta herbácea anual, de hábito prostrado ou trepador, com caules estriados que podem atingir até 10 metros de comprimento. Os caules e pecíolos são densamente cobertos por tricomas vilosos, conferindo-lhes uma textura áspera (Davis; Whitaker, 1962). As folhas exibem um dimorfismo marcante e são profundamente lobadas, apresentando de 3 a 5 divisões pinatissectas que auxiliam na regulação térmica e na eficiência fotossintética sob condições de estresse hídrico (Lim, 2016). O sistema radicular é pivotante e extremamente vigoroso, permitindo a exploração de camadas profundas do solo para a absorção de nutrientes (Fehér, 1993).

A morfologia reprodutiva da espécie é predominantemente monoica, com flores solitárias e actinomorfas de coloração amarela que emergem nas axilas foliares. O fruto é botanicamente classificado como um pepo, de formato globoso a oblongo, possuindo uma casca lisa e resistente que protege a polpa suculenta (Lim, 2016). Internamente, o fruto abriga numerosas sementes achatadas e ovadas, cujas cores variam de branco a negro conforme a variedade, sendo caracterizadas por altos teores de lipídios e proteínas (Lim, 2016). A estrutura

do fruto evoluiu para garantir a dispersão das sementes, consolidando a melancia como um recurso nutricional estratégico em diversos biomas (Fehér, 1993)

A caracterização fitoquímica de *Citrullus lanatus* revela um perfil complexo de metabólitos primários e secundários distribuídos em diferentes partes da planta. A polpa é rica em água, açúcares e carotenoides, enquanto sementes e cascas apresentam proteínas, lipídios, compostos fenólicos e outros metabólitos de interesse nutricional e funcional.

Além do aporte nutricional básico, a melancia destaca-se pela presença de carotenoides, sendo o licopeno o pigmento predominante em variedades de polpa vermelha. A concentração de licopeno em *C. Lanatus* pode superar a encontrada em tomates, variando conforme o genótipo e o estágio de maturação (Fehér, 1993; Lim, 2016). Adicionalmente, as sementes da espécie são ricas em proteínas globulares e lipídios, apresentando uma fração oleaginosa composta majoritariamente por ácidos graxos insaturados, além de compostos fenólicos e flavonoides que contribuem para a estabilidade química do fruto (Wani et al., 2011).

O uso terapêutico de *C. lanatus* é amplamente documentado em sistemas de medicina tradicional, onde diferentes partes da planta são empregadas para o manejo de diversas enfermidades. Historicamente, o fruto é valorizado por sua ação refrescante e diurética, sendo indicado para o tratamento de afecções renais e urinárias, como a urolitíase (cálculos renais) e a cistite (Lim, 2016). A elevada proporção de água e o equilíbrio eletrolítico do fruto auxiliam na purificação do sangue e na redução da pressão arterial, propriedades reconhecidas tanto na etnofarmacologia africana quanto asiática (Fehér, 1993).

As sementes de melancia também possuem aplicações medicinais específicas, sendo tradicionalmente utilizadas como agentes anti-helmínticos e para o tratamento de hipertensão arterial. O extrato das sementes tem sido associado à melhora de distúrbios geniturinários e à redução de inflamações prostáticas (Fehér, 1993; Lim, 2016). Essa versatilidade medicinal decorre da interação sinérgica entre seus componentes bioativos, consolidando a espécie como um alimento funcional de alto valor preventivo contra doenças crônicas relacionadas ao estilo de vida (Lim, 2016).

A investigação científica das atividades biológicas de *C. lanatus* confirma seu potencial antioxidante e citoprotetor. A presença de licopeno e ácido ascórbico (vitamina C) confere ao extrato do fruto a capacidade de sequestrar radicais livres de oxigênio, mitigando o estresse oxidativo e protegendo as membranas celulares contra a peroxidação lipídica (Lim, 2016). Esse perfil antioxidante é fundamental para a redução do risco de doenças degenerativas e de certos tipos de neoplasias, conforme evidenciado em estudos epidemiológicos citados na literatura clássica (Fehér, 1993).

No âmbito cardiovascular, a atividade biológica da melancia é fortemente mediada pela citrulina, que atua como um potente agente vasoprotetor. A conversão endógena de citrulina em arginina promove a síntese de óxido nítrico, um regulador crítico do tônus vascular que induz a vasodilação e melhora a função endotelial (Romero et al., 2006). Adicionalmente, estudos realizados com proteínas isoladas das sementes demonstraram atividades anti-inflamatórias e antimicrobianas, sugerindo que os subprodutos do processamento da melancia possuem potencial biotecnológico significativo para a indústria farmacêutica (Wani et al., 2011).

Estudos indicam que a melancia pode ser influenciada por compostos alelopáticos liberados por plantas daninhas, mas também pode liberar substâncias capazes de interferir na germinação e no crescimento de outras espécies. No presente trabalho, sua inclusão como espécie-teste permite comparar respostas germinativas entre uma hortaliça aromática e uma cucurbitácea de interesse agrícola, ampliando a interpretação dos efeitos do extrato e das AgNPs.

4 METODOLOGIA

4.1 Coleta do vegetal e preparo do extrato de *Endopleura uchi*

O caule seco de *Endopleura uchi* foi adquirido em comércio local no município de Itacoatiara, Amazonas, Brasil (03°08'01,65"S; 58°26'19,04"W). Para o preparo do extrato, 1,0 g do material vegetal seco foi pesado em balança analítica e transferido para um béquer contendo 100 mL de água destilada.

A mistura foi aquecida a 50 °C e, em seguida, submetida à trituração em liquidificador para favorecer a extração dos constituintes solúveis do caule. Após esse procedimento, a solução foi filtrada e acondicionada para uso nas etapas subsequentes, conforme o esquema apresentado na Figura 2.

Figura 2: Preparo do extrato de *Endopleura uchi*.



Fonte: A autora (2024).

4.2 Teste de estabilidade do extrato vegetal

Para avaliar a estabilidade do extrato, a solução concentrada foi diluída na proporção de 1: 10, utilizando-se 1 mL do extrato e 9 mL de água destilada. A primeira leitura foi realizada 2 h após o preparo, por espectroscopia UV-Vis. Em seguida, novas leituras foram conduzidas em intervalos definidos, permitindo acompanhar alterações espectrais associadas à estabilidade ou degradação dos constituintes presentes no extrato.

4.3 Teste de prospecção fitoquímica

A prospecção fitoquímica foi realizada conforme a metodologia descrita por Matos (2009). O extrato aquoso preparado conforme o item 4. 1 foi submetido a reações qualitativas com reagentes convencionais para detecção de classes de metabólitos secundários, incluindo fenóis, taninos, antocianinas, antocianidinas, flavonoides, leucoantocianidinas, catequinas, flavonas, terpenos, saponinas e alcaloides.

4.3.1 Teste para fenóis e taninos

Foram separados seis tubos de ensaio, e em cada um deles foi adicionado 1 mL do extrato com auxílio de pipeta graduada.

Ao tubo 1 foram adicionadas três gotas de cloreto férrico (1%). Em seguida, observou-se a variação de cor da solução, considerando-se que a presença de fenóis pode ser indicada por

coloração azulada ou avermelhada, enquanto taninos podem produzir coloração azul-escura ou esverdeada, conforme a natureza dos compostos presentes.

Tabela 1: Constituintes químicos e cor.

Cor Esperada	
Fenóis	Variável entre azul e vermelho
Taninos	Precipitado azul escuro

Fonte: A autora (2024).

4.3.2 Teste para antocianinas, antocianidinas e flavonoides

Ao tubo 2 foram adicionadas 3 gotas da solução de HCl (0,1 M) a fim de ajustar o pH para 3. O pH da solução presente no tubo 3 foi ajustado para 8,5 utilizando a solução de NaOH (0,1 M). O pH da solução do tubo 4 foi ajustado para 11 com solução de NaOH (0,1M). Observou-se a mudança de coloração conforme a tabela 2 a seguir:

Tabela 2: Relação dos constituintes e cores esperadas.

Constituintes	Cor em meio		
	Ácido ⁽³⁾	Alcalino ^(8,5)	Alcalino ⁽¹¹⁾
Antocianinas e Antocianidinas	Vermelha	Lilás	Azul-púrpura
Flavonas	-	-	Amarela
Chalconas e auronas	Vermelha	-	Verm. Púrpura
Flavanonol	-	-	Verm. Laranja

Fonte: A autora (2024).

4.3.3 Teste para leucoantocianidinas, catequinas e flavonas

O pH da solução contendo extrato no tubo 5 foi ajustado para 3 utilizando a solução de HCl (0,1 M) e o pH da solução do tubo 6 foi ajustado para 11 utilizando a solução de NaOH (0,1 M). Após isso, os tubos foram aquecidos por dois minutos em banho maria e observou-se a variação da cor das soluções dos tubos conforme visto na tabela 3:

Tabela 3: Relação dos constituintes e cores esperadas.

Constituintes	Cor em meio	
	Ácido	Alcalino
Leucoantocianidinas	Vermelha	-
Catequinas (Taninos Catéquicos)	Pardo Amarelada	-
Flavonas	-	Verm. Laranja

Fonte: A autora (2024).

A avaliação confirmatória de heterosídeos flavonoides e taninos foi conduzida por duas reações complementares, descritas a seguir.

Reação oxalo-bórica (reação de Taubouk) para flavonoides: com auxílio de pipeta volumétrica, 8 mL da solução aquosa foram transferidos para um béquer. Em seguida, adicionaram-se 3 mL de solução de ácido bórico a 3% (m/v) e 2 mL de solução de ácido oxálico a 5% (m/v). A mistura foi evaporada até secura, e o resíduo obtido foi avaliado sob radiação UV para verificação de fluorescência característica.

Reações qualitativas para taninos: para a identificação de taninos, 2 mL do extrato foram solubilizados em 1 mL de metanol. Em seguida, adicionaram-se 2 mL de água destilada, e a solução foi filtrada em funil com papel de filtro. Posteriormente, o filtrado foi submetido aos reagentes confirmatórios descritos na metodologia, avaliando-se as alterações de cor ou precipitação.

4.3.4 Teste para identificação de terpenos (Liebermann-Burchard)

Inicialmente, 2 mL do extrato aquoso foram pipetados e lavados três vezes com clorofórmio para solubilização de substâncias apolares. Em seguida, a solução foi filtrada em funil com papel de filtro, e a fase orgânica foi submetida à reação de Liebermann-Burchard, observando-se a formação de coloração indicativa da presença de terpenos.

4.3.5 Teste para identificação de saponinas

Inicialmente, 5 mL do extrato aquoso foram coletados com pipeta graduada e lavados três vezes com 10 mL de clorofórmio, a fim de remover substâncias apolares. A solução obtida foi transferida para dois tubos de ensaio identificados e submetida aos testes geral e confirmatório para saponinas, conforme os critérios de formação e persistência de espuma e reação específica.

Tabela 4: Relação dos constituintes e cores esperadas.

	Cor Esperada
Saponinas Esteroidais	Azul evanescente
Saponinas Triterpênicas	Vermelho

Fonte: A autora (2024)

4.3.6 Teste para identificação de alcaloides

Para identificação de alcaloides, 2 mL do extrato aquoso foram solubilizados em 10 mL de água destilada, e o pH foi ajustado para 4–5 com HCl 0,1 mol L⁻¹. A solução foi filtrada, e o filtrado foi submetido aos reagentes específicos para alcaloides, observando-se a formação de precipitado ou coloração característica.

4.4 Produção e estabilidade das nanopartículas de prata

Em béqueres revestidos com papel alumínio, para minimizar a incidência de luz, foram adicionados 99 mL de solução de AgNO₃ na concentração de 1×10^{-4} mol L⁻¹. Empregou-se um delineamento fatorial completo 2³ para avaliar os efeitos de pH, temperatura e concentração do extrato na formação das AgNPs. O extrato de *E. uchi* foi adicionado conforme as condições experimentais estabelecidas na matriz fatorial.

A estabilidade das AgNPs foi avaliada por espectroscopia UV-Vis, com monitoramento da banda associada à ressonância de plásmon de superfície, localizada próxima a 400 nm (Noguez, 2007), em intervalos de tempo definidos. A manutenção da posição e da intensidade da banda foi utilizada como indicativo da estabilidade coloidal e da evolução do sistema ao longo do tempo.

4.4.1 Análise estatística

Para estabilizar a variância e aproximar a normalidade, os valores de absorbância foram submetidos à transformação logarítmica de base 10. A normalidade dos resíduos foi avaliada pelos testes de Shapiro–Wilk e Anderson–Darling; a homocedasticidade foi examinada pelos testes de Levene, Bartlett, Breusch–Pagan e White.

Devido à detecção de heterocedasticidade, a inferência primária baseou-se em uma ANOVA tipo III com erros padrão robustos (HC3), recomendados para amostras de tamanho

reduzido. O modelo incluiu todos os efeitos principais (pH, concentração, temperatura) e os termos de interação de segunda e terceira ordens.

Para validar a robustez das inferências, os resultados foram comparados com múltiplos métodos estatísticos projetados para dados heterocedásticos: Mínimos Quadrados Generalizados (GLS) com variâncias específicas por tratamento (varIdent); erros padrão cluster-robustos (CR2) para controlar possíveis efeitos de lote; bootstrap paramétrico (1000 reamostragens) para distribuições dos coeficientes e intervalos preditivos; e análise de sensibilidade a transformações alternativas (raiz quadrada, raiz cúbica).

Os tamanhos de efeito são reportados como eta-quadrado parcial com intervalos de 95% de confiança derivados dos erros padrão robustos. Comparações múltiplas post hoc entre as oito médias foram realizadas pelos testes de Tukey HSD e Duncan, aplicados na escala original para facilitar a interpretação.

Por fim, um modelo linear preditivo contendo todos os efeitos fatoriais foi ajustado aos dados transformados. Devido à indisponibilidade de um conjunto externo independente para validação, procedeu-se à validação interna extensiva: validação cruzada 5-fold repetida 100 vezes, leave-one-out cross-validation (LOOCV) e validação bootstrap (1000 iterações). As métricas calculadas incluíram R^2 preditivo, raiz do erro quadrático médio (RMSE), erro absoluto médio (MAE) e cobertura dos intervalos de predição de 95%. O poder estatístico post hoco foi calculado com base nos tamanhos de efeito observados.

Para selecionar a transformação mais adequada, foram avaliados cinco candidatos (original, $\log_{10}$, log natural, raiz quadrada e raiz cúbica) quanto ao atendimento dos pressupostos de normalidade (Shapiro–Wilk) e homocedasticidade (Levene), bem como à redução do coeficiente de variação, como descritos na Tabela 5:

Tabela 5: Comparação do desempenho de diferentes transformações nos testes de pressupostos estatísticos para os dados de absorbância (AgNPs).

Transformação	Shapiro–Wilk (p)	Levene (p)	CV (%)	Escore ⁱ
Original	0,0016	0,7525	97,3	2
$\log_{10}$	0,1410	0,8005	52,5	5
Log natural	0,1410	0,8005	52,5	5
Raiz quadrada	0,0497	0,9162	53,8	3

Transformação	Shapiro–Wilk (p)	Levene (p)	CV (%)	Escore ⁱ
Raiz cúbica	0,1016	0,9364	36,8	5

Fonte: A autora (2026).

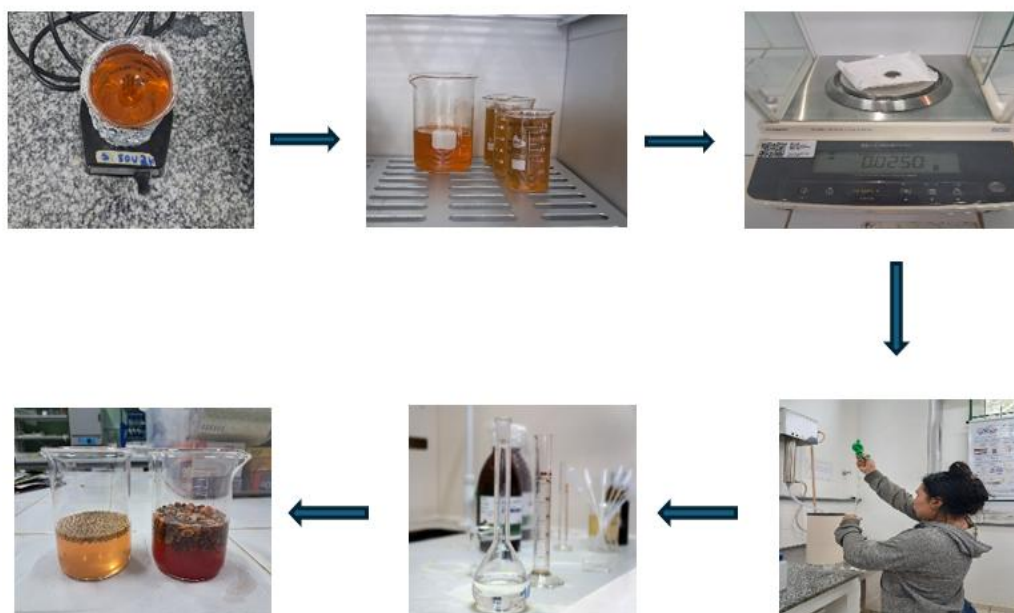
4.5 Atividade alelopática

4.5.1 Preparo das soluções

Inicialmente, preparou-se o extrato aquoso de *Endopleura uchi* a 0,1%. Em seguida, foram preparadas soluções de nanopartículas de prata nas concentrações de 25, 50 e 100 $\mu\text{g mL}^{-1}$, diluídas em 100 mL de água destilada. A água destilada foi utilizada como controle negativo.

Foram utilizadas sementes de *Coriandrum sativum* L. (coentro) e *Citrullus lanatus* (melancia), adquiridas de fornecedor local no município de Itacoatiara, Amazonas, Brasil. As sementes foram previamente higienizadas e submetidas aos ensaios de germinação nas condições descritas a seguir.

Figura 3: Preparo das soluções para atividade alelopática.

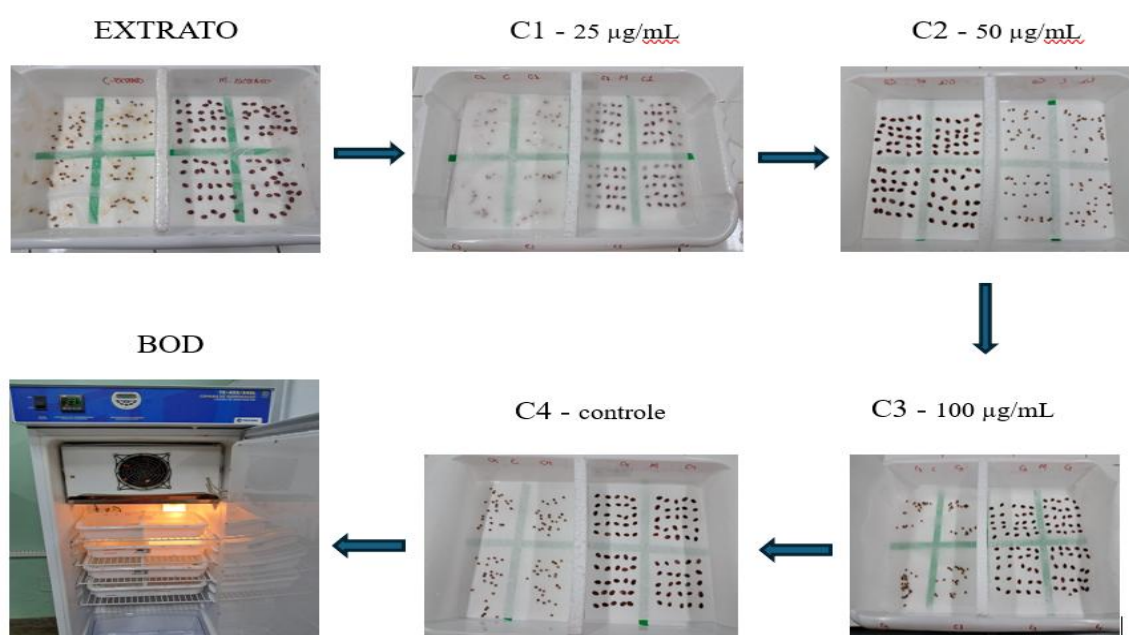


Fonte: A autora (2025).

4.5.2 Bioensaio de germinação

O bioensaio de germinação foi realizado no laboratório da Universidade do Estado do Amazonas (UEA). Foram utilizadas cinco bandejas contendo quatro folhas de papel-filtro, em delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições por tratamento. As sementes foram distribuídas uniformemente sobre o substrato umedecido com as soluções correspondentes. Como podemos observar na Figura 4:

Figura 4: Sementes de melancia e coentro organizadas nas bandejas com concentrações de AgNPs / extrato aquoso de *Endopleura uchi* / controle (água destilada).



Fonte: A autora (2025).

Na semeadura, as soluções de AgNPs nas concentrações de 25, 50 e 100 µg mL⁻¹ foram aplicadas nas bandejas correspondentes, mantendo contato direto com as sementes. As unidades experimentais foram acondicionadas em câmara de germinação BOD, sob condições controladas de temperatura e fotoperíodo, conforme o protocolo adotado para os ensaios.

- T1: nanopartículas de prata a 25 µg mL⁻¹;
- T2: nanopartículas de prata a 50 µg mL⁻¹;
- T3: nanopartículas de prata a 100 µg mL⁻¹;
- T4: controle com água destilada;
- T5: extrato aquoso de *Endopleura uchi*.

4.5.3 Monitoramento e análise de parâmetros germinativos

As sementes germinadas foram contadas diariamente durante 14 dias, conforme apresentado na Tabela 6. Considerou-se germinada a semente que apresentou protrusão da radícula igual ou superior a 2 mm. Ao final do experimento, foram calculados parâmetros de germinação e vigor, permitindo avaliar não apenas a porcentagem final de germinação, mas também a velocidade, a uniformidade e a distribuição temporal do processo.

Tabela 6: Contagem de germinação em função dos dias.

Coentro																
Trat.	Rép.	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	Total
T01	1	0	0	0	0	0	0	10	6	6	1	0	0	0	0	23
T01	2	0	0	0	0	0	3	15	3	1	1	0	0	0	0	23
T01	3	0	0	0	0	0	1	14	8	1	1	0	0	0	0	25
T01	4	0	0	0	0	0	3	15	7	0	0	0	0	0	0	25
T02	1	0	0	0	0	0	0	0	7	3	10	1	0	0	0	21
T02	2	0	0	0	0	0	0	8	15	0	0	0	0	0	0	23
T02	3	0	0	0	0	0	0	6	14	3	1	0	0	0	0	24
T02	4	0	0	0	7	0	0	8	7	2	1	0	0	0	0	25
T03	1	0	0	0	1	10	2	2	0	2	4	1	0	0	0	22
T03	2	0	0	0	10	12	0	0	0	0	0	1	0	0	0	23
T03	3	0	0	0	12	12	0	0	0	0	0	1	0	0	0	25
T03	4	0	0	0	22	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25
T04	1	0	0	0	0	6	0	0	12	2	3	1	0	0	0	24
T04	2	0	0	0	7	5	0	0	8	0	2	2	0	0	0	24
T04	3	0	0	0	8	0	0	7	7	1	0	1	0	0	0	24
T04	4	0	0	0	12	6	1	0	1	3	0	1	0	0	0	24
T05	1	0	0	4	5	6	5	2	0	1	0	0	0	0	0	23
T05	2	0	0	1	7	8	3	5	0	1	0	0	0	0	0	25
T05	3	0	0	1	4	5	3	6	0	1	0	0	0	0	0	20
T05	4	0	0	4	5	6	3	4	3	0	0	0	0	0	0	25
Melancia																
T01	1	0	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0	0	25
T01	2	0	0	0	0	0	0	12	8	0	0	0	0	0	0	20
T01	3	0	0	0	0	0	0	21	3	0	1	0	0	0	0	25
T01	4	0	0	0	0	0	0	21	1	1	0	0	0	0	0	23
T02	1	0	0	0	0	0	0	10	12	0	0	0	0	0	0	22
T02	2	0	0	0	0	0	0	18	4	0	0	0	0	0	0	22
T02	3	0	0	0	0	0	0	7	17	0	0	0	0	0	0	24
T02	4	0	0	0	0	0	0	15	9	0	0	0	0	0	0	24
T03	1	0	0	0	1	11	6	5	0	0	0	0	0	0	0	23
T03	2	0	0	0	9	13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	23
T03	3	0	0	0	0	14	0	4	4	0	0	0	0	0	0	22
T03	4	0	0	0	8	7	0	4	1	0	0	0	0	0	0	20
T04	1	0	0	1	9	13	0	1	0	0	0	0	0	0	0	24

Coentro																
Trat.	Rép.	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	Total
T04	2	0	0	7	12	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	23
T04	3	0	0	2	1	14	4	2	0	0	0	0	0	0	0	23
T04	4	0	0	7	11	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	24
T05	1	0	0	0	5	3	2	6	0	0	0	0	0	0	0	16
T05	2	0	0	0	4	6	4	5	0	0	0	0	0	0	0	19
T05	3	0	0	0	3	2	7	8	0	0	0	0	0	0	0	20
T05	4	0	0	2	6	5	2	5	0	0	0	0	0	0	0	20

Fonte: A autora (2026).

A partir desses dados primários, diversos índices de germinação e vigor foram calculados de acordo com fórmulas estabelecidas (Maguire 1962; Fetouh e Hassan 2014; Almutairi e Alharbi 2015; Ochoa-Chaparro et al. 2025), conforme mostrado nas equações abaixo:

Porcentagem final de germinação (GP%):

$$PG\% = \left(\frac{N_i}{N}\right) \times 100$$

Tempo médio de germinação (TMG):

$$TMG = \frac{\sum N_i T_i}{N}$$

onde: N: número total de sementes usadas no experimento; Ni: número de sementes germinadas no dia T.

Índice de velocidade de germinação (IGV):

$$IVG = \sum \frac{N_i}{T_i}$$

Velocidade de germinação (GV):

$$GV = \frac{1}{MGT}$$

Comprimento da raiz primária (PRL):

$$PRL = \frac{\Sigma(\text{comprimento da raiz primária individual})}{\text{Número total de plântulas normais medidas}}$$

4.5.4 Modelo estatístico para análise da germinação

A análise dos parâmetros de germinação seguiu um delineamento inteiramente casualizado fatorial 2×5 (duas espécies $\times$ cinco tratamentos), totalizando 40 unidades experimentais (4 réplicas por combinação). Os pressupostos de normalidade dos resíduos e homocedasticidade foram avaliados pelos testes de Shapiro–Wilk e Levene, respectivamente, para cada variável resposta. Quando necessário, aplicaram-se transformações (log10, raiz quadrada, raiz cúbica) para atender aos pressupostos, como podemos observar na Tabela 7. Posteriormente, as análises foram conduzidas utilizando modelos lineares e mistos, e nível de significância adotado foi de 5% ($\alpha = 0,05$).

Tabela 7: Desempenho de transformações para variáveis de germinação.

Variável	Transformação	Shapiro–Wilk (p)	Levene (p)	CV (%) ¹	Normalidade ²	Homocedasticidade ²
FGP	log10	0,0073	0,6274	8,5	Não	Sim
MGT	raiz quadrada	0,0492	0,4318	26,9	Não	Sim
IVG	Nenhuma	0,4963	0,5873	26,4	Sim	Sim
T50	raiz cúbica	0,0501	0,6574	24,4	Não	Sim
U	raiz cúbica	5,04e-05	0,4329	54,1	Não	Sim
H	Nenhuma	0,0042	0,3407	42,9	Não	Sim
Z	log10	0,4755	0,6079	48,5	Sim	Sim
SYN	log10	0,4755	0,6079	48,5	Sim	Sim
GI	log10	0,4146	0,6925	51,2	Sim	Sim
AUC	Nenhuma	0,5364	0,9378	23,3	Sim	Sim

Fonte: A autora (2026).

As variáveis que atenderam aos pressupostos foram submetidas à ANOVA fatorial (modelo fixo: Espécie $\times$ Tratamento), seguida do teste post hoc de Tukey ($\alpha = 0,05$) para comparações múltiplas. Para as variáveis com violação de pressupostos mesmo após transformação, utilizou-se o teste não paramétrico de Kruskal–Wallis complementado pelo teste de Dunn.

Adicionalmente, modelos mistos lineares foram ajustados para as principais variáveis (FGP, IVG, MGT, AUC) considerando o fator Réplica como efeito aleatório, confirmando os efeitos fixos de Espécie e Tratamento e suas interações. Um modelo de regressão stepwise também foi construído para a variável FGP, incluindo covariáveis como MGT, IVG, H, Z, GI, GE, AUC, entre outras, explicando 99,9% da variância.

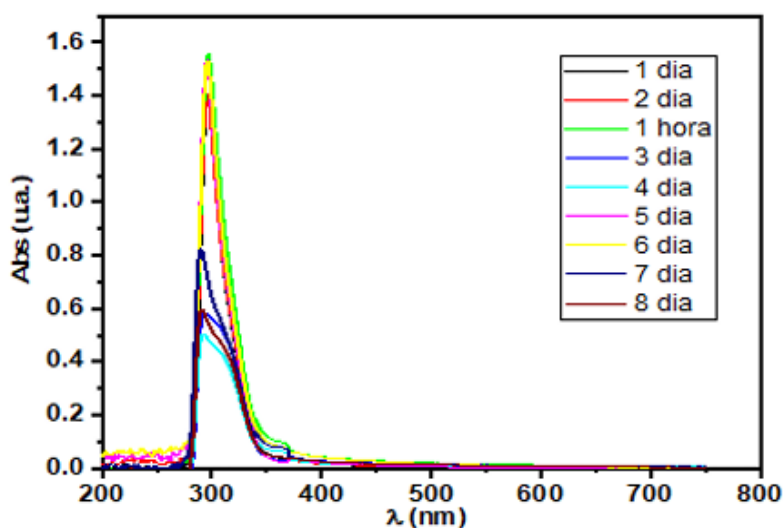
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização do extrato aquoso de *Endopleura uchi* por espectroscopia UV-Vis

A caracterização inicial do extrato aquoso de *Endopleura uchi* por espectroscopia UV-Vis permitiu acompanhar o perfil de absorção dos constituintes solúveis presentes no material vegetal. Essa análise é relevante porque compostos fenólicos, flavonoides, taninos e outros metabólitos secundários apresentam transições eletrônicas na região do ultravioleta e podem atuar como agentes redutores e estabilizantes na síntese verde de nanopartículas metálicas.

Frente a isso, tornou-se fundamental realizar o monitoramento por meio de espectroscopia eletrônica UV-Vis no extrato aquoso de *Endopleura uchi*, a fim de avaliar sua estabilidade. O espectro de absorção na figura 5 plotada a seguir apresenta os comprimentos de onda do extrato produzido.

Figura 5: Espectro eletrônico do extrato aquoso de *Endopleura uchi* em função do tempo.



Fonte: A autora (2024).

Observou-se que o extrato apresentou uma banda de absorção entre 250 e 350 nm. Essa região é compatível com a presença de metabólitos secundários contendo sistemas aromáticos e grupos cromóforos, como compostos fenólicos, flavonoides e taninos. Esses grupos são quimicamente relevantes para a síntese verde, pois podem participar de reações de oxirredução e de interações superficiais com a prata metálica durante a formação das AgNPs.

A análise do espectro UV-Vis nos permite observar que em cada um dos comprimentos de onda é possível encontrarmos uma classe de metabólitos secundários presente no extrato aquoso de *Endopleura uchi*.

Assim, o perfil espectral do extrato sugere a presença de constituintes capazes de participar da redução de Ag⁺ e da estabilização das nanopartículas formadas. Entretanto, a espectroscopia UV-Vis, isoladamente, não permite identificar de forma inequívoca todos os metabólitos presentes. Por essa razão, a prospecção fitoquímica foi empregada como etapa complementar para qualificar as classes de compostos presentes no extrato.

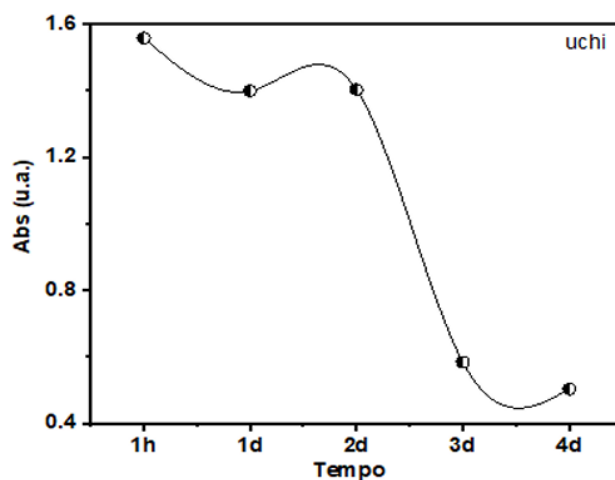
Na análise do espectro é possível observarmos um comprimento de onda situado entre 200nm e 300 nm característico para a presença de saponinas. O estudo realizado por Abreu et al. (2013) descreve a presença de saponinas triterpênicas no extrato dos caules de *Endopleura uchi* visualizadas em comprimento de onda de 254nm marcada pela presença de anéis condensados um ao outro.

Nos comprimentos de onda situados entre 220 e 300 nm é possível analisarmos que esse pico é indicativo para a presença de compostos fenólicos como os taninos, substâncias conhecidas por sua atividade farmacológica. Os estudos realizados por Lopes et al. (2012) corroboram com estes dados apresentados na análise UV-Vis assim como os estudos realizados por Pinheiro & Rosario, 2006; Politi, 2011. Na análise espectroscópica é possível analisarmos a presença de um pico característico de catequinas situado entre 220 e 300 nm também reportados por Abdelghffar et al. (2024).

5.2 Estabilidade do extrato aquoso de *Endopleura uchi*

O monitoramento temporal do extrato aquoso mostrou variações no perfil espectral ao longo dos dias avaliados. A partir do segundo dia, observou-se redução da intensidade de absorção, indicando possível degradação, oxidação ou reorganização dos metabólitos presentes no extrato. Esse resultado demonstra que o tempo de armazenamento é uma variável crítica para a reprodutibilidade da síntese verde.

Figura 6: Comprimento máximo de absorção do extrato aquoso de *Endopleura uchi* em função do tempo.



Fonte: A autora (2024).

A estabilidade limitada do extrato reforça a necessidade de padronizar o intervalo entre o preparo e o uso experimental. Para rotas de síntese verde, variações na composição do extrato podem alterar a capacidade redutora, a nucleação das nanopartículas e a estabilidade coloidal final. Dessa forma, os resultados indicam que o extrato deve ser preferencialmente utilizado em curto intervalo após o preparo, ou submetido a condições controladas de armazenamento quando seu uso posterior for necessário.

No espectro apresentado é possível notarmos que na primeira hora o extrato apresentou uma absorbância de 1.6 isso é característico de extratos concentrados. Um dos possíveis fatores responsáveis por essa extração é a temperatura, um estudo realizado por Mariot; Barbieri, 2007; Silva; Da Cunha, 2021 constataram que o teor da extração e a quantidade dos metabólitos e a estabilidade dos extratos pode variar com o aumento da temperatura.

O extrato de *Endopleura uchi* apresentou uma baixa estabilidade após a sua duração de dois dias os quais foram o período que se mantiveram dentro da faixa de 1.4 (u. a). Essa baixa durabilidade após os dois dias pode estar associada as interações existentes entre o soluto e o solvente as quais são capazes de modificar diferentes características nas bandas de absorção UV/Vis de uma dada substância, tais como: posição, intensidade e formato das bandas de absorção (Borges, 1994).

5.3 Perfil fitoquímico do extrato aquoso de *Endopleura uchi*

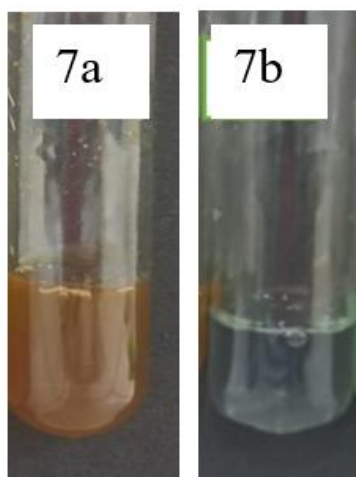
A prospecção fitoquímica do extrato aquoso de *Endopleura uchi* indicou a presença de diferentes classes de metabólitos secundários. Do ponto de vista da síntese verde, esse resultado

é relevante porque a diversidade de compostos pode favorecer mecanismos complementares de redução do precursor metálico e estabilização das nanopartículas, além de contribuir para respostas biológicas associadas à atividade alelopática.

5.3.1. Teste para fenóis e taninos

Neste primeiro teste realizado para fenóis e taninos é possível notar que esta classe de metabólitos foi avaliada positivamente para a ambas as classes conforme visto na figura 7 sendo estes identificados em 7a e 7b.

Figura 7: Reação qualitativa para fenóis e taninos: 7 a) Fenóis e 7 b) Taninos.



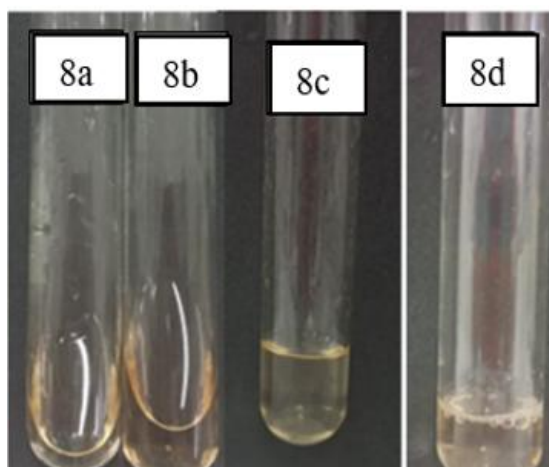
Fonte: A autora (2024).

Os compostos fenólicos presentes em *Endopleura uchi* vem sendo explorados devido a suas diversas propriedades farmacológicas. Os estudos realizados por Nunomura et al. (2009) revelaram que os extratos das cascas de *Endopleura uchi* são ricos em polifenóis, taninos e flavonoides assim como possui potencial anti-inflamatório em virtude do alto teor de bergenina, composto majoritário presente no caule da espécie.

5.3.2 Teste para antocianinas, antocianidinas e flavonoides

No teste para antocianinas, antocianidinas e flavonoides, observou-se resultado positivo apenas para flavonas no terceiro tubo de ensaio, conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8: Reação qualitativa para Antocianinas, antocianidinas e flavonoides: 8a (-), 8b (-) 8c (+ flavonas) e 8d (-).



Fonte: A autora (2024).

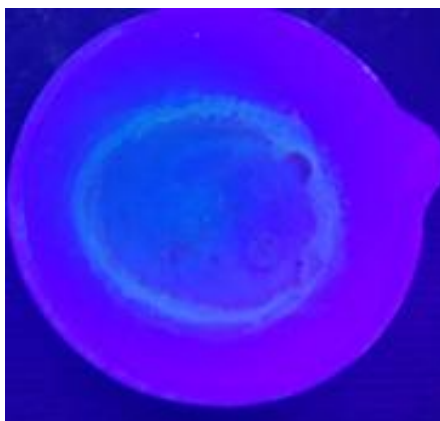
O resultado positivo para flavonas foi evidenciado pela formação de coloração amarelada intensa. Esse achado é coerente com estudos que descrevem, em espécies vegetais ricas em metabólitos fenólicos, a ocorrência de ácidos fenólicos, cumarinas, flavonoides e taninos condensados ou hidrolisáveis. No caso de *E. uchi*, a presença dessas classes também dialoga com os relatos de Nunomura et al. (2009), que destacam a relevância fitoquímica da espécie.

5.3.3 Teste para leucoantocianidinas, catequinas e flavonas

No teste de prospecção fitoquímica para leucoantocianidinas, catequinas e flavonas, o extrato de *Endopleura uchi* apresentou resultado positivo para catequinas, evidenciado pela formação de coloração amarelada. Esse resultado é relevante porque catequinas e compostos fenólicos relacionados podem atuar como doadores de elétrons e contribuir para processos de redução metálica em rotas de síntese verde.

No teste confirmatório, a reação oxalo-bórica produziu coloração compatível com a presença de flavonoides, conforme apresentado na Figura 9. Essa reação é útil porque complexos formados entre compostos fenólicos e espécies contendo boro podem modificar a fluorescência e auxiliar na confirmação qualitativa dessa classe de metabólitos.

Figura 9: Reação confirmatória para identificação de flavonoides.



Fonte: A autora, (2024)

A Figura 9 mostra o extrato aquoso de *Endopleura uchi* após reação oxalo-bórica, com formação de coloração verde fluorescente, indicativa da presença de flavonoides.

A reação oxalo-bórica com flavonoides envolve etapas de complexação descritas a seguir.

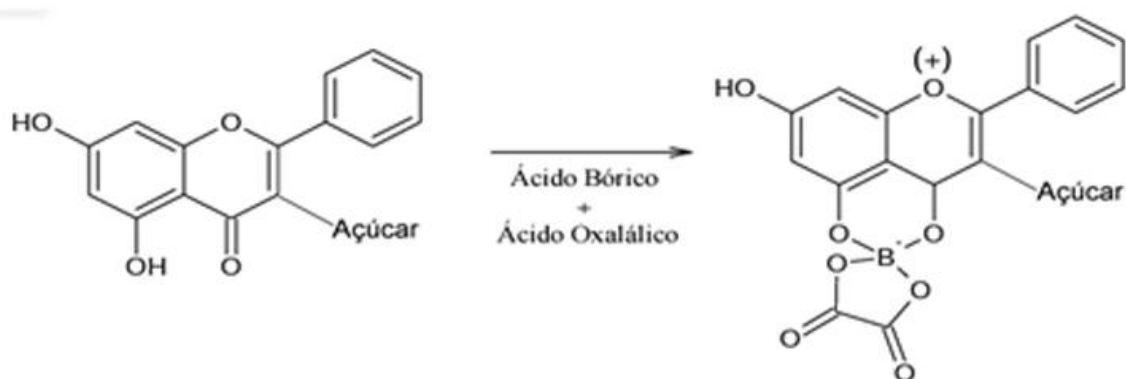
1ª) Ativação do Flavonoide: Os flavonoides possuem grupos funcionais em sua estrutura como as hidroxilas ($-OH$), as quais são capazes de formar ligações de hidrogênio e interagir com o ácido bórico.

2ª) Formação do Complexo: O ácido bórico (H_3BO_3) em seu estado fundamental pode interagir com as hidroxilas presentes na estrutura do flavonoide, levando a formação de um complexo borato. O boro se liga ao oxigênio das hidroxilas, promovendo a formação de uma estrutura cíclica ou linear.

3ª) Estabilidade do Complexo: A estabilização do complexo ocorre por meio da formação das ligações de hidrogênio e pela existência de ressonância nos anéis aromáticos dos flavonoides, esse processo de ressonância pode alterar as propriedades físico-químicas do flavonoide, como solubilidade e reatividade.

Na figura 10 é apresentado um complexo resultado da reação oxalo-bórica com um flavonoide.

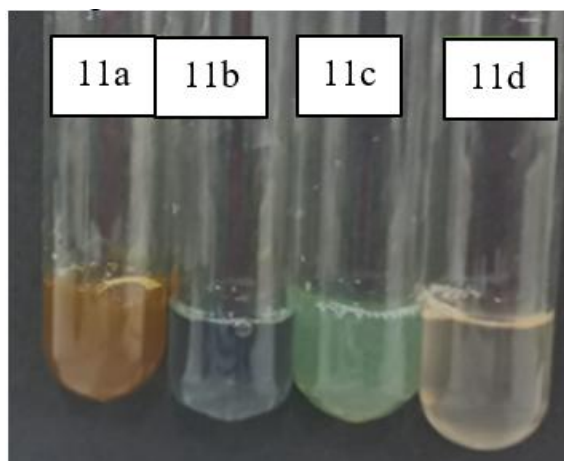
Figura 10: Esquema da reação oxalo-bórica.



Fonte: Adaptado de Costa (2000)

O teste confirmatório para taninos é apresentado a seguir na figura 11 que vai de 11a a 11d.

Figura 11: Teste confirmatório para taninos: 11a) Cloreto férrico, 11b) Acetato de cobre, 11c) Acetato de chumbo e 11d) Reação com gelatina.



Fonte: A autora (2024).

Por meio do teste confirmatório foi possível classificar os taninos presentes no extrato aquoso de *Endopleura uchi*. A reação com cloreto férrico permitiu analisarmos a presença positiva de taninos do tipo condensados no tubo 11c e taninos hidrolisáveis nos tubos identificados como 11b, os taninos têm a facilidade de complexarem com metais, e isso ocorre porque os taninos se ligam aos metais formando um complexo que pode ser visualizado por meio de alterações de cor (Costa, 2000; Matos, 1997; Mensor et al., 2001; Brand-Williams et al., 1995; Polterait, 1997).

5.3.4 Teste para identificação de terpenos

O teste confirmatório para terpenos é apresentado a seguir na figura 12:

Figura 12: Teste confirmatório para terpenos 12a.



Fonte: A autora, (2024)

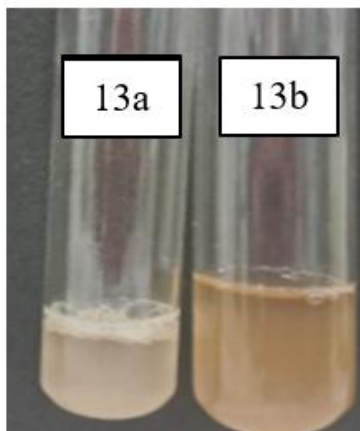
O extrato aquoso de *Endopleura uchi* apresentou resultado positivo para a presença de terpenos em sua constituição química. Os estudos realizados por Simões (2007) constataram a presença de compostos químicos como os terpenos, estes resultados corroboram com os apresentados por Politi (2009) e Lima (2024) que destacaram a presença de cumarinas, saponinas, terpenos e alcaloides no extrato das cascas da planta.

5.3.5 Teste para identificação de saponinas

O teste de prospecção fitoquímica para saponinas apresentou resultado positivo nos ensaios realizados. Esse resultado é coerente com os relatos de Politi (2009) e Lima (2024), que descreveram a presença de saponinas, cumarinas e taninos em extratos de cascas da espécie.

A Figura 13 apresenta o teste geral para saponinas (13a) e o teste confirmatório para saponinas triterpênicas (13b).

Figura 13: Teste para saponinas: 13 a) Saponina (Reação Geral) e 13 b) Teste confirmatório (Saponina triterpênicas).

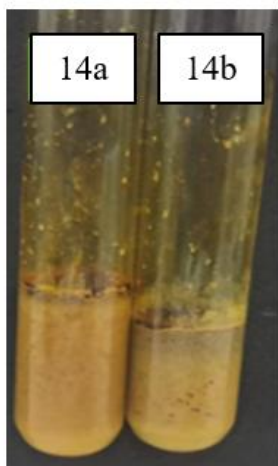


Fonte: A autora (2024).

5.3.6 Teste para identificação de alcaloides

No teste para identificação de alcaloides, observou-se a formação de precipitado após adição do reagente de Dragendorff, conforme apresentado na Figura 14. Esse reagente interage com alcaloides, que são bases orgânicas, formando complexos coloridos que podem variar de laranja a vermelho-acastanhado. Resultado semelhante foi descrito por Lima (2024).

Figura 14: Teste para identificação de alcaloides: 14a) e 14b) reações qualitativas com reagentes específicos.



Fonte: A autora (2024).

5.4 Produção e estabilidade das nanopartículas de prata

A produção das nanopartículas de prata (AgNPs) mediadas pelo extrato do caule de *Endopleura uchi* foi acompanhada a partir das condições estabelecidas no delineamento experimental, considerando variações de concentração do extrato, temperatura e pH. A matriz experimental completa está apresentada na Tabela 8.

Tabela 8: Matriz experimental completa.

Ensaio	Ph	Conc. Extrato (% w/v)	Temp. (°C)	Resposta (Réplica 1)	Resposta (Réplica 2)	Resposta (Réplica 3)
1	7,0	0,10	30,0	0,0214	0,0461	0,0355
2	8,0	0,10	30,0	0,1098	0,0850	0,0483
3	7,0	1,00	30,0	0,1783	0,3767	0,2004
4	8,0	1,00	30,0	0,6253	0,6444	0,3281
5	7,0	0,10	40,0	0,0338	0,0371	0,0231
6	8,0	0,10	40,0	0,1111	0,0403	0,0173
7	7,0	1,00	40,0	0,1134	0,3328	0,2335
8	8,0	1,00	40,0	0,2877	0,4938	0,2631

Fonte: A autora (2024).

O extrato de *Endopleura uchi* foi empregado como biorredutor, enquanto o nitrato de prata (AgNO₃) atuou como precursor metálico. Durante a reação, observou-se mudança de coloração do meio reacional, inicialmente incolor, para tons amarelados e, posteriormente, alaranjados. Essa alteração visual é um indicativo inicial da formação de AgNPs, conforme apresentado na Figura 15, em que a solução passa de coloração amarelada (15a) para laranja (15b).

Figura 15: Mudança de coloração na formação de AgNPs: 15 a) cor amarelada e 15 b) cor laranja.



Fonte: A autora (2025).

Junior et al. (2012) destacam que soluções amareladas podem estar associadas à absorção da radiação eletromagnética em ressonância com os plasmons de superfície, característica da formação de nanoestruturas de prata. O deslocamento para tons alaranjados pode indicar aumento de tamanho, maior concentração de partículas ou tendência à agregação, especialmente quando há excesso de reagentes ou menor estabilidade coloidal.

A análise espectrofotométrica apresentada na Figura 16 evidencia a influência das variáveis físico-químicas pH, temperatura e tempo sobre a formação e a estabilidade do sistema avaliado.

Nos espectros de absorção, especialmente nos gráficos B e C, a condição de pH 8,0, 30 °C e concentração de extrato de 1,0% apresentou maior absorbância, principalmente na região entre 200 e 350 nm. Essa faixa está associada à presença de grupos aromáticos e sistemas conjugados de metabólitos vegetais, os quais podem influenciar tanto a redução de Ag⁺ quanto a estabilização das partículas formadas (Qin et al., 2010; Peixoto et al., 2019).

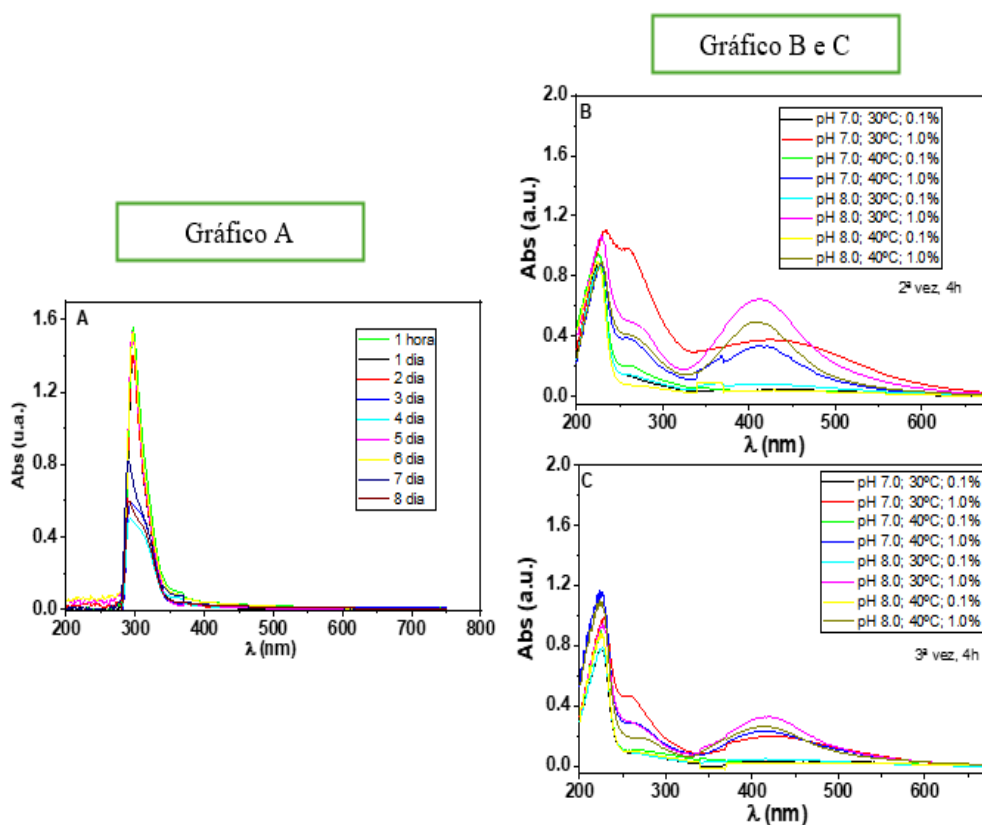
A comparação entre as condições avaliadas indica que o aumento da temperatura para 40 °C, mesmo em pH 8,0, reduziu a intensidade de absorção. Esse comportamento sugere que temperaturas mais elevadas podem acelerar processos de degradação de metabólitos ou alterar a estabilidade do sistema. De modo semelhante, as condições em pH 7,0 apresentaram espectros menos definidos e menores valores de absorbância, indicando que o meio ligeiramente alcalino favoreceu a formação ou manutenção das espécies responsáveis pela resposta espectral (Albarici, 2006; Huaranca-Huarcaya et al., 2022).

No gráfico A da Figura 16, observa-se que a condição considerada ideal (pH 8,0, 30 °C e 1,0% de extrato) manteve estabilidade ao longo de oito dias. A manutenção da absorbância nesse intervalo sugere maior estabilidade coloidal e menor perda dos constituintes responsáveis

pela interação com a prata. Ainda assim, é importante destacar que a espectroscopia UV-Vis fornece evidências indiretas de formação e estabilidade das AgNPs, devendo ser complementada por técnicas como DLS, MEV/MET, DRX ou FTIR para confirmação de tamanho, morfologia, estrutura e grupos funcionais envolvidos.

Essa ressalva é metodologicamente importante porque a banda de ressonância de plásmon de superfície confirma a compatibilidade do sistema com a formação de AgNPs, mas não substitui a caracterização morfológica e estrutural. Assim, os resultados de UV-Vis devem ser interpretados como evidência de formação e estabilidade relativa, enquanto a confirmação definitiva da dimensão nanométrica e da distribuição de tamanho exige técnicas complementares.

Figura 16: Influência das variáveis físico-químicas – pH, temperatura e tempo / estabilidade.



Fonte: A autora (2025).

5.4.1. Estatística Descritiva e Reprodutibilidade

Os valores de absorvância variaram entre as oito condições experimentais, desde 0,0313 UA (pH 8, extrato 0,1%, 40 °C) até 0,5326 UA (pH 8, extrato 1,0%, 30 °C), representando um aumento de 17 vezes na densidade óptica. A Tabela 9 sumariza as médias,

desvios padrão e mediana, bem como o agrupamento resultante do teste de Duncan aplicado sobre os dados transformados ($\log_{10}$) para cada tratamento.

Tabela 9: Estatísticas descritivas da absorbância (UA) e agrupamento de Duncan ($\alpha = 0,05$) para as oito condições do fatorial 2³.

Tratamento	pH	Conc. (m/v)	T (°C)	Média $\pm$ DP (UA)	Mediana (mín–máx) (UA)	Grupo Duncan
1 (pH8_C1_T30)	8	1,0%	30	0,5326 $\pm$ 0,1774	0,6253 (0,3281–0,6444)	A
2 (pH8_C1_T40)	8	1,0%	40	0,3482 $\pm$ 0,1267	0,2877 (0,2631–0,4938)	A
3 (pH7_C1_T30)	7	1,0%	30	0,2518 $\pm$ 0,1087	0,2004 (0,1783–0,3767)	A
4 (pH7_C1_T40)	7	1,0%	40	0,2266 $\pm$ 0,1099	0,2335 (0,1134–0,3328)	A
5 (pH8_C0.1_T30)	8	0,1%	30	0,0810 $\pm$ 0,0309	0,0850 (0,0483–0,1098)	B
6 (pH8_C0.1_T40)	8	0,1%	40	0,0562 $\pm$ 0,0489	0,0403 (0,0173–0,1111)	B
7 (pH7_C0.1_T30)	7	0,1%	30	0,0343 $\pm$ 0,0124	0,0355 (0,0214–0,0461)	B
8 (pH7_C0.1_T40)	7	0,1%	40	0,0313 $\pm$ 0,0073	0,0338 (0,0231–0,0371)	B

Fonte: A autora (2026).

A absorbância média mais elevada foi observada para a condição pH8_C1_T30 (pH 8, extrato 1,0%, 30 °C). Este nível é compatível com a literatura recente sobre síntese verde de nanopartículas mediada por extratos vegetais. Observou-se que os maiores coeficientes de variação ocorreram em baixas concentrações de extrato associadas a temperatura elevada, fenômeno também descrito por Adewuyi e Oderinde (2023), sugerindo instabilidade cinética quando a oferta de agentes redutores/capeantes se caracteriza-se como limitante.

Por outro lado, as condições com baixo rendimento absoluto, como pH8_C0.1_T30, podem exibir excelente reprodutibilidade, indicando um processo bem controlado, porém ineficiente.

A Tabela 10 apresenta os resultados da ANOVA tipo III com correção HC3 para os dados de absorbância transformados por $\log_{10}$.

Tabela 10: ANOVA fatorial 2^3 com correção de heterocedasticidade (HC3) com dados transformados por $\log_{10}$.

Fonte de variação	GL	F (HC3)	p-valor (HC3)
pH	1	4,41	0,0519
Concentração	1	25,06	0,00013
Temperatura	1	0,04	0,8495
pH $\times$ Concentração	1	0,03	0,8750
pH $\times$ Temperatura	1	0,44	0,5185
Concentração $\times$ Temperatura	1	0,02	0,8952
pH $\times$ Conc. $\times$ Temp.	1	0,06	0,8096
Resíduo	16	–	–

Fonte: A autora (2026).

A concentração do extrato exerceu efeito altamente significativo ($F_{1,16} = 25,06$; $p < 0,001$), sendo a principal fonte de variação do sistema. O pH apresentou significância marginal ($p = 0,052$), enquanto a temperatura e todas as interações não atingiram significância estatística ($p > 0,05$). Este padrão indica que, dentro das faixas investigadas, o efeito benéfico da alta concentração independe do pH e da temperatura, e que 30 °C já é suficiente para uma formação eficiente de nanopartículas. De acordo com Sharma et al. (2019), “a concentração do extrato vegetal é frequentemente o fator mais determinante na síntese verde de nanopartículas”.

Para assegurar que tais conclusões não são artefatos do método de correção escolhido, o efeito principal da concentração foi reavaliado com cinco abordagens distintas. Todos os métodos confirmaram, de forma consistente, a forte significância do efeito ($p < 0,001$), atestando a robustez da inferência. Adicionalmente, uma análise de sensibilidade demonstrou que o efeito da concentração permaneceu altamente significativo ($p < 0,001$) em todas as escalas avaliadas (original, raiz quadrada, raiz cúbica e $\log_{10}$), conforme detalhado na Tabela 11.

Tabela 11: Sensibilidade do efeito principal da concentração a diferentes transformações da absorbância (AgNPs).

Transformação	β (Concentração)	p-valor	Significância
Original	0,1445	$1,74 \times 10^{-6}$	***

Transformação	β (Concentração)	p-valor	Significância
Raiz quadrada	0,1755	$7,38 \times 10^{-8}$	***
Raiz cúbica	0,1621	$2,20 \times 10^{-8}$	***
Log ₁₀	0,4258	$6,78 \times 10^{-7}$	***

Fonte: A autora (2026).

A modelagem por regressão linear múltipla, apresentada na Tabela 12, reforça a interpretação obtida pela ANOVA. O efeito positivo da concentração do extrato indica que a disponibilidade de biomoléculas redutoras e estabilizantes foi determinante para a resposta espectral do sistema. Esse resultado é compatível com a síntese verde, na qual a concentração do extrato influencia diretamente a taxa de redução dos íons metálicos, a nucleação e a estabilização das nanopartículas.

Conforme Hinkelmann & Kempthorne (2008), “a robustez das conclusões estatísticas pode ser avaliada pela consistência dos resultados em diferentes métodos de análise e transformações de dados”. Este resultado confirma que a significância estatística não é um artefato da transformação escolhida.

Em seguida, foi observado que foi possível ressaltar uma distinção entre os resultados para o fator pH, onde podemos analisar na Tabela 12 que o coeficiente de regressão para pH foi significativo ($p = 0,0271$), indicando sua contribuição no modelo preditivo.

Tabela 12: Coeficientes do modelo de regressão linear múltipla (escala log₁₀) para a absorbância das AgNPs. As variáveis preditoras (pH, concentração do extrato e temperatura) foram codificadas no intervalo de 95% de confiança.

Coeficiente	Estimativa	EP (HC3)	t	p-valor	IC95% (inferior; superior)
Intercepto	-0,9451	0,0541	-17,48	< 0,001	[-1,051; -0,839]
pH	0,1315	0,0541	2,43	0,0271	[0,026; 0,238]
Concentração	0,4258	0,0541	7,88	< 0,001	[0,320; 0,532]
Temperatura	-0,0658	0,0541	-1,22	0,2410	[-0,172; 0,040]
pH × Concentração	0,0035	0,0541	0,06	0,9498	[-0,103; 0,110]
pH × Temperatura	-0,0436	0,0541	-0,81	0,4314	[-0,150; 0,062]

Coeficiente	Estimativa	EP (HC3)	t	p-valor	IC95% (inferior; superior)
Concentração × Temperatura	0,0048	0,0541	0,09	0,9306	[-0,101; 0,111]
pH × Conc. × Temp.	0,0132	0,0541	0,24	0,8096	[-0,093; 0,119]

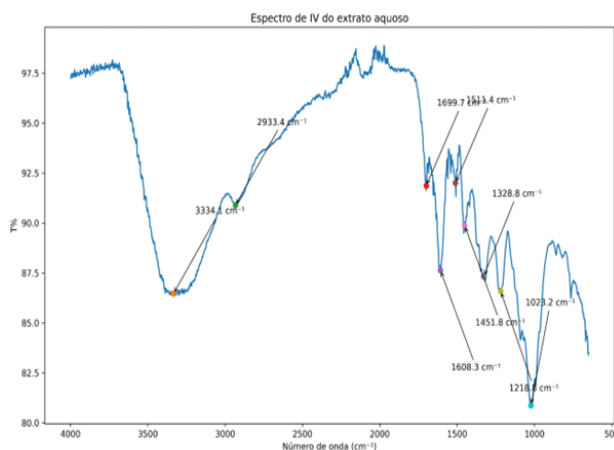
Fonte: A autora (2026).

Contudo, na ANOVA com correção robusta HC3, considerada a análise principal para inferência sobre os fatores no delineamento fatorial, o efeito do pH foi marginalmente significativo ($F_{1,16} = 4,41$; $p = 0,0519$). Essa diferença decorre da natureza distinta dos testes: enquanto a ANOVA avalia o efeito principal do fator como fonte de variação entre grupos, o teste t para o coeficiente de regressão testa a contribuição da variável no modelo preditivo completo, que inclui todas as interações. Diante disso, adota-se o resultado da ANOVA como referência, concluindo que o pH exerce um efeito secundário e marginalmente significativo, enquanto a concentração do extrato permanece como fator crítico ($p < 0,001$).

5.5 Caracterização complementar das AgNPs por FTIR, MEV e EDS

Os espectros de FTIR do extrato e das AgNPs indicaram diferenças relevantes entre os materiais. No extrato de *E. uchi*, foram observadas bandas características em aproximadamente 3334 cm^{-1} , atribuídas ao estiramento O–H de grupos hidroxila presentes em compostos fenólicos, álcoois e água residual; em torno de 2933 cm^{-1} , associadas a vibrações C–H de grupos alifáticos; e na região próxima de 1699 cm^{-1} , relacionada a grupos carbonílicos, possivelmente presentes em ácidos orgânicos, aldeídos, cetonas ou lactonas, como mostrado na Figura 17.

Figura 17: Espectro de infravermelho do extrato em pó de *E. uchi* na região de $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$.



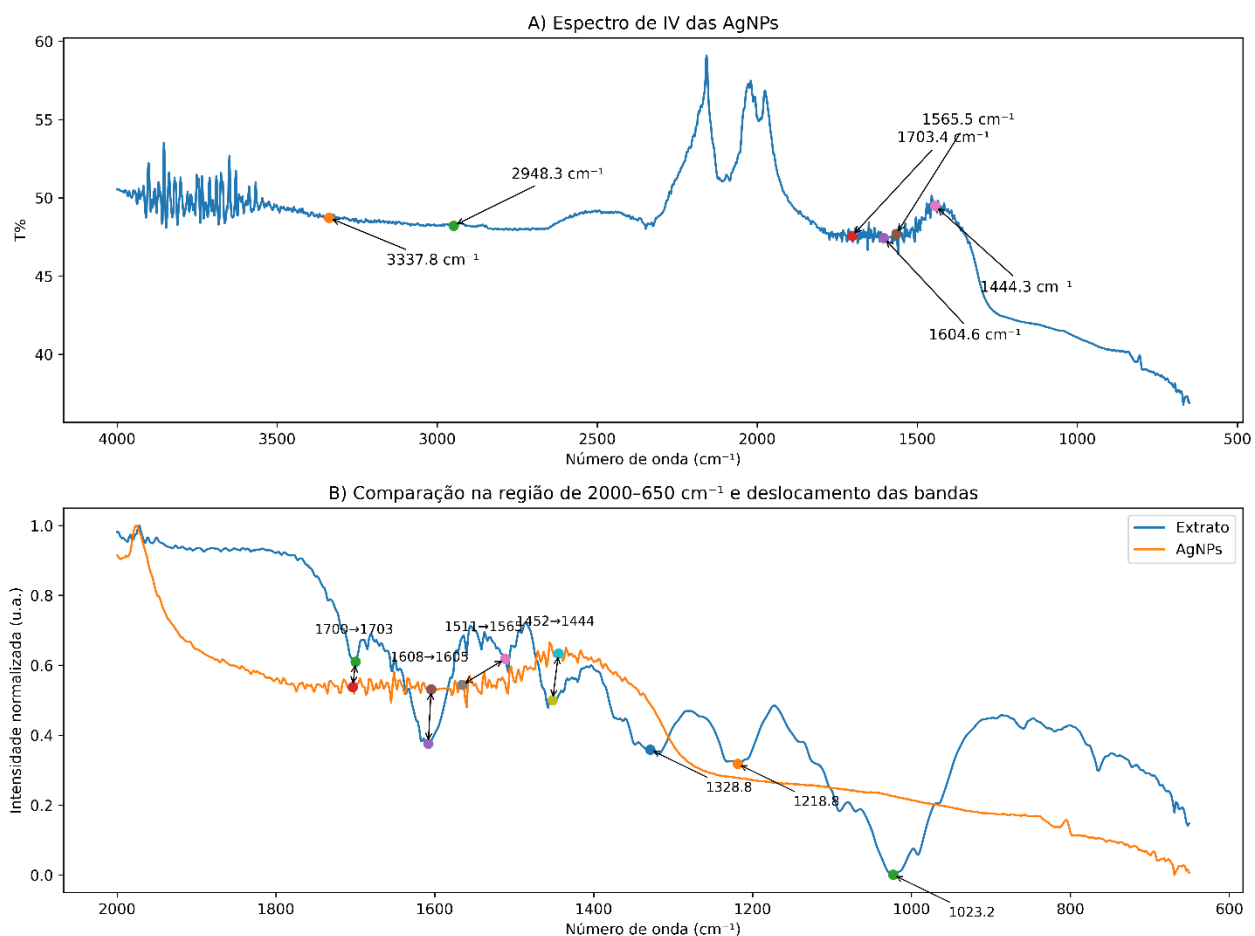
Fonte: A autora (2026).

Além disso, bandas na região de 1606, 1511 e 1452 cm^{-1} podem estar associadas a vibrações de anéis aromáticos e ligações C=C, enquanto os sinais entre 1329, 1219 e 1023 cm^{-1} são compatíveis com vibrações C–O, C–O–C e C–OH, frequentemente observadas em compostos fenólicos, flavonoides, taninos, açúcares e saponinas.

Essas atribuições são coerentes com os resultados da prospecção fitoquímica, que indicaram a presença de fenóis, taninos, flavonoides, catequinas, terpenos, saponinas e alcaloides no extrato aquoso. Do ponto de vista da síntese verde, a presença desses grupos funcionais é relevante, pois moléculas contendo hidroxilas fenólicas, carbonilas, carboxilas e grupos éteres podem atuar como agentes redutores e/ou estabilizantes durante a conversão de Ag^+ em Ag^0 . Assim, o extrato vegetal não deve ser interpretado apenas como solvente ou meio reacional, mas como uma matriz química ativa, capaz de participar da nucleação, crescimento e estabilização das nanopartículas formadas.

Conforme observado na Figura 18, o espectro das AgNPs apresentou bandas em aproximadamente 1703,4; 1604,6; 1565,5 e 1444,3 cm^{-1} . Em relação ao extrato precursor, foram observados deslocamentos das bandas de 1699,7 para 1703,4 cm^{-1} , de 1608,3 para 1604,6 cm^{-1} , de 1511,4 para 1565,5 cm^{-1} e de 1451,8 para 1444,3 cm^{-1} . Além disso, as bandas do extrato em 1328,8; 1218,8 e 1023,2 cm^{-1} tornaram-se menos definidas no espectro das AgNPs, sugerindo alteração dos grupos funcionais associados à matriz vegetal.

Figura 18: Espectros de infravermelho das nanopartículas de prata sintetizadas com extrato aquoso de *Endopleura uchi* e comparação com o extrato precursor.



Fonte: A autora (2026).

A banda em $1699,7 \text{ cm}^{-1}$, deslocada para $1703,4 \text{ cm}^{-1}$, pode ser atribuída ao estiramento de grupos carbonílicos, como $\text{C}=\text{O}$, presentes em ácidos orgânicos, aldeídos, cetonas, ésteres ou lactonas. Esse deslocamento indica modificação no ambiente químico desses grupos após a reação com o precursor metálico, sugerindo sua participação na redução de Ag^+ ou sua adsorção sobre a superfície das partículas formadas.

O deslocamento da banda de $1608,3$ para $1604,6 \text{ cm}^{-1}$ pode estar associado a vibrações de $\text{C}=\text{C}$ de anéis aromáticos e estruturas fenólicas conjugadas. Considerando a presença de compostos fenólicos, flavonoides e taninos no extrato de *E. uchi*, essa alteração sugere que metabólitos aromáticos atuaram na formação das AgNPs, seja por transferência eletrônica durante a redução dos íons prata, seja por estabilização superficial do material formado.

A alteração mais expressiva ocorreu para a banda em $1511,4 \text{ cm}^{-1}$, deslocada para $1565,5 \text{ cm}^{-1}$ nas AgNPs. Esse comportamento indica uma mudança mais acentuada no

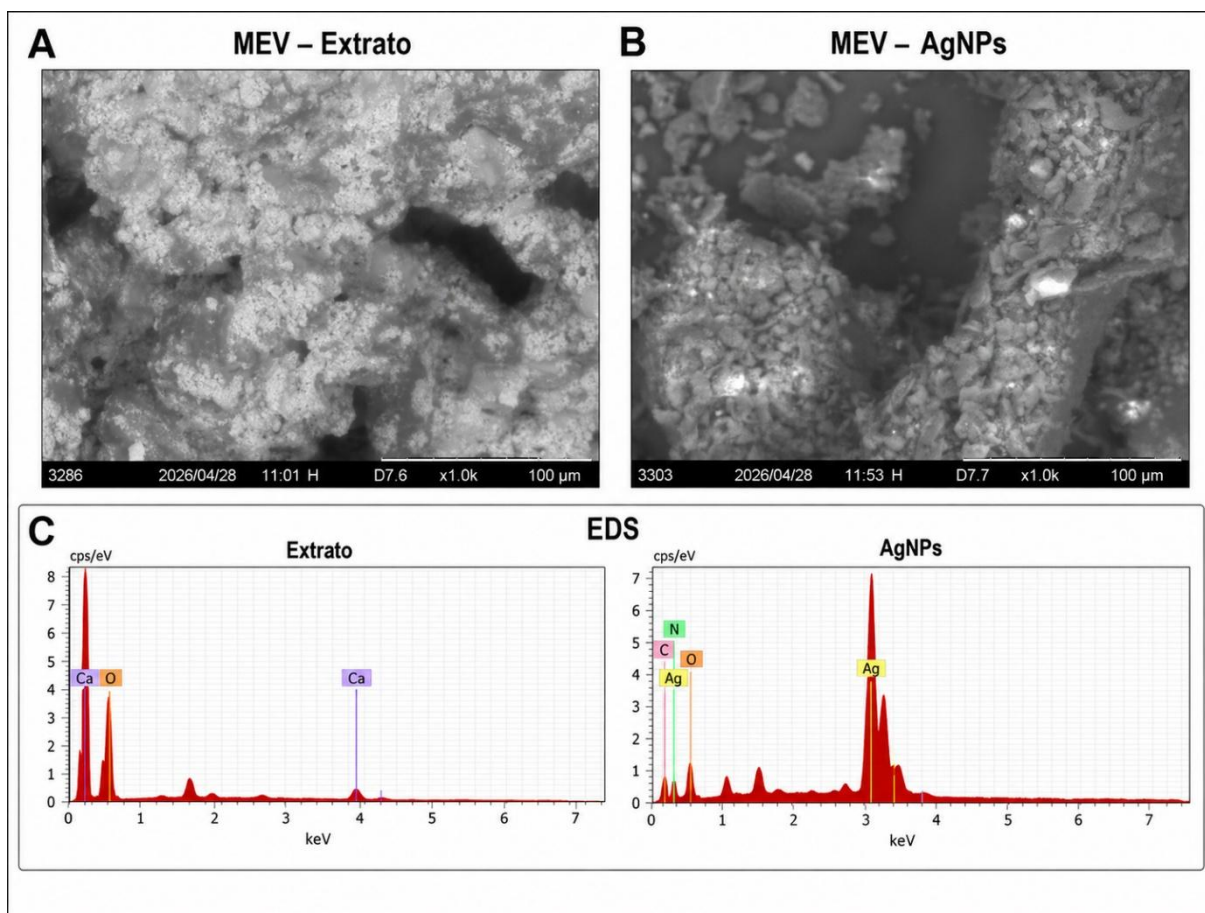
microambiente químico de grupos associados a estruturas aromáticas e fenólicas. Esse deslocamento reforça a hipótese de interação entre biomoléculas do extrato e a superfície metálica, possivelmente por adsorção ou formação de uma camada orgânica residual ao redor das partículas.

A banda em $1451,8\text{ cm}^{-1}$, deslocada para $1444,3\text{ cm}^{-1}$, pode estar relacionada a deformações de C–H, grupos alifáticos ou anéis aromáticos substituídos. Embora o deslocamento seja discreto, ele acompanha o padrão geral de modificação observado no espectro, indicando que a síntese das AgNPs alterou o ambiente vibracional dos constituintes orgânicos do extrato.

As bandas em $1328,8$; $1218,8$ e $1023,2\text{ cm}^{-1}$, mais intensas no extrato e atenuadas nas AgNPs, são compatíveis com vibrações de C–O, C–O–C e C–OH, comuns em fenóis, álcoois, carboidratos, éteres e derivados glicosídicos. A redução desses sinais após a síntese sugere que grupos oxigenados participaram da redução de Ag^+ a Ag^0 e/ou permaneceram associados à superfície das nanopartículas como agentes estabilizantes.

A análise por MEV, mostrado na Figura 19 A e B, permitiu observar diferenças morfológicas entre o extrato seco e o material obtido após a síntese das AgNPs. As micrografias do extrato apresentaram uma matriz heterogênea, composta por fragmentos irregulares e estruturas de aspecto fibroso, compatíveis com resíduos vegetais oriundos do caule de *E. uchi*. Essa morfologia é esperada para materiais vegetais secos, nos quais permanecem estruturas lignocelulósicas, partículas orgânicas e resíduos minerais naturalmente presentes no tecido vegetal.

Figura 19: (A) Micrografia MEV-BSE do extrato vegetal seco, mostrando morfologia irregular e agregada. (B) Micrografia MEV-BSE das AgNPs, evidenciando agregados granulares e regiões de maior contraste eletrônico. (C) Espectros de EDS do extrato e das AgNPs, indicando predominância de C e O no extrato e elevado teor de Ag no material sintetizado. As imagens de MEV foram obtidas em aumento de $1000\times$.



Fonte: A autora (2026).

Em contraste, as micrografias das AgNPs apresentaram uma superfície mais granular, compacta e agregada, com regiões de maior brilho nas imagens obtidas em modo BSE. Como o contraste em BSE é sensível ao número atômico médio dos elementos presentes na amostra, essas regiões mais claras são compatíveis com áreas enriquecidas em prata. No entanto, as imagens mostram predominantemente agregados micrométricos formados após secagem do material, e não partículas isoladas. Portanto, os resultados de MEV devem ser interpretados como evidência morfológica de formação de agregados contendo prata, mas não permitem determinar com precisão o tamanho individual das nanopartículas.

Esse ponto é metodologicamente importante. Nanopartículas metálicas apresentam elevada energia superficial e, após processos de secagem, centrifugação ou deposição sobre o suporte de análise, podem se aproximar e formar aglomerados maiores. Assim, a presença de estruturas micrométricas nas imagens de MEV não invalida a formação de AgNPs, mas indica que o material final se apresenta como agregados de partículas menores ou como uma matriz orgânico-metálica rica em prata. Para estimar diâmetro médio, distribuição de tamanho e morfologia individual, seriam necessárias análises complementares por MET/TEM, DLS ou

MEV em ampliações mais elevadas. Essa cautela é coerente com estudos que mostram que MEV e EDS são técnicas úteis para avaliar morfologia geral e composição elementar, mas podem ser insuficientes para determinar distribuição de tamanho de nanopartículas individuais quando há forte agregação.

A composição elementar obtida por EDS, Figura 19 C, reforçou a formação do material contendo prata. No extrato vegetal, foram identificados principalmente carbono (52,75% em massa) e oxigênio (46,01% em massa), além de pequena quantidade de cálcio (1,24% em massa). Esse perfil é compatível com uma matriz de origem vegetal, rica em compostos orgânicos oxigenados, como celulose, hemicelulose, lignina, compostos fenólicos e outros metabólitos hidrossolúveis. A presença de cálcio pode ser atribuída a constituintes minerais naturais do tecido vegetal.

Por outro lado, no material sintetizado, o EDS revelou elevada proporção de prata, correspondente a 73,94% em massa, acompanhada de oxigênio (18,35%), nitrogênio (5,48%) e carbono (2,23%). A presença majoritária de prata no material final confirma que a síntese produziu uma fase fortemente enriquecida nesse metal. O oxigênio e o carbono remanescentes podem estar associados a biomoléculas do extrato adsorvidas na superfície das partículas, enquanto o nitrogênio pode estar relacionado a compostos nitrogenados do extrato ou a resíduos do precursor AgNO_3 , caso a etapa de lavagem não tenha removido completamente espécies nitrato. Dessa forma, o EDS não apenas confirma a presença de prata, mas também sugere que o material final não é composto por prata “nua”, e sim por partículas metálicas associadas a uma fração orgânica residual proveniente da rota verde.

Por fim, a comparação entre o extrato e as AgNPs mostra uma mudança composicional expressiva. Enquanto o extrato apresentou composição dominada por C e O, as AgNPs apresentaram predomínio de Ag, indicando incorporação efetiva da prata ao material sólido analisado. Além disso, a ausência de cálcio na amostra de AgNPs sugere que os constituintes minerais do extrato não foram concentrados no material final ou não estavam presentes na região analisada por EDS. Como a análise de EDS foi realizada em ponto/região específica, os valores devem ser interpretados como semiquantitativos e representativos da área analisada, não como composição absoluta de todo o material.

5.6 Atividade alelopática

5.6.1 Avaliação do efeito alelopático de AgNPs sintetizadas por via verde

A atividade alelopática foi avaliada a partir dos parâmetros germinativos de coentro e melancia submetidos aos tratamentos com AgNPs, extrato aquoso e controle. A análise conjunta dos dados permite discutir não apenas a germinação final, mas também a dinâmica temporal do processo, incluindo velocidade, uniformidade, sincronia e parâmetros derivados de modelos estatísticos, como mostrado na Tabela 13.

Tabela 13: Dados completos de todas as réplicas experimentais para coentro e melancia submetidas a diferentes tratamentos com AgNPs e controle.

Coentro										
Trat.	FGP (%)	MGT (dias)	IVG	T50 (dias)	U	H	Z	SYN	GI	AUC
T01	96,0 ±	7,44 ±	3,27 ±	7,25 ±	0,81 ±	1,54 ±	0,39 ±	0,39 ±	0,45 ±	810 ±
	4,6 a	0,34 a	0,25 a	0,5 ab	0,14 a	0,17 a	0,07 a	0,07 a	0,05 a	38,7 a
T02	93,0 ±	7,89 ±	3,11 ±	8,25 ±	1,01 ±	1,53 ±	0,37 ±	0,37 ±	0,45 ±	822 ±
	6,8 a	1,04 a	0,74 a	1,3 a	0,59 a	0,46 a	0,12 a	0,12 a	0,21 a	45,0 a
T03	95,0 ±	5,12 ±	5,04 ±	5,00 ±	1,33 ±	1,31 ±	0,47 ±	0,47 ±	1,12 ±	577 ±
	6,0 a	1,15 b	1,07 b	0,8 c	0,78 b	0,74 a	0,23 a	0,23 a	0,36 b	76,1 b
T04	97,0 ±	6,57 ±	4,15 ±	7,00 ±	2,04 ±	2,01 ±	0,27 ±	0,27 ±	0,79 ±	734 ±
	2,0 a	0,94 ab	0,66 a	1,4 ab	0,26 b	0,12 b	0,05 b	0,05 b	0,24 a	90,7 a
T05	93,0 ±	5,31 ±	4,76 ±	5,25 ±	1,48 ±	2,38 ±	0,17 ±	0,17 ±	1,06 ±	586 ±
	9,5 a	0,27 b	0,65 b	0,5 c	0,10 b	0,13 b	0,03 b	0,03 b	0,20 b	51,5 b
Melancia										
T01	92,0 ±	7,16 ±	3,22 ±	7,25 ±	0,32 ±	0,51 ±	0,77 ±	0,77 ±	0,45 ±	750 ±
	8,6 a	0,17 a	0,37 a	0,5 ab	0,22 a	0,40 c	0,21 c	0,21 c	0,06 a	56,2 a
T02	92,0 ±	7,45 ±	3,10 ±	7,50 ±	0,46 ±	0,88 ±	0,56 ±	0,56 ±	0,42 ±	778 ±
	4,6 a	0,23 a	0,14 a	0,6 ab	0,05 a	0,14 ac	0,09 a	0,09 a	0,02 a	51,9 a
T03	88,0 ±	5,34 ±	4,29 ±	5,25 ±	0,99 ±	1,48 ±	0,38 ±	0,38 ±	0,87 ±	558 ±
	5,7 ab	0,56 b	0,50 ab	0,5 c	0,34 a	0,27 a	0,08 a	0,08 a	0,18 ab	61,1 b
T04	94,0 ±	4,47 ±	5,54 ±	4,50 ±	0,90 ±	1,55 ±	0,37 ±	0,37 ±	1,38 ±	514 ±
	2,3 a	0,53 c	0,69 b	0,6 c	0,17 a	0,12 a	0,04 a	0,04 a	0,33 c	49,0 b
T05	75,0 ±	5,55 ±	3,57 ±	6,25 ±	1,19 ±	1,96 ±	0,23 ±	0,23 ±	0,72 ±	491 ±
	7,6 b	0,37 b	0,49 a	1,0 bc	0,14 b	0,17 b	0,04 b	0,04 b	0,16 ab	57,3 b

Fonte: A autora (2026).

Do ponto de vista fisiológico, a ausência de redução expressiva da germinação final em coentro indica que os tratamentos não comprometeram a capacidade germinativa dessa espécie nas condições testadas. Entretanto, alterações em parâmetros temporais devem ser consideradas, pois mudanças na velocidade e na sincronia da germinação podem afetar o estabelecimento inicial das plântulas, mesmo quando a germinação final permanece elevada.

No coentro, a FGP manteve-se elevada em todos os tratamentos (93–97%), sem diferenças significativas. No entanto, os tratamentos T03 (100 $\mu\text{g mL}^{-1}$) e T05 (controle extrato aquoso) reduziram significativamente o MGT e o T50, e aumentaram o IVG, indicando germinação mais rápida. Esse padrão sugere um possível efeito estimulatório das AgNPs em alta concentração e do extrato aquoso sobre a velocidade germinativa do coentro. A aceleração da germinação por nanopartículas de prata em concentrações mais elevadas tem sido atribuída à indução de estresse oxidativo moderado, que ativa vias metabólicas e enzimas antioxidantes (Savassa et al., 2021).

Na melancia, a FGP reduziu no tratamento T05 (75%), embora sem diferença estatística significativa intraespecífica. Os tratamentos com AgNPs em baixas concentrações (T01: 25 $\mu\text{g mL}^{-1}$ e T02: 50 $\mu\text{g mL}^{-1}$) apresentaram os maiores MGT e T50 (germinação mais lenta), enquanto T03 (100 $\mu\text{g mL}^{-1}$) e T04 (controle água) tiveram os menores MGT e T50. Esse comportamento sugere um padrão hormético: baixas doses de AgNPs retardaram a germinação, enquanto a dose mais alta reverteu parcialmente esse efeito, aproximando-se do controle. A hormese é um fenômeno dose-resposta caracterizado por efeitos estimulatórios em baixas doses e inibitórios em altas doses, ou vice-versa (Calabrese & Baldwin, 2003).

A análise de regressão não linear permitiu estimar as concentrações efetivas para 50% de inibição ou estímulo (CE50), apresentadas na tabela 14. Para o coentro, a CE50 para FGP foi de 21,60 $\mu\text{g mL}^{-1}$, indicando maior sensibilidade deste parâmetro. Já para os parâmetros de velocidade (IVG, GI e AUC), as CE50 situaram-se entre 83 e 88 $\mu\text{g mL}^{-1}$ para ambas as espécies, sugerindo que os efeitos sobre a dinâmica temporal da germinação ocorrem em concentrações relativamente semelhantes. Na melancia, a CE50 para FGP foi de 79,69 $\mu\text{g mL}^{-1}$, porém com maior incerteza na estimativa. Esses resultados indicam que a toxicidade das AgNPs é dependente do parâmetro analisado, afetando inicialmente aspectos cinéticos antes de comprometer a germinação final.

Tabela 14: Estimativas CE50 ($\mu\text{g mL}^{-1}$) para parâmetros germinativos sob exposição a AgNPs.

Parâmetro	CE50	IC95% inferior	IC95% superior
Coentro			
FGP	21,60	5,12	48,33
IVG	83,42	61,10	105,74
GI	87,95	65,88	109,32
AUC	85,77	62,45	108,90
Melancia			
FGP	79,69	NA	NA
IVG	88,13	70,42	112,56

Parâmetro	CE50	IC95% inferior	IC95% superior
GI	90,22	71,33	115,44
AUC	84,56	63,12	109,88

Fonte: A autora (2026).

A diferença na resposta entre as espécies pode estar relacionada à sensibilidade diferencial ao estresse oxidativo e à capacidade de ativação de enzimas antioxidantes, como superóxido dismutase e catalase (Vannini et al., 2013). O coentro, por ser uma planta aromática, pode possuir compostos antioxidantes naturais que mitigam o estresse causado pelas AgNPs, permitindo uma resposta mais rápida mesmo em doses mais altas. Na melancia, o estresse oxidativo em baixas doses podem ter sido suficiente para retardar o processo, enquanto na dose mais alta, mecanismos de reparo e adaptação podem ter sido ativados, resultando em aceleração.

O extrato aquoso (T05) também apresentou efeitos contrastantes: no coentro, acelerou a germinação, enquanto na melancia reduziu a FGP e tendeu a retardar o processo. Esse resultado sugere a presença de compostos alelopáticos no extrato que afetam negativamente a melancia, mas estimulam o coentro.

A significância da interação confirma que a resposta às AgNPs é espécie-específica. Conforme Rajeshkumar & Bharath (2017), “a resposta biológica às nanopartículas de prata é altamente espécie-específica, e modelos generalizados frequentemente falham em capturar a variabilidade observada entre diferentes sistemas vegetais”. Isso reforça a interpretação dos valores de CE50 na tabela 14 que indica que modelos gerais independentes da espécie não capturam adequadamente a variabilidade biológica.

A matriz de correlação de Pearson apresentada na Tabela 15 permitiu identificar associações entre os parâmetros germinativos avaliados. Essa abordagem é útil porque muitos índices de germinação não são independentes entre si; alguns descrevem a capacidade germinativa final, enquanto outros representam velocidade, distribuição temporal ou sincronização do processo. Assim, a interpretação integrada evita conclusões baseadas em um único parâmetro.

Tabela 15: Matriz de correlação de Pearson completa entre todos os parâmetros germinativos avaliados (n = 40 observações combinadas de coentro e melancia). Os valores representam o coeficiente de correlação r.

Variável	FGP	MGT	IVG	T50	AUC	H	Z	SYN	U	CVt	GR	TIG	PT	GV	GI	GE
FGP	1,00	-0,04	0,37	-0,11	0,07	-0,03	0,27	0,27	-0,03	-0,03	0,13	0,06	0,42	0,38	0,21	0,17
MGT	-0,04	1,00	-0,89	0,92	-0,19	-0,24	-0,16	-0,16	-0,21	-0,50	-0,92	0,86	0,86	-0,88	-0,92	-0,83
IVG	0,37	-0,89	1,00	-0,88	0,31	0,19	0,23	0,23	0,24	0,50	0,94	-0,78	-0,81	0,99	0,98	0,91

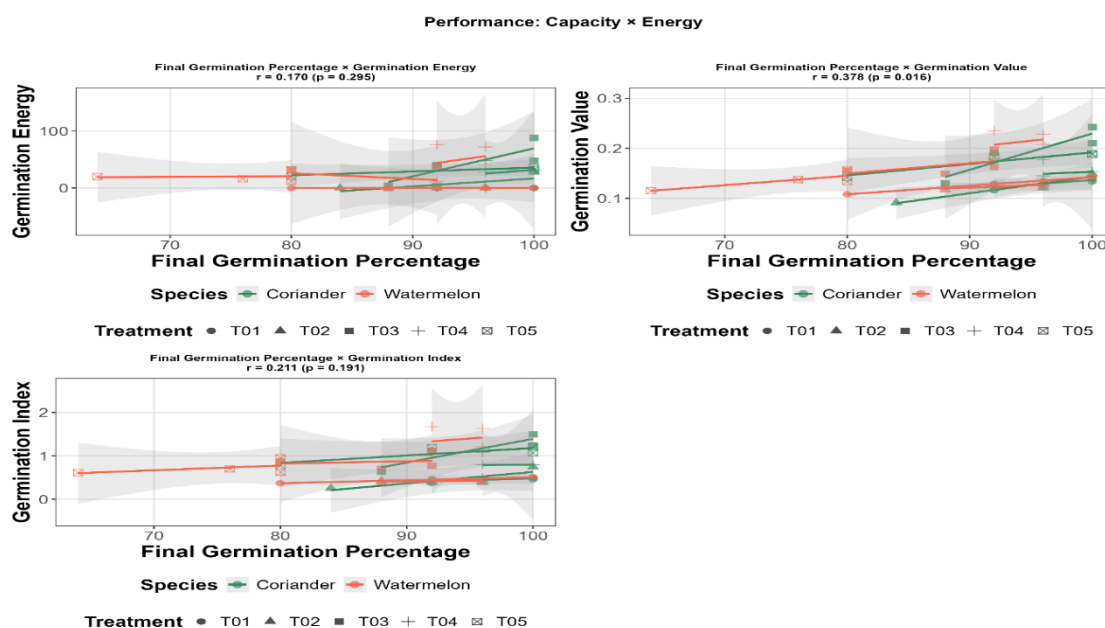
Variável	FGP	MGT	IVG	T50	AUC	H	Z	SYN	U	CVt	GR	TIG	PT	GV	GI	GE
T50	-0,11	0,92	-0,88	1,00	-0,29	-0,18	0,14	0,14	-0,16	-0,45	-0,97	0,78	0,91	-0,90	-0,89	-0,76
AUC	0,07	-0,19	0,31	-0,29	1,00	0,82	-0,76	-0,76	0,94	0,94	0,27	-0,58	-0,27	0,26	0,25	0,49
H	-0,03	-0,24	0,19	-0,18	0,82	1,00	-0,96	-0,96	0,81	0,80	0,25	-0,64	-0,25	0,08	0,20	0,20
Z	0,27	-0,16	0,23	0,14	-0,76	-0,96	1,00	1,00	-0,76	-0,75	-0,20	0,60	0,22	0,32	0,21	-0,20
SYN	0,27	-0,16	0,23	0,14	-0,76	-0,96	1,00	1,00	-0,76	-0,75	-0,20	0,60	0,22	0,32	0,21	-0,20
U	-0,03	-0,21	0,24	-0,16	0,94	0,81	-0,76	-0,76	1,00	0,94	0,26	-0,58	-0,27	0,26	0,25	-0,19
CVt	-0,03	-0,50	0,50	-0,45	0,94	0,80	-0,75	-0,75	0,94	1,00	0,54	-0,78	-0,52	0,49	0,54	-0,19
GR	0,13	-0,92	0,94	-0,97	0,27	0,25	-0,20	-0,20	0,26	0,54	1,00	-0,74	-0,85	0,94	0,98	0,84
TIG	0,06	0,86	-0,78	0,78	-0,58	-0,64	0,60	0,60	-0,58	-0,78	-0,74	1,00	0,73	-0,79	-0,81	-0,71
PT	0,42	0,86	-0,81	0,91	-0,27	-0,25	0,22	0,22	-0,27	-0,52	-0,85	0,73	1,00	-0,81	-0,85	-0,71
GV	0,38	-0,88	0,99	-0,90	0,26	0,08	0,32	0,32	0,26	0,49	0,94	-0,79	-0,81	1,00	0,98	0,86
GI	0,21	-0,92	0,98	-0,89	0,25	0,20	0,21	0,21	0,25	0,54	0,98	-0,81	-0,85	0,98	1,00	0,91
GE	0,17	-0,83	0,91	-0,76	0,49	0,20	-0,20	-0,20	-0,19	-0,19	0,84	-0,71	-0,71	0,86	0,91	1,00

Fonte: A autora (2026).

A relação negativa entre Sincronia (Z) e Entropia (H) ($r = -0,963$) demonstra um padrão matematicamente consistente: quanto maior a sincronia do evento germinativo, menor a dispersão temporal, reduzindo a entropia do sistema. Isso reforça a robustez dos parâmetros derivados da distribuição temporal, resultados esses que corroboram com os realizados por Ranal & Santana (2006).

A Figura 20 mostra a relação entre capacidade (FGP) e energia de germinação (GE, GV, GI). Observa-se correlação significativa apenas entre FGP e GV ($r = 0,378$; $p = 0,016$), indicando que maior germinação final está associada a maior valor de germinação, um índice que combina velocidade e uniformidade.

Figura 20: Correlações entre capacidade (FGP) e parâmetros de energia germinativa (GE, GV, GI) para coentro e melancia.



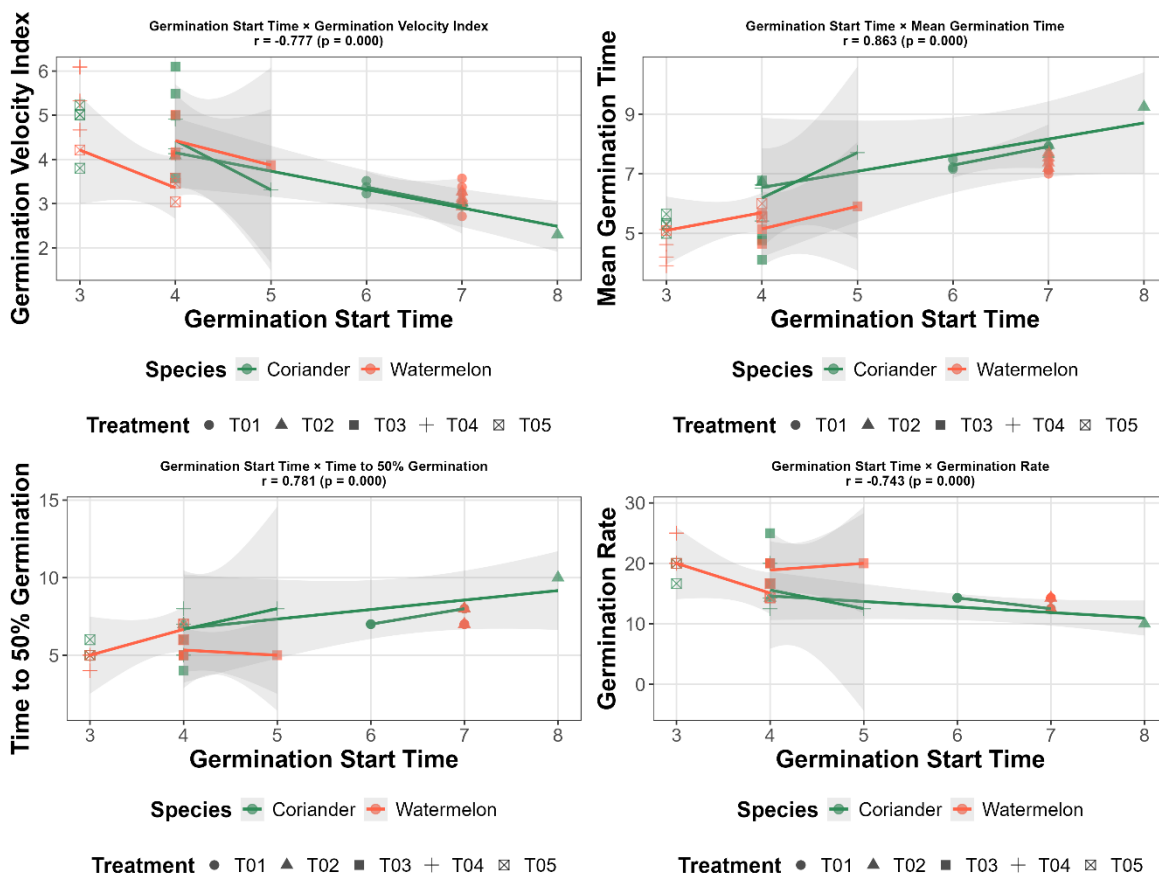
Fonte: A autora (2026).

Conforme Ranal & Santana (2006), enfatizaram à importância desses testes, pois os índices como velocidade e sincronia da germinação são complementares à capacidade germinativa, permitindo avaliar não apenas o número de sementes germinadas, mas também a qualidade temporal do processo. Seguindo, é importante de destacar que as correlações entre FGP e GE ($r = 0,170$; $p = 0,295$) e FGP e GI ($r = 0,211$; $p = 0,191$) mostraram que não foram significativas, sugerindo que a capacidade germinativa é relativamente independente da energia inicial.

Em seguida, é possível observar na Figura 21 as ilustrações das correlações envolvendo o tempo de início da germinação (TIG):

Figura 21: Correlações do tempo de início da germinação (TIG) com IVG e MGT.

Kinetic Correlations: Initial Events × Kinetics

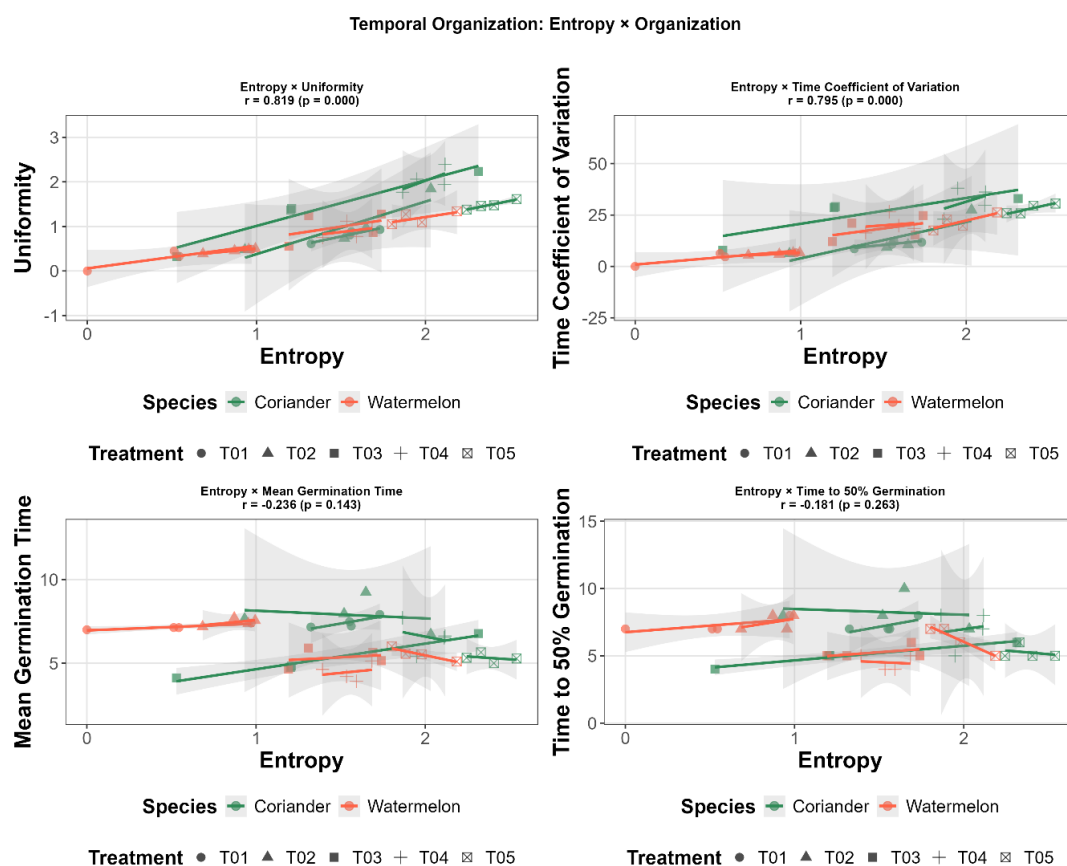


Fonte: A autora (2026).

O TIG correlacionou-se negativamente com IVG ($r = -0,777$; $p < 0,001$) e positivamente com MGT ($r = 0,863$; $p < 0,001$), indicando que quanto mais precoce o início da germinação, maior a velocidade e menor o tempo médio. Esses resultados reforçam a importância do TIG como indicador do vigor inicial, que também são citados por Ferreira & Borghetti (2004).

A organização temporal da germinação foi avaliada pelos parâmetros uniformidade (U), entropia (H) e sincronia (Z), como mostrado na Figura 22.

Figura 22: Correlação entre uniformidade (U) e coeficiente de variação do tempo (CVt).



Fonte: A autora (2026).

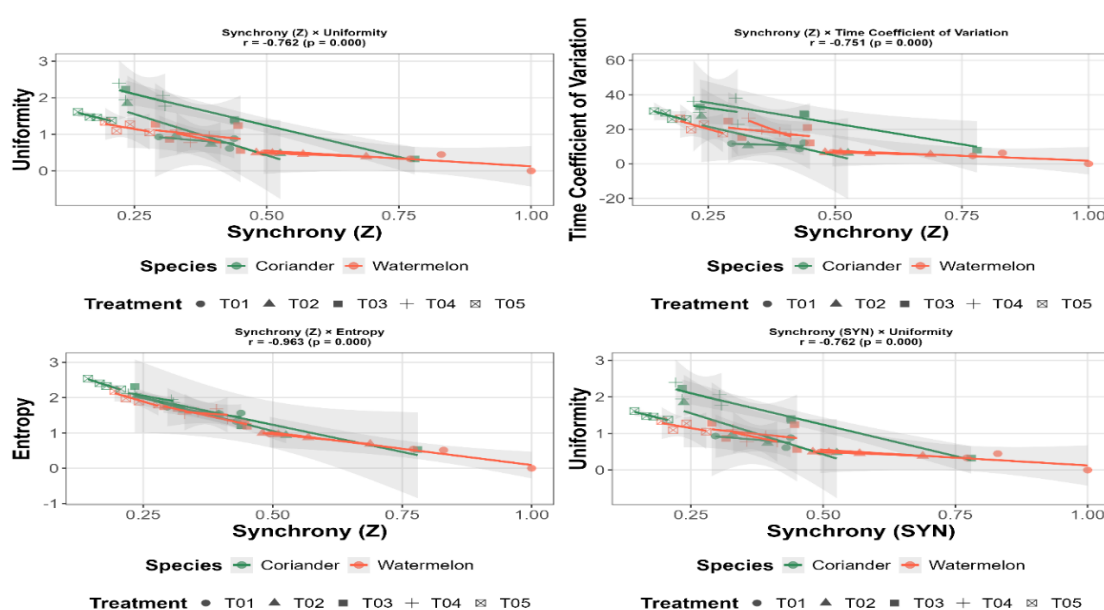
A entropia (H) e a uniformidade (U) são parâmetros complementares que descrevem diferentes aspectos da distribuição temporal da germinação. A entropia (H) mede a incerteza associada à distribuição dos eventos germinativos ao longo do tempo, sendo maior quando as frequências relativas de germinação são mais uniformemente distribuídas entre os dias avaliados (Labouriau, 1983). A uniformidade (U), por sua vez, quantifica o grau de homogeneidade da distribuição, sendo calculada a partir das frequências acumuladas.

Observou-se uma correlação positiva forte entre H e U ($r = 0,82$; $p < 0,001$) e entre H e o coeficiente de variação do tempo (CVt) ($r = 0,819$; $p < 0,001$), como mostrado na Figura 22. Embora possa parecer contra-intuitivo, esse padrão é matematicamente consistente, pois populações nas quais a germinação se distribui de forma mais equilibrada ao longo de vários dias tendem a apresentar tanto maior entropia (porque há maior incerteza sobre o dia exato da germinação) quanto maior uniformidade (porque as porcentagens diárias são mais semelhantes entre si). Em contrapartida, populações com germinação altamente sincronizada e concentrada em poucos dias apresentam baixa entropia (pouca incerteza) e baixa uniformidade (distribuição desigual das frequências diárias). Ressalta-se, contudo, que a interpretação conjunta desses

parâmetros deve ser feita com cautela, pois diferentes combinações de distribuições temporais podem produzir valores similares de H e U (Ranal & Santana, 2006).

A sincronia (Z) apresentou correlações negativas fortes com U ($r = -0,762$; $p < 0,001$), com CVt ($r = -0,751$; $p < 0,001$) e com H ($r = -0,963$; $p < 0,001$), como podemos observar na Figura 23. Isso significa que populações mais sincronizadas (Z alto) têm menor uniformidade (U baixo), menor variabilidade temporal (CVt baixo) e menor entropia (H baixo).

Figura 23: Correlações da sincronia (Z) com uniformidade (U), coeficiente de variação do tempo (CVt) e entropia (H).

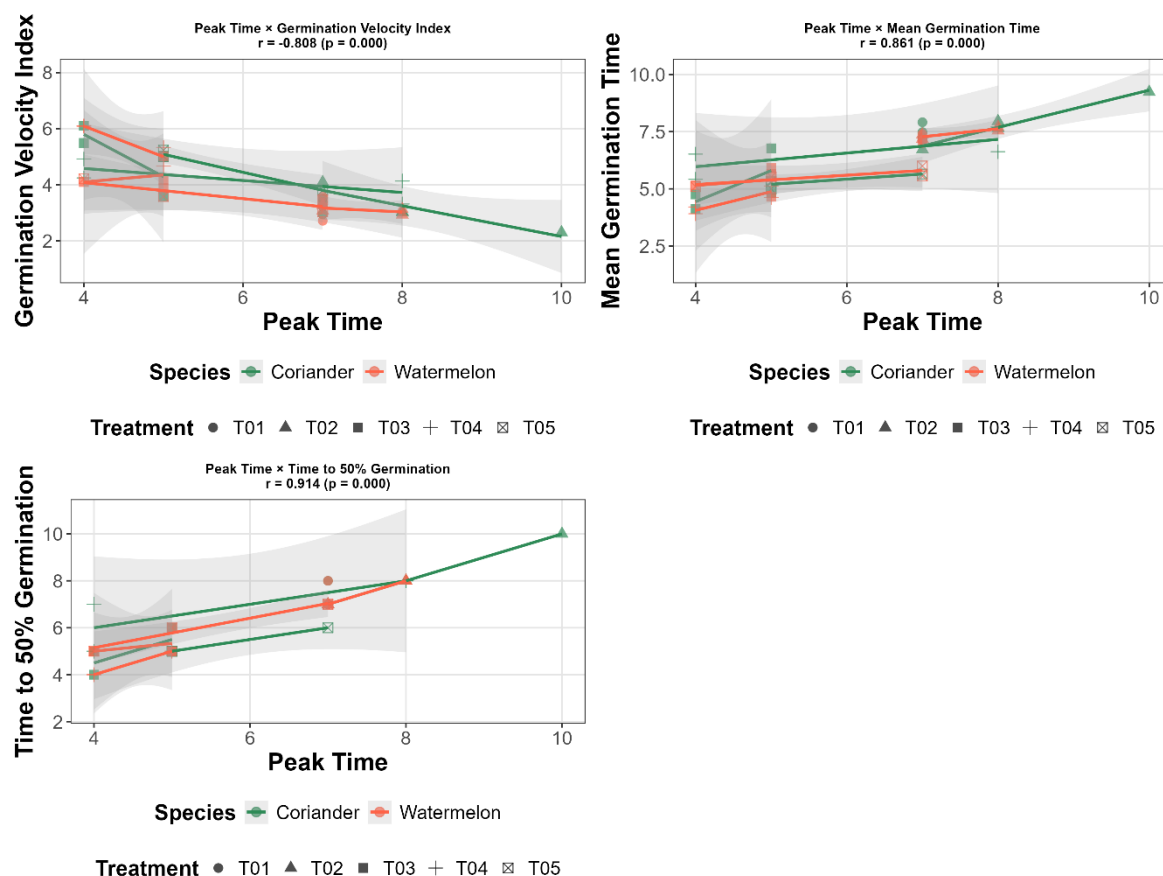


Fonte: A autora (2026).

A sincronia reflete a concentração da germinação em um curto intervalo, enquanto a uniformidade mede a distribuição ao longo do tempo. Portanto, são conceitos complementares: alta sincronia implica germinação concentrada, o que reduz a uniformidade (pois a germinação não é distribuída igualmente ao longo dos dias). Esses resultados estão de acordo com Labouriau (1983), que descreve a sincronia como um aspecto da germinação relacionado à concentração temporal.

O valor de pico (PV) e o tempo de pico (PT) são medidas relacionadas à intensidade máxima de germinação. A Figura 24 mostra correlações fracas entre PV e IVG, GR e FGP, sendo significativa apenas com FGP ($r = 0,425$; $p = 0,006$). Isso indica que populações com maior germinação final tendem a ter picos mais altos, mas a velocidade não está diretamente associada à magnitude do pico.

Figura 24: Correlações do valor de pico (PV) com IVG, GR e FGP.



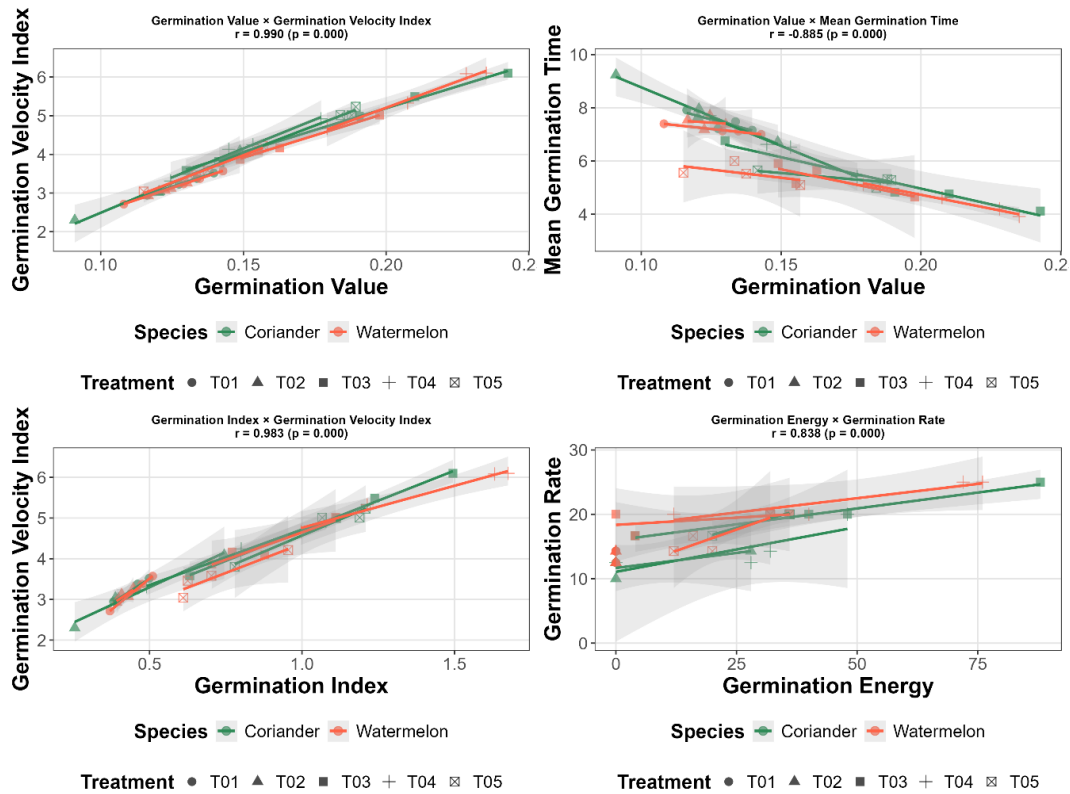
Fonte: A autora (2026).

Parâmetros como tempo médio e índice de velocidade de germinação são fundamentais para caracterizar a dinâmica do processo, pois quanto mais tardio o pico de germinação, maior será o tempo médio e menor a velocidade. Como resultado, observou-se que o tempo de pico (PT) se correlacionou fortemente com MGT ($r = 0,861$; $p < 0,001$) e com T50 ($r = 0,914$; $p < 0,001$), e negativamente com IVG ($r = -0,808$; $p < 0,001$). Assim, quanto mais tarde ocorre o pico, maior o tempo médio e mais lenta a germinação, como esperado.

As Figuras 25 e 26 apresentam correlações integrativas entre parâmetros cinéticos e de organização. A Figura 25 mostra a relação entre valor de germinação (GV) e IVG ($r = 0,99$; $p < 0,001$) e entre GV e MGT ($r = -0,88$; $p < 0,001$), confirmando que GV é um excelente indicador do desempenho germinativo global.

Figura 25: Correlações integrativas entre valor de germinação (GV) e parâmetros cinéticos.

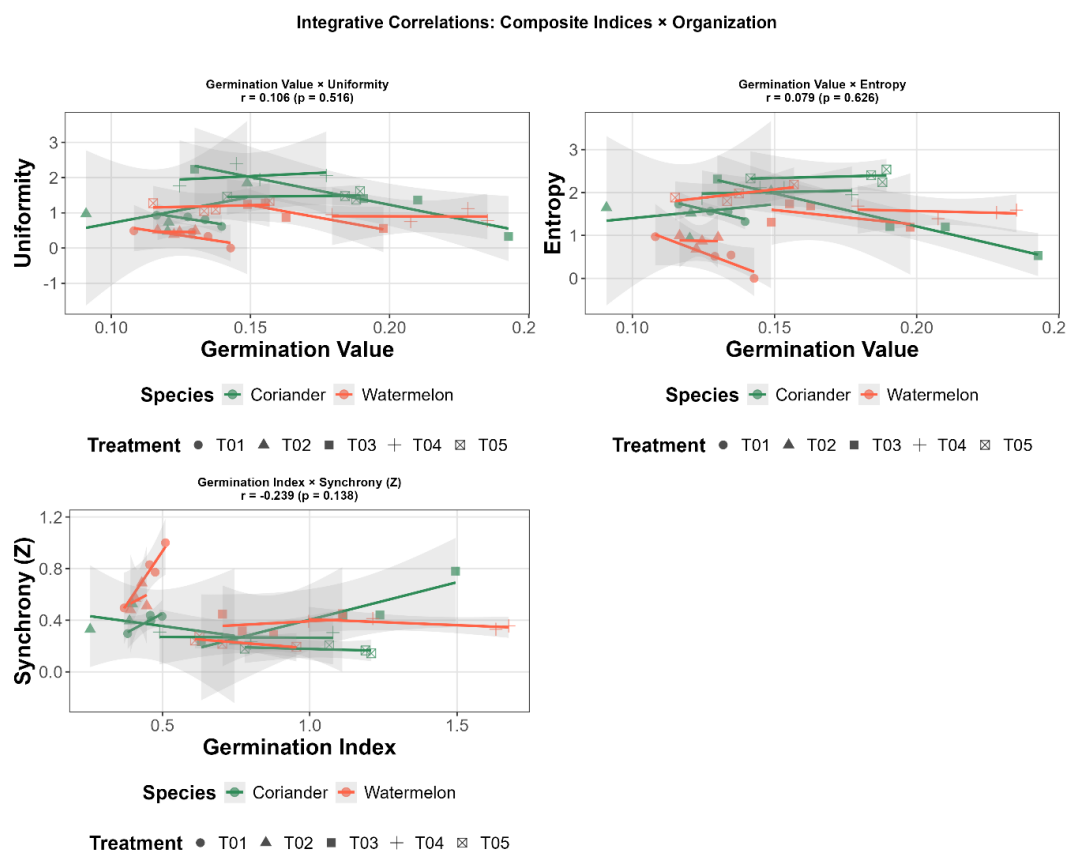
Integrative Correlations: Composite Indices × Kinetics



Fonte: Elaborado pela autora (2026)

A Figura 26, por sua vez, ilustra a relação entre valor de germinação (GV) e entropia (H), mostrando uma correlação negativa fraca e não significativa ($r = -0,16$; $p = 0,31$), indicando que o valor de germinação não está diretamente relacionado à entropia.

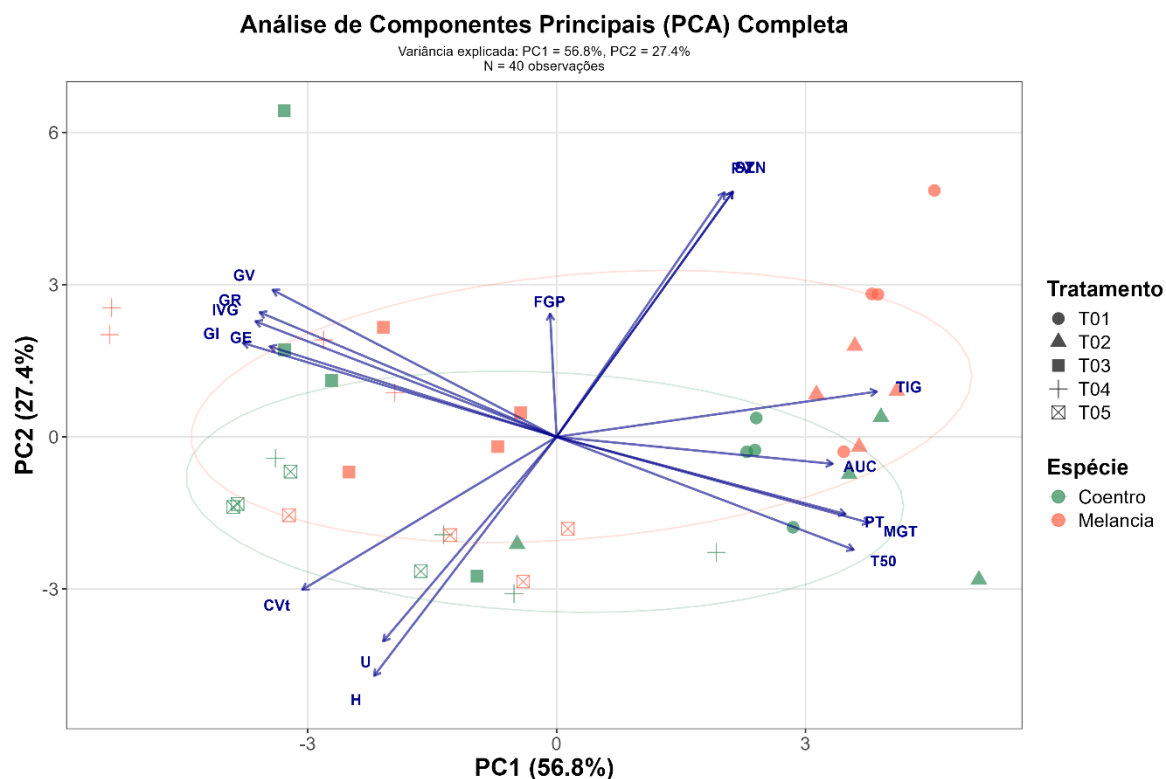
Figura 26: Correlação entre valor de germinação (GV) e entropia (H).



Fonte: A autora (2026).

Para sintetizar as relações multivariadas entre todos os parâmetros germinativos e visualizar a separação entre as espécies, realizou-se uma análise de componentes principais (PCA). O biplot resultante na Figura 27, explicou 84,2% da variância total nos dois primeiros componentes (PC1: 56,8%; PC2: 27,4%). Observa-se uma clara separação entre as espécies ao longo do eixo PC1: o coentro (círculos vermelhos) associou-se a maiores valores de entropia (H) e sincronia (Z), indicando germinação mais distribuída ao longo do tempo, porém com maior sincronia em alguns tratamentos. A melancia (triângulos azuis) agrupou-se com maiores IVG e menores MGT e T50, refletindo sua germinação mais rápida, porém com menor entropia e sincronia variável. Os vetores mostram que parâmetros como GV, GI e IVG estão fortemente associados entre si e orientados na mesma direção, enquanto MGT e T50 apontam na direção oposta. A posição dos tratamentos indica que T03 e T05 em ambas as espécies tendem a se deslocar para a região de maior velocidade (IVG, GV), enquanto T01 e T02 posicionam-se na região de maior MGT e T50. Essa análise multivariada corrobora a hipótese de que as estratégias germinativas diferem entre as espécies e são moduladas pelos tratamentos com AgNPs (Menegati et al., 2020).

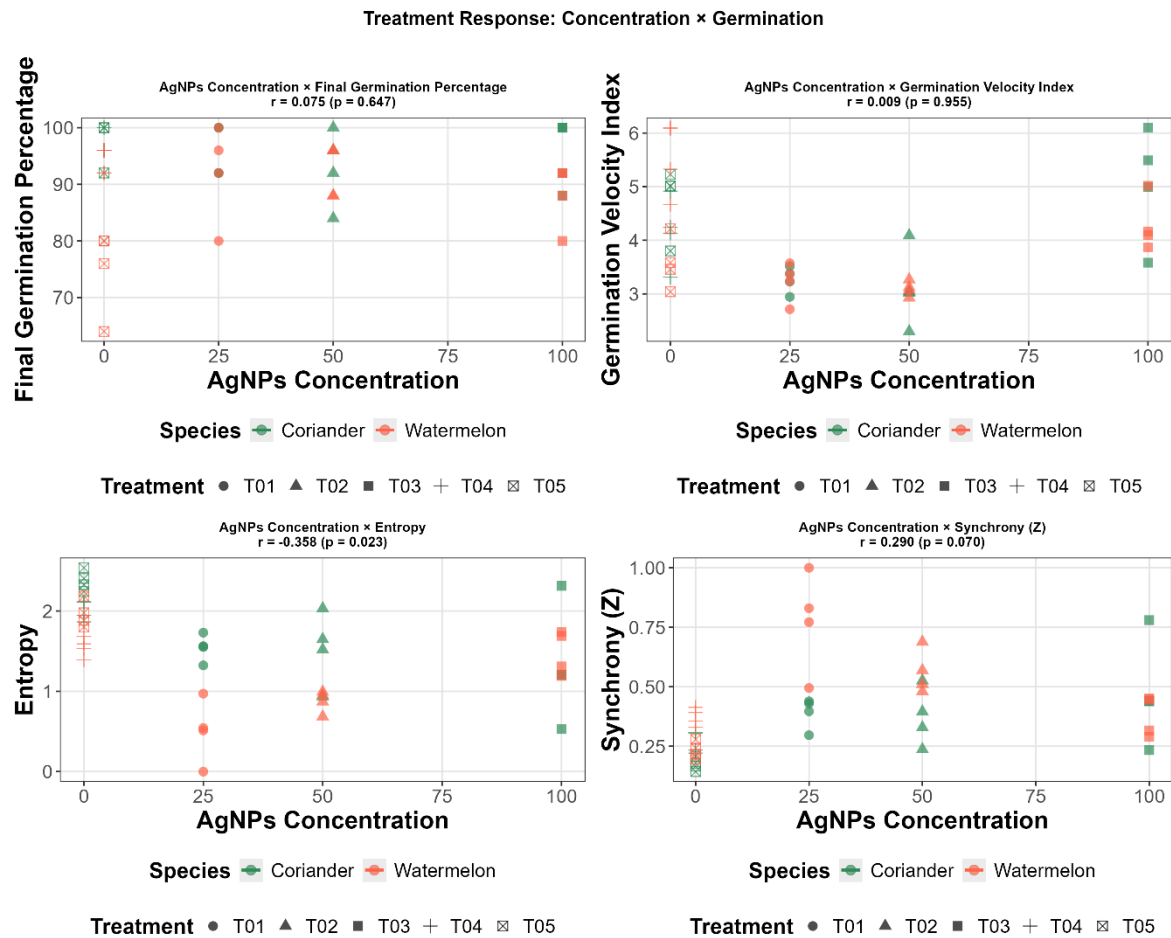
Figura 27: Biplot da análise de componentes principais (PCA) para os parâmetros germinativos de coentro e melancia sob diferentes tratamentos com AgNPs.



Fonte: A autora (2026).

A Figura 28 avalia o efeito da concentração de AgNPs sobre os parâmetros germinativos. Observa-se que a concentração se correlacionou negativamente com a entropia ($r = -0,36$; $p = 0,023$) e positivamente com a sincronia ($r = 0,29$; $p = 0,07$), sugerindo que concentrações mais altas de AgNPs tendem a reduzir a entropia e aumentar a sincronia, ou seja, tornam a germinação mais concentrada no tempo. Esse efeito pode estar relacionado à ativação de mecanismos de resposta ao estresse que sincronizam a germinação. No entanto, a correlação com FGP e IVG não foi significativa, indicando que a capacidade e a velocidade não são linearmente afetadas pela concentração na faixa estudada.

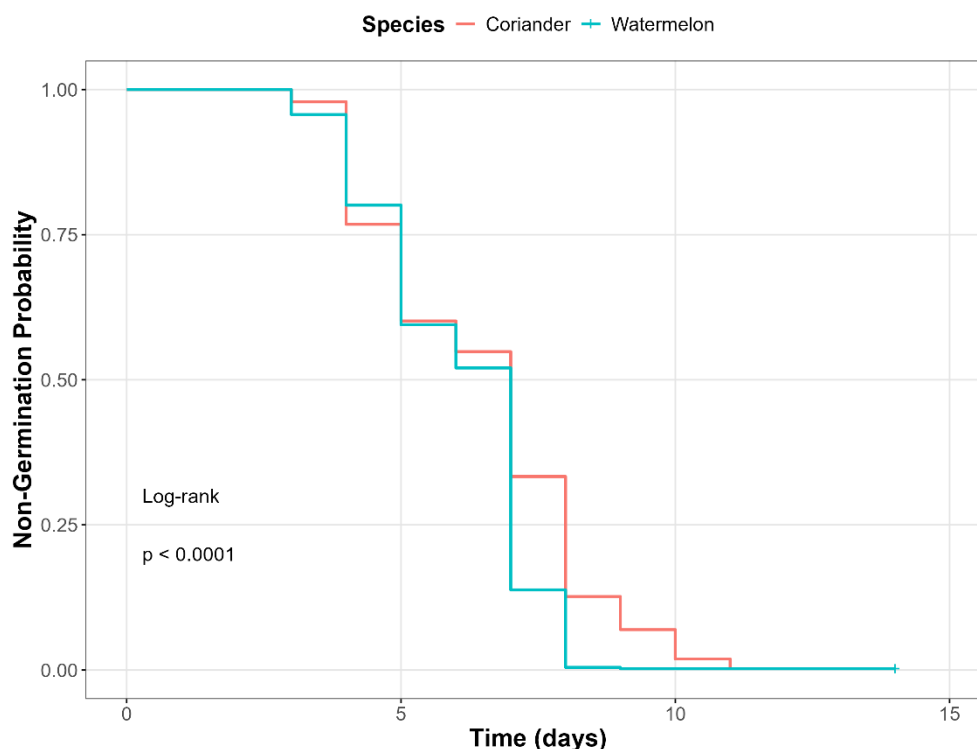
Figura 28: Correlações da concentração de AgNPs com parâmetros germinativos (FGP, IVG, sincronia, entropia).



Fonte: A autora (2026).

Para complementar a análise dos parâmetros germinativos pontuais, empregou-se a análise de sobrevivência por curvas de Kaplan-Meier, que permite avaliar a dinâmica temporal da germinação de forma contínua. A Figura 29 apresenta as curvas de probabilidade de não germinação para as duas espécies, considerando os tratamentos avaliados.

Figura 29: Curvas de Kaplan-Meier para a probabilidade de não germinação de sementes de coentro e melancia expostas a diferentes concentrações de AgNPs.



Fonte: A autora (2026).

A seta vertical indica o momento em que os dados de coentro foram censurados, aos 6 dias, enquanto a melancia foi acompanhada até 14 dias. O teste de log-rank confirmou diferença altamente significativa entre as espécies ($\chi^2 = 29,69$; $p = 5,06 \times 10^{-8}$), evidenciando padrões temporais distintos. O coentro apresentou queda mais acentuada e precoce da probabilidade de não germinação, indicando processo germinativo mais concentrado no tempo.

Essa diferença basal entre as espécies foi confirmada pelo teste de log-rank, apresentado na Tabela 16, que demonstrou efeitos altamente significativos de espécie ($\chi^2 = 29,69$; $p = 5,06 \times 10^{-8}$), tratamento ($\chi^2 = 274,11$; $p < 2,2 \times 10^{-16}$) e interação espécie $\times$ tratamento ($\chi^2 = 457,29$; $p < 2,2 \times 10^{-16}$).

Tabela 16: Testes de log-rank para comparação das curvas de germinação (análise de sobrevivência).

Fator	χ^2	gl	p-valor
Espécie	29,69	1	$5,06 \times 10^{-8}$
Tratamento	274,11	4	$< 2,2 \times 10^{-16}$
Interação (E $\times$ T)	457,29	9	$< 2,2 \times 10^{-16}$

Fonte: A autora (2026).

A significância da interação valida a abordagem de analisar as respostas de forma espécie-específica, como discutido nas seções anteriores, e sugere que as AgNPs modulam o tempo do evento germinativo de maneira distinta para cada cultura. Esse comportamento pode estar associado a diferenças na velocidade de hidratação, na produção de espécies reativas de oxigênio e na ativação de enzimas relacionadas à mobilização de reservas, conforme discutido por Rajeshkumar e Bharath (2017).

Os testes de normalidade de Shapiro-Wilk, apresentados na Tabela 17, indicaram que a maioria das variáveis apresentou distribuição compatível com a normalidade dentro dos grupos experimentais. As principais exceções foram FGP e T50. Esses resultados justificam o uso de transformações ou modelos robustos para esses parâmetros, enquanto variáveis como MGT, IVG, AUC, H e Z apresentaram melhor aderência aos pressupostos paramétricos.

Tabela 17: Resumo dos testes de normalidade (Shapiro–Wilk) por grupo experimental.

Variável N° de grupos com violação ($p < 0,05$)	
FGP	4
MGT	0
IVG	1
T50	5
U	0
H	0
Z	0
SYN	0
GI	0
AUC	0

Fonte: A autora (2026).

Os modelos mistos lineares indicaram baixa variância atribuída ao efeito “réplica” em comparação com o erro residual, como mostrado na Tabela 18. Para FGP, por exemplo, a variância da réplica foi 1,42, enquanto a variância residual foi 37,38. A pequena contribuição da réplica sugere boa repetibilidade experimental e padronização metodológica. Segundo Colosimo (2023), modelos mistos permitem decompor a variância em efeitos fixos e aleatórios, de modo que baixa variância atribuída ao efeito aleatório indica consistência experimental.

Tabela 18: Componentes de variância dos modelos mistos lineares.

Variável	Efeito	Variância	Desvio Padrão
FGP	Réplica	1,42	1,19
FGP	Residual	37,38	6,11
IVG	Réplica	0,108	0,328

Variável	Efeito	Variância	Desvio Padrão
IVG	Residual	0,265	0,514
MGT	Réplica	0,143	0,379
MGT	Residual	0,284	0,533
AUC	Réplica	745,2	27,3
AUC	Residual	2800,2	52,9

Fonte: A autora (2026).

O procedimento stepwise é uma técnica de seleção de variáveis que busca identificar os preditores mais relevantes para explicar a variabilidade de uma resposta, reduzindo redundâncias associadas à colinearidade (Hair et al., 2009). O modelo selecionado, apresentado na Tabela 19, explicou 99,9% da variação de FGP, indicando elevada capacidade preditiva dentro do conjunto de dados avaliado.

Tabela 19: Coeficientes significativos do modelo de regressão stepwise para FGP.

Preditor	Estimativa	Erro Padrão	t valor	p-valor
Intercepto	55,36	4,277	12,94	$9,17 \times 10^{-12}$
MGT	-4,416	0,301	-14,66	$7,75 \times 10^{-13}$
IVG	13,24	0,510	25,96	$5,37 \times 10^{-18}$
H	-1,157	0,212	-5,46	$1,73 \times 10^{-5}$
Z	-4,390	0,997	-4,40	$2,26 \times 10^{-4}$
GI	-11,34	1,651	-6,87	$6,74 \times 10^{-7}$
GE	-0,0119	0,00306	-3,90	$7,64 \times 10^{-4}$
AUC	0,0701	0,00150	46,84	$1,56 \times 10^{-23}$
Taxa_Máxima	0,0718	0,0311	2,31	0,031
Duração_Germinação	0,177	0,0389	4,56	$1,54 \times 10^{-4}$
CVt	-0,116	0,0137	-8,42	$2,51 \times 10^{-8}$
CVG	-1,358	0,132	-10,30	$7,01 \times 10^{-10}$

Fonte: A autora (2026).

Os principais determinantes positivos foram IVG ($\beta = 13,24$; $p < 10^{-17}$), AUC ($\beta = 0,0701$; $p < 10^{-23}$), Duração da Germinação e Taxa Máxima. Por outro lado, os efeitos negativos mais expressivos estão relacionados a MGT ($\beta = -4,416$), CVt ($\beta = -0,116$), CVG ($\beta = -1,358$) e GI (coeficiente negativo possivelmente associado à colinearidade). Nesse contexto, o modelo confirma que a germinação final é predominantemente governada pela dinâmica temporal do processo, especialmente pela velocidade e pela área acumulada da curva germinativa.

Por fim, os parâmetros complementares apresentados na Tabela 20 reforçam a interpretação cinética. Em coentro, os tratamentos T03-T05 aumentaram CVG e GR, indicando aceleração do processo. Em melancia, T04 apresentou os maiores valores de CVG (22,61%) e

GR ($22,50 \text{ dias}^{-1}$), consistentes com menor T50 observado anteriormente, enquanto a duração da germinação foi maior em tratamentos associados a maior dispersão temporal.

Tabela 20: Médias e desvios padrão de parâmetros complementares de germinação.

Espécie	Trat.	CVG (%)	GR (dias^{-1})	GE (%)	PV (%)	PT (dias)	Taxa_Máx (%/dia)	Duração (dias)
Coentro	T01	$13,46 \pm 0,60$	$13,84 \pm 0,89$	$0,0 \pm 0,0$	$0,54 \pm 0,10$	$7,0 \pm 0,0$	$13,5 \pm 2,38$	$3,25 \pm 0,96$
Coentro	T02	$12,83 \pm 1,67$	$12,32 \pm 1,76$	$7,0 \pm 14,0$	$0,47 \pm 0,13$	$8,3 \pm 1,3$	$11,8 \pm 3,30$	$3,25 \pm 2,06$
Coentro	T03	$20,19 \pm 3,96$	$20,42 \pm 3,44$	$45 \pm 34,5$	$0,56 \pm 0,22$	$4,5 \pm 0,6$	$14,0 \pm 5,42$	$5,50 \pm 3,00$
Coentro	T04	$15,47 \pm 2,26$	$14,82 \pm 3,55$	$27 \pm 20,0$	$0,40 \pm 0,09$	$6,0 \pm 2,3$	$10,0 \pm 2,31$	$6,75 \pm 0,50$
Coentro	T05	$18,86 \pm 0,94$	$19,17 \pm 1,67$	$31 \pm 7,6$	$0,26 \pm 0,04$	$5,5 \pm 1,0$	$6,5 \pm 1,0$	$5,75 \pm 0,50$
Melancia	T01	$13,96 \pm 0,32$	$13,84 \pm 0,89$	$0,0 \pm 0,0$	$0,79 \pm 0,22$	$7,0 \pm 0,0$	$19,8 \pm 5,50$	$1,00 \pm 0,82$
Melancia	T02	$13,43 \pm 0,41$	$13,39 \pm 1,03$	$0,0 \pm 0,0$	$0,62 \pm 0,11$	$7,5 \pm 0,6$	$15,5 \pm 2,65$	$1,00 \pm 0,0$
Melancia	T03	$18,88 \pm 2,03$	$19,17 \pm 1,67$	$18 \pm 18,6$	$0,46 \pm 0,11$	$4,8 \pm 0,5$	$11,5 \pm 2,65$	$3,00 \pm 0,82$
Melancia	T04	$22,61 \pm 2,63$	$22,50 \pm 2,89$	$50 \pm 30,0$	$0,50 \pm 0,05$	$4,5 \pm 0,6$	$12,5 \pm 1,29$	$3,50 \pm 0,58$
Melancia	T05	$18,09 \pm 1,20$	$16,31 \pm 2,70$	$20 \pm 8,6$	$0,26 \pm 0,04$	$5,8 \pm 1,5$	$6,5 \pm 1,0$	$3,25 \pm 0,50$

Fonte: A autora (2026).

Segundo Labouriau (1983) e Ranal e Santana (2006), índices como CVG, GR e T50 são essenciais para compreender a dinâmica temporal da germinação, pois descrevem tanto a velocidade quanto a uniformidade do processo. Os resultados obtidos sugerem que, em determinadas concentrações, as AgNPs podem induzir respostas bifásicas, estimulando a velocidade germinativa sem necessariamente comprometer a germinação final. Essa interpretação está de acordo com Vannini et al. (2014) e Tripathi et al. (2017), que relatam efeitos horméticos de nanopartículas de prata em plantas, com estímulo em baixas doses e efeitos inibitórios em concentrações mais elevadas.

A interpretação dos efeitos alelopáticos deve, portanto, evitar generalizações. Os resultados indicam uma resposta dependente da espécie, da concentração e do parâmetro analisado. Essa leitura é mais consistente com a literatura sobre nanomateriais em plantas, na qual respostas de estímulo, neutralidade ou inibição podem ocorrer em função da dose, da composição superficial das partículas e da sensibilidade fisiológica da espécie avaliada.

6 CONCLUSÃO

A presente pesquisa demonstrou que o extrato aquoso de *Endopleura uchi* apresenta perfil espectroscópico compatível com a presença de metabólitos secundários capazes de participar da síntese verde de nanopartículas de prata. A estabilidade do extrato foi observada por curto período após o preparo, indicando que o tempo de uso é uma variável importante para a reprodutibilidade do processo. A prospecção fitoquímica confirmou a presença de classes químicas relevantes, como fenóis, taninos, flavonoides, catequinas, terpenos, saponinas e alcaloides.

2³A síntese de AgNPs mediada por *E. uchi* foi favorecida pela condição pH 8,0, temperatura de 30 °C e concentração de extrato de 1,0%. O delineamento fatorial com três réplicas e a análise estatística robusta indicaram que a concentração do extrato foi o fator predominante no controle da resposta espectral, seguida pelo efeito do pH. A temperatura, dentro da faixa avaliada, não exerceu efeito relevante. Esses resultados reforçam a importância de associar síntese verde a planejamento experimental e inferência estatística adequada, evitando conclusões baseadas apenas em observações visuais ou em ensaios sem replicação.

Na avaliação alelopática, o coentro manteve elevada porcentagem final de germinação em todos os tratamentos, sem diferenças estatisticamente significativas para esse parâmetro. A melancia, por sua vez, apresentou maior sensibilidade em variáveis temporais, especialmente nos tratamentos com AgNPs em baixas concentrações. O extrato aquoso também apresentou efeito espécie-dependente, acelerando a germinação do coentro e reduzindo ou retardando parâmetros germinativos da melancia. Esses resultados indicam que a resposta às AgNPs e ao extrato não pode ser generalizada, pois depende da espécie vegetal e do parâmetro fisiológico analisado.

Conclui-se que o extrato aquoso de *Endopleura uchi* e as AgNPs obtidas por síntese verde apresentam potencial como sistemas de interesse para estudos na interface entre nanotecnologia, química verde e fisiologia vegetal. Contudo, para fortalecer futuras aplicações agrícolas, recomenda-se ampliar a caracterização físico-química das AgNPs, incluindo tamanho, morfologia, distribuição de tamanho, carga superficial e grupos funcionais envolvidos na estabilização, além de realizar ensaios com maior número de espécies, diferentes estágios de desenvolvimento e condições experimentais mais próximas de sistemas agrícolas reais.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEL, M. C. N., SANTIAGO, E. F., SILVA, A. F. G., MOTA, J. DA S., & PONTES, M. DA S. Potencial antioxidante e síntese de nanopartículas de óxido de cobre a partir de extratos vegetais de *Piper amalago* L. (Piperaceae). *Ciência e Natura*, v. 44, n. (59). 2022.
- ABDELGHFFAR, E. A., MOHAMMEDSALEH, Z. M., OSAILAN, R., ELAIMI, A., OUCHARI, W., ABDELFATTAH, M. A., MAHMOUD, M. F., & SOBEH, M. O extrato de casca de *Uxi* (*Endopleura uchi* (Huber) Cuatrec) mitiga a adiposidade induzida por HFD em ratos por meio do direcionamento do estresse oxidativo e da expressão de genes lipogênicos. *Jornal de Alimentos Funcionais*. V. 114, p. 106034. (2024).
- ABREU, VIVIANE GOMES DA COSTA et al. Pentacyclic triterpenes and steroids from the stem bark of *uchi* (*Sacoglottis uchi*, Humiriaceae). *Acta Amazônica*, v. 43, p. 525-528, 2013.
- Adewuyi, R. A., & Oderinde, O. (2023). Biogenic synthesis of silver nanoparticles: Influence of extract concentration and thermal conditions on particle stability. *International Journal of Green Chemistry*, 45(3), 215–229.
- AHMED, S. et al. A Review on Plants Extract Mediated Synthesis of Silver Nanoparticles for Antimicrobial Applications: A Green Expertise. *Journal of Advanced Research*, 2016. 7: 17-28.
- AHMAD, R., et al. Silver nanoparticles modulate seed germination and growth under allelopathic stress in *Citrullus lanatus*. *Journal of Nanobiotechnology*, 2022.
- ALBARICI, T. R.; PESSOA, J. D. C.; FORIM, M. R. Efeito das variações de pH e temperatura sobre as antocianinas na polpa de açaí: estudos espectrofotométricos e cromatográficos. EMBRAPA. ISSN 1517-4786. São Carlos, SP 2006.
- ALMEIDA-BEZERRA, J. W.; VIANA, J. W. M.; SILVA, V. B.; COSTA, A. R.; COSTA, M. H. N.; SANTOS, M. A. F.; MACEDO, G. F.; LIMA, E. E.; TORQUATO, I. H. S.; RODRIGUES, J. L. G. Alelopatia? Não sei! Nunca Vi! Eu só ouço falar! *Research, Society and Development*, v. 9, n. 12, 2020.
- ÁLVAREZ-LÓPEZ, V., PRIETO-FERNÁNDEZ, Á., CABELLO-CONEJO, M. I., e KIDD, P. S. Organic amendments for improving biomass production and metal Ni hyperaccumulating plants. *Science of the total environment*, v. 548, p. 370-379, 2016.
- ANEEL. Tarifas de energia elétrica – indústria. Sistema de Informações de Geração da ANEEL, fev/2026 (projeção).
- ANASTAS, Paul T.; WARNER, John C. *Green chemistry: theory and practice*. Oxford university press, 2000.
- ASTOLFI-FILHO, S.; SILVA, C. G. N.; BIGI, M. F. M. A. Bioprospecção e biotecnologia. *Parcerias Estratégicas*, v. 19, n. 38, p. 45-80, 2014.
- AWWAD, AKL M. et al. Síntese verde de nanopartículas de óxido de zinco (ZnO-NPs) usando extratos de frutas de *Ailanthus altissima* e atividade antibacteriana. *Chem. Int*, v. 6, n. 3, pág. 151-159, 2020.
- BAIRD, Colin; CANN, Michael. *Environmental Chemistry*. 5. ed. New York: W. H. Freeman and Company, 2012.
- BAJRACHARYA, Gan B. Diversity, pharmacology and synthesis of bergenin and its derivatives: Potential materials for therapeutic usages. *Fitoterapia*, v. 101, p. 133-152, 2015.

BARBOSA, A. de M.; REBELO, V. S. M.; MARTORANO, L. G.; GIACON, V. M. Characterization of acai waste particles for civil construction use. *Revista Matéria*, v. 24, n. 3, 2019.

BARRINGER, H. P. *A Life Cycle Cost Summary*. Barringer & Associates, 2003.

BASTOS, A. R. et al. Economic feasibility of green-synthesized gold nanoparticles for biomedical applications. *Nanomedicine*, v. 17, n. 15, p. 1123-1138, 2022.

BASTOS, LÍLIAN MACEDO. Contribuição ao conhecimento da composição fenólica e avaliação do potencial antioxidante das cascas de *Endopleura uchi* (Huber) Cuatrec. 2020. 122 f. Tese (Doutorado em Inovação Farmacêutica) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2020.

BERNARDO, Wagner Luis de Carvalho. Biossíntese (Green Synthesis): Caracterização e ação antimicrobiana do extrato e das nanopartículas de prata (AgNPs) da semente, flor e folha de *Syzygium cumini*: estudo in vitro: ação antibiofilme e citotóxica da folha de *S. cumini* e sua AgNP. 2020.

BORGES, Jaqueline CM et al. Antinociceptive activity of acetylberginin in mice. **Lat. Am. J. Pharm**, v. 30, n. 7, p. 1303-1308, 2011.

BRANCO, N. V.; ALAGIA, H. F.; LUNA, F. M.; FR. Effect of uxi (*Endopleura uchi*) tea in hepatic steatosis. *Revista da Sociedade de Medicina*, v. (16), p. 25-9, 2018.

BRAND-WILLIAMS, W.; CUVELIER, M. E. E BERSET, C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologies. Food Science and Technology*, v. 28, p. 25-30, 1995.

CALABRESE, E. J., & Baldwin, L. A. (2003). Hormesis: the dose-response revolution. *Annual Review of Pharmacology and Toxicology*, 43(1), 175-197. DOI: 10. 1146/annurev. pharmtox. 43. 100901. 140223.

CÁMARA-LERET R, BASCOMPT J. Language extinction triggers the loss of unique medicinal knowledge. *Biological Sciences*. Jun v. 8, n. 11, 2021.

CARVALHO, S. AMANDA & AVILA, SHIRLEY & DOS SANTOS, HUGO LEANDRO & SANTANA, FABRICIO & MOURA, CINDY & YUDI, RODRIGO. **Atividade in vitro de nanopartículas de zinco contra agentes patogênicos de peixes**. 2022.

CARVALHO, Marcos Schleiden Sousa. *Triagem fitoquímica, atividade antioxidante, alelopática e ação no ciclo celular dos extratos de hortaliças não convencionais*. 2017. Tese (Doutorado em Agronomia/Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. Orientadora: Profa. Dra. Luciane Vilela Resende.

CHAVES, J. O.; DE SOUZA, M. C.; DA SILVA, L. C.; LACHOS-PEREZ, D.; TORRES MAYANGA, P. C.; MACHADO, A. P. D. F.; ROSTAGNO, M. A. Extraction of flavonoids from natural sources using modern techniques. *Frontiers in Chemistry*, v. 8, artigo 507887, 2020.

CHEN, Y. et al. Green synthesis of silver nanoparticles: an economic analysis. *Journal of Cleaner Production*, v. 295, 126379, 2021.

CHITHRA, V.; LEELAMMA, S. *Coriandrum sativum*: Effect on lipid metabolism in 1, 2-dimethyl hydrazine induced colon cancer. *Journal of ethnopharmacology*, v. 71, n. 3, p. 457-463, 2000.

CLAUDIANO, A. R. F; RODRIGUES, P. O. P. Nanotecnologia aplicada ao tratamento do câncer. Duque de Caxias. RJ. UNIGRANRIO, 2021.

CNPq. Tabela de valores de bolsas no país – doutorado. Portaria CNPq nº 1. 500/2026.

<http://www.est.ufmg.br/~enricoc/> COLOSIMO, Enrico A. Análise de dados longitudinais: modelos lineares mistos. Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Estatística. Disponível em: <http://www.est.ufmg.br/~enricoc/>, 2023.

COSTA, A. F. Farmacognosia. 3ª Edição. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2001. V. 3, 1032p.

CUATRECASAS, J. A. A taxonomic revision of Humiriaceae, Contributions from the United States National Herbarium. **Bulletin of the United States National Museum**. Parte 2, v. (35), 1961.

DA SILVA CÂMARA, NÁDIA LÍVIA AMORIM; VIANA, DEUZUÍTA DOS SANTOS FREITAS; VIANA, VICENTE GALBER FREITAS. Síntese e caracterização de nanopartículas de prata estabilizada em extrato de *Struthanthus Flexicaulis* Mart. (Erva-de-Passarinho). **Research, Society and Development**, v. 10, n. 14, p. e146101421983-e146101421983, 2021.

DAVIS, G. N.; WHITAKER, T. W. Cucurbits: botany, cultivation and utilization. London, Leonard Hill, p. 249, 1962.

DE ALMEIDA, A. T. S., DA SILVA XAVIER, J., CALFAS, J. F., DA COSTA SANTOS, N., TAVARES, S. D. DE CARVALHO, S. A. Caracterização de quatro espécies florestais comercializadas nas serrarias de Itacoatiara-AM. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, v. 3, n. (3), p. 918-925. 2020.

DE FREITAS, F. A.; ARAÚJO, R. C.; SOARES, E. R.; NUNOMURA, R. C. S.; DA SILVA, F. M. A.; DA SILVA, S. R. S.; DE SOUZA, A. Q. L.; DE SOUZA, A. D. L.; FRANCO MONTALBÁN, F.; ACHO, L. D. R.; LIMA, E. S.; BATAGLION, G. A.; KOOLEN, H. H. F. Biological evaluation and quantitative analysis of antioxidant compounds in pulps of the Amazonian fruits bacuri (*Platonia insignis* Mart.), ingá (*Inga edulis* Mart.), and uchi (*Sacoglottis uchi* Huber) by UCLAE-IES-EM/MS. *Journal of Food Biochemistry*, v. 42, p. 1-10, 2018.

DE LIMA, R. Q., DE ANDRADE, S. J. T., DA SILVA, S. P., JUNIOR, O. D. S. L., & DE ANDRADE, Â. L. C. Estudo fitoquímico e antimicrobiano da casca de *Endopleura uchi*. *Revista OWL (OWL Journal) -Revista Interdisciplinar de Ensino e Educação*, v. 2, n. (2), p. 37-71. 2024.

DE SÁ HYACIENTH BM, SÁNCHEZ-ORTIZ BL, PICANÇO KRT, PEREIRA ACM, DE SÁ HYACIENTH DC, DE SOUZA GC. *Endopleura uchi* (Huber) Cuatrec. : A medicinal plant for gynecological treatments -A reproductive toxicity assessment in zebrafish (*Danio rerio*). *J Ethnopharmacol*. 250(112457): 112457. 2020.

DE SOUSA, ALESSANDRA CARVALHO; DA SILVA, CRISTINA EMANUELLY; DA COSTA, TAIRIZ TATIANI. A abordagem dos princípios da Química Verde e sustentabilidade no livro didático de química do ensino médio. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, v. 19, n. 3, p. 593-616, 2020.

DIAS, V. C. S., DE SOUZA, G. B., MORAIS, K. T., DE LIRA, V. C. F., DOS REIS, R. B., SIDONIO, A. L. C., MAIA, A. L. UXI (*Endopleura uchi*): matéria prima em potencial para inovações em saúde—revisão bibliográfica. *Brazilian Journal of Health Review*, v. 8, n. (1), e78034-e78034. 2025.

DIAS, D. V. S., ZANCANELLA, C. A., BANDEIRA, D. M., CORREA, J. M., DA SILVA PINTO, F. G., & EISING, R. Síntese verde de nanopartículas de prata utilizando extrato

metanólico de *Podocarpus lambertii* Klotzch ex Endl. *Brazilian Journal of Development*, 7(4), 42062-42072. 2021.

DIEDERICHSEN, A.; et al., *Coriandrum sativum* L. – Coriander. In: NOVAK, J.; BLÜTHNER, W. -D. (Ed.). *Medicinal, aromatic and stimulant plants*. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer, 2020. (Handbook of Plant Breeding, v. 12).

DINÂMICA QUÍMICA. Ácido clorídrico P. A. – especificações técnicas. Catálogo 2026.

DINÂMICA QUÍMICA. Hidróxido de sódio P. A. – especificações técnicas. Catálogo 2026.

DUHAN, J. S., KUMAR, R., KUMAR, N., KAUR, P., NEHRA, K., & DUHAN, S. Nanotechnology: The new perspective in precision agriculture. *Biotechnology Reports*, v. 15, p. 11-23, 2017.

ELIAS, WELMAN C. et al. Screening the Formation of Silver Nanoparticles Using a New Reaction Kinetics Multivariate Analysis and Assessing Their Catalytic Activity in the Reduction of Nitroaromatic Compounds. *The Journal Of Physical Chemistry C*, [s. l.], v. 118, n. 24, p. 12962-12971, 5 jun. 2014.

EMAMGHOREISHI, Masoumeh; KHASAKI, Mohammad; AAZAM, Maryam Fath. *Coriandrum sativum*: evaluation of its anxiolytic effect in the elevated plus-maze. *Journal of ethnopharmacology*, v. 96, n. 3, p. 365-370, 2005.

EMBRAPA. Aproveitamento de resíduos florestais para obtenção de extratos vegetais. Embrapa Amazônia Oriental, 2025.

ERYTHROPEL, Hanno C. et al. The Green ChemisTREE: 20 years after taking root with the 12 principles. **Green chemistry**, v. 20, n. 9, p. 1929-1961, 2018.

ESTIMATIVA PRÓPRIA. Consumo de vidraria, ponteiros e filtros em síntese laboratorial de nanopartículas. fev/2026.

FALCÃO, L. T., TEIXEIRA, G. M., ANTUNES, A. A., & GONZAGA, R. V. *Endopleura uchi*: um breve resumo sobre suas propriedades farmacológicas e a importância das plantas medicinais para a sociedade contemporânea. *RECIMA21-Revista Científica Multidisciplinar*-ISSN 2675-6218, v. 3, n. (11), e3112142-e3112142. 2022.

FEHÉR, T. Watermelon. In: KALLOO, G.; BERGH, B. O. (ed.). *Genetic Improvement of Vegetable Crops*. Oxford: Pergamon Press, 1993. p. 295-311.

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

FERREIRA, A. G.; MAGALHÃES, L. A. M.; LIMA, M. P. Isolamento de Bergenina nos frutos de *Endopleura uchi* (HUMIRIACEAE). In: REUNIÃO ANUAL DA SBPC, 57, 2005, Fortaleza, CE. *Anais eletrônicos da 57ª. Reunião Anual da SBPC*, Fortaleza, 2005.

FERREIRA, I. B. P.; de SOUZA, C. D. R. Estudo do efeito de nanopartícula de ouro incorporadas em catalizadores de dióxido de titânio sintetizado por meio do processo 12 solgel. Congresso Brasileiro de Engenharia Química. 21-24 de julho de 2019.

FRICK, W. et al. The structure of bergenin. **Carbohydrate Research** v. 210, p. 71-77, 1991.

FRICK, W.; SCHMIDT, R. R. Synthesis of bergenin-type C-glucosylarenes. *Carbohydrate research*, v. 209, p. 101-107, 1991.

FURSA, T. B. On the taxonomy of the genus *Citrullus* Schrad. **Botanicheskii Zhurnal**, v. 57, n. 1, p. 31-41, 1972.

- FURLANETO, F. P. B. Nanotecnologia no setor agropecuário. **Revista Pesquisa & Tecnologia**, v. 8, n. 2, 2011.
- GAVANKAR, S. et al. The role of scale in the environmental and economic assessment of emerging nanotechnologies. *Environmental Science: Nano*, v. 6, p. 2307-2318, 2019.
- GRAY, Alison M.; FLATT, Peter R. Insulin-releasing and insulin-like activity of the traditional anti-diabetic plant *Coriandrum sativum* (coriander). *British Journal of Nutrition*, v. 81, n. 3, p. 203-209, 1999.
- GOEL, R. K. et al. Antiulcer activity of naturally occurring pyrano-coumarin and isocoumarins and their effect on prostanoid synthesis using human colonic mucosa. **Indian Journal of Experimental Biology**, v. 35, n. 10, p. 1080-1083, 1997.
- GULLÓN, P. et al. Valorization of fruit processing wastes for the extraction of bioactive compounds: A review. *Food Research International*, v. 152, 110915, 2022.
- HAFEZ, I. et al. Multi-criteria decision analysis in nanotechnology: A review. *Journal of Nanoparticle Research*, v. 24, n. 3, 2022.
- HAIDER, M. Nanocarreadores poliméricos: uma ferramenta promissora para o diagnóstico precoce e tratamento eficiente do câncer colorretal. *Revista Pesquisa Avançada*. V. 39, julho de 2022, Pag. 237-255.
- HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. Análise multivariada de dados. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.
- HALEEM, A. et al. Aplicações da nanotecnologia na área médica: uma breve revisão. **Revista Saúde Global**, v. 7, ed. 2, p. 70-77, 2023.
- HAY, J. Evelyn; HAYNES, L. J. 453. Bergenin, a C-glycopyranosyl derivative of 4-O-methylgallic acid. **Journal of the Chemical Society (Resumed)**, p. 2231-2238, 1958.
- HERZNER, H.; PALMACCI, E. R.; SEEBERGER, P. H. Short total synthesis of 8, 10-di-O-methylbergenin. *Organic Letters*, v. 4, n. 17, p. 2965-2967, 2002.
- HINKELMANN, K.; KEMPTHORNE, O. Design and Analysis of Experiments: Volume I – Introduction to Experimental Design. 2. ed. Hoboken: Wiley, 2008.
- HUARANCCA-HUARCAYA, E.; PAREDES-QUIROZ, L. R.; PILARES-ESTRADA, N. M.; BARRAGÁN-CONDORI, M.; HUAMANÍ-MELÉNDEZ, V. J. Kinetic of thermal degradation of alaybilí (*Vaccinium floribundum* Kunth) and macha-macha (*Gaultheria glomerata* (Cav.) Sleumer) anthocyanins. *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 25, e2021106. p. 1-10. 2022.
- ISPE. *Baseline Guide Vol. 3: Sterile Product Manufacturing Facilities*. 3. ed. International Society for Pharmaceutical Engineering, 2025.
- JEFFREY, C.. A review of the Cucurbitaceae. *Botanical Journal of the Linnean society*, v. 81, n. 3, p. 233-247, 1980.
- JUNG, Jae-Chul et al. Practical synthesis and biological evaluation of bergenin analogs. **Chemical Biology & Drug Design**, v. 78, n. 4, p. 725-729, 2011.
- JUNIOR, Maurício A. Melo; SANTOS, Lucas S. S.; GONÇALVES, Maria do C; NOGUEIRA, Ana Flávia. Preparação de nanopartículas de prata e ouro: um método simples para a introdução na nanociência em laboratório de ensino. *Quim. Nova*, Vol. 35, No. 9, 1872-1878, 2012.
- KAGAN, C. R. et al. Portfolio selection in nanotechnology R&D. *Nature Nanotechnology*, v. 15, p. 798-803, 2020.

- KASHIMA, Y; MIYAZAWA, M. Synthesis and biological evaluation of bergenin analogues as mushroom tyrosinase inhibitors. **Archives of pharmacal research**, v. 35, n. 9, p. 1533-1541, 2012.
- KASHIMA, Y; MIYAZAWA, M. Structure-activity relationships for bergenin analogues as β -secretase (BACE1) inhibitors. **Journal of Oleo Science**, v. 62, n. 6, p. 391-401, 2013a.
- KASHIMA, Y.; MIYAZAWA, M. Synthesis, antioxidant capacity, and structure–activity relationships of tri-O-methylnorbergenin analogues on tyrosinase inhibition. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, v. 23, n. 24, p. 6580-6584, 2013b.
- KHAN, Ibrahim; SAEED, Khalid; KHAN, Idrees. Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, [s. l.], maio 2017.
- KOORNNEEF, M., BENTSINK, L., & HILHORST, H. (2002). Seed dormancy and germination. *Current Opinion in Plant Biology*, 5(1), 33-36.
- KRISHNA, R.; Sie, S. T. Strategies for multiphase reactor selection. *Chemical Engineering Science*, v. 49, p. 4029-4065, 1994.
- KRISHNARAJ, C., et al. (2012). Effect of biologically synthesized silver nanoparticles on *Bacillus* spp. and seed germination of *Vigna radiata*. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 102, 708-713. DOI: 10. 1016/j. colsurfb. 2012. 09. 042.
- KUMAR, T. V. et al. Synthesis and antiglycation potentials of bergenin derivatives. **Bioorganic & medicinal chemistry letters**, v. 21, n. 16, p. 4928-4931, 2011.
- KUMAR, S. et al. Optimization of silver nanoparticle synthesis using response surface methodology and economic evaluation. *Materials Today Chemistry*, v. 26, 101234, 2022.
- KUMARI, MAMTA; MUKHERJEE, A.; CHANDRASEKARAN, N. Genotoxicity of silver nanoparticles in *Allium cepa*. *Science of the total environment*, v. 407, n. 19, p. 5243-5246, 2009.
- KUPPUSAMY, PALANISELVAM et al. Biosynthesis of metallic nanoparticles using plant derivatives and their new avenues in pharmacological applications – An updated report. *Saudi Pharmaceutical Journal*, [s. l.], v. 24, n. 4, p. 473-484, jul. 2016.
- KUTNER, M. H.; NACHTSHEIM, C. J.; NETER, J. *Applied Linear Regression Models*. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2004.
- LABOURIAU, L. G. *A germinação das sementes*. Washington: Secretaria Geral da Organização dos Estados Americanos, 1983.
- LAGOS, I. A. Estudo químico de fitoconstituintes isolados de *Sacoglottis uchi* Huber (Humiriaceae). Dissertação (Mestrado em Química), Universidade Federal do Amazonas, 2006.
- LARIBI, B. et al. Coriander (*Coriandrum sativum* L.) and its bioactive constituents. *Fitoterapia*, v. 103, p. 9-26, 2015.
- LEMOES, T. A. B., VIANA, D. D. S. F., VIANA, V. G. F., DA SILVA LEMOS, M. H., DE FIGUEIRÊDO, G. S., DA SILVA PORTELA, R., DE CARVALHO, A. F. M. A utilização da síntese verde para obtenção de nanopartículas de prata a partir de extratos de girassol (*Helianthus annuus*). *Research, Society and Development*, v. 10, n. (7), e41810716795-e41810716795. 2021.
- LI, X. et al. Techno-economic analysis of bio-based nanoparticle production. *Bioresource Technology*, v. 345, 126538, 2022.

- LIM, H. K. et al. Effects of acetylbergenin against D-galactosamine-induced hepatotoxicity in rats. **Pharmacological Research**, v. 42, n. 5, p. 471-474, 2000.
- LIM, H. K. et al. Protective effects of acetylbergenin against carbon tetrachloride-induced hepatotoxicity in rats. **Archives of Pharmacal Research**, v. 24, n. 2, p. 114-118, 2001.
- LIM, T. K. **Edible medicinal and non-medicinal plants: Volume 2, Fruits**. Dordrecht: Springer, 2016.
- LIMA, R. Q. DE, ANDRADE, S. J. T. DE, SILVA, S. P. DA, JUNIOR, O. DA S. L., & ANDRADE, ÂNGELA L. C. DE. Estudo fitoquímico e antimicrobiano da casca de *Endopleura uchi*. Revista OWL (OWL Journal) - Revista Interdisciplinar De Ensino E Educação, v. 2, n. 2, p. 37-71, 2024.
- LOPES G, SOUSA C, SILVA LR, PINTO E, ANDRADE PB, BERNARDO J, et al. (2012) Os extratos purificados de florotaninos podem constituir uma nova alternativa farmacológica para infecções microbianas com condições inflamatórias associadas? PLoS UM v. 7, n. 2, e31145.
- MACEDO, M. I. F. Nanociência e Nanotecnologia: abordagens, difusão, popularização, questões e desafios numa área multidisciplinar. Congresso Brasileiro de Engenharia de Ciência dos Materiais. Campo Grande, SP. 2022.
- MAGALHÃES, L. A. M.; LIMA, M. P.; MARINHO, H. A.; FERREIRA, A. G. Identificação de bergenina e carotenóides no fruto de uchi (*Endopleura uchi*, Humiriaceae). Acta Amaz., v. 37, n. 3, p. 447-450, 2007.
- MARIOT, M. P.; BARBIERI, R. L. Metabólitos secundários e propriedades medicinais da espinheira-santa (*Maytenus ilicifolia* Mart. ex Reiss. e *M. aquifolium* Mart.). Revista Brasileira de Plantas Medicinais, v. 9, n. 3, p. 89-99, 2007.
- MARQUES, CARLOS ALBERTO; MARCELINO, LEONARDO VICTOR. CTS e Sustentabilidade Ambiental: contribuições a partir da Química Verde. **Revista de Ensino de Ciências e Matemática**, v. 14, n. 5, p. 1-25, 2023.
- MARTINS, S. A.; SANTOS, R. C.; RAMOS, A. R.; FIGUEIREDO, P. L. B.; SILVA, C. R. C.; Journal SILVA, J. K. R. Allelopathic potential and phytochemical screening of *Piper divaricatum* extracts on germination and growth of indicator plant (*Lactuca sativa*). South African of Botany, v. 138, p. 495-499, 2021.
- MATOS, F. J. **Introdução à fitoquímica experimental**. 2. ed. Fortaleza: Ed. UFC, p. 128, 1997.
- MATOS, F. J. **Introdução à fitoquímica experimental**. 5. ed. Fortaleza: Ed. UFC, p. 128, 2009.
- MEDEIROS, H.; HOLANDA, A. S. S.; AMORIM, A. M. A. 2015. Humiriaceae in Lista de Espécies da Flora do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro.
- MENEZES AJEA, DE HOMMA AKO. Recomendações para o plantio do uxizeiro. Brasil Cap. 24, p. 321-328: Extrativismo vegetal na Amazônia: história, ecologia e domesticação; 2014.
- MENSOR, L. L.; MENEZES, F. S.; LEITÃO, G. G.; REIS, A. S.; DOS SANTOS, T. C.; COUBE, C. S.; LEITÃO, S. G. Screening of brazilian plant extracts for antioxidant activity by the use of DPPH free radical method. *Phytotherapy Research*, v. 15, p. 127-130, 2001.
- MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G. *Introduction to Linear Regression Analysis*. 5. ed. Hoboken: Wiley, 2012.

- MUSEE, N. et al. A Monte Carlo-based framework for assessing the economic viability of nanotechnology-enabled water treatment. *Journal of Nanoparticle Research*, v. 23, n. 8, 2021.
- NACZK, M.; SHAHIDI, F. Extractions and analysis of phenolics in food. *Journal of Chromatography A*, v. 1054, n. 1-2, p. 95-111, 2004.
- NADEEM, Muhammad et al. Nutritional and medicinal aspects of coriander (*Coriandrum sativum* L.) A review. *British Food Journal*, v. 115, n. 5, p. 743-755, 2013.
- NAKAI, T. **Ordines, familiae, tribi, genera, sectiones, species, varietates, formae et combinationes novae a Prof. Nakai-Takenosin adhuc ut novis edita: Appendix: Quaestiones characterum naturalium plantarum vel Extractus ex praelectionibus pro aluminis botanicis Universitatis Imperialis Tokyoensis per annos 1926–1941.** Alexander Doweld, 1943.
- NAZIR, Nighat et al. Immunomodulatory effect of bergenin and norbergenin against adjuvant-induced arthritis: A flow cytometric study. **Journal of ethnopharmacology**, v. 112, n. 2, p. 401-405, 2007.
- NAZIR, Nighat et al. Evaluation of antioxidant and antimicrobial activities of Bergenin and its derivatives obtained by chemoenzymatic synthesis. **European journal of medicinal chemistry**, v. 46, n. 6, p. 2415-2420, 2011.
- NEON COMERCIAL. Água deionizada – laudo de qualidade. Fevereiro/2026.
- NEPOMUCENO, ÁLVARO; NICHIO-AMARAL, RENARA; ALVES-ARAÚJO, ANDERSON. Flora of Espírito Santo: Humiriaceae. **Rodriguésia**, v. 73, p. e00932021, 2022.
- NISTOR, M.; POP, R.; DAESCU, A.; PINTEA, A.; SOCACIU, C.; RUGINA, D. Anthocyanins as key phytochemicals acting for the prevention of metabolic diseases: An overview. *Molecules*, v. 27, n. 13, artigo 4254, 2022.
- NOGUEZ, C. Surface plasmons on metal nanoparticles: the influence of shape and physical environment. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2007, v. 111, n. 10, p. 3806-3819.
- NOWACK, B. et al. The potential of silver nanoparticles in agriculture: A critical review. *Environmental Science: Nano*, v. 8, p. 286-301, 2021.
- NUNOMURA, R. C. S.; OLIVEIRA, V. G.; SILVA, S. L.; NUNOMURA, S. M.; J. Braz. Characterization of Bergenin in *Endopleura uchi* Bark and its Anti-Inflammatory Activity. *Chemical Society*, v. 20, p. 1060-1064, 2009.
- NUNOMURA, R. C. S.; OLIVEIRA, V. G.; SILVA, S. L.; NUMOMURA, S. M. Characterization of Bergenin in *Endopleura uchi* Bark and its Anti-inflammatory activity. *J. Braz. Chem. Soc.*; v. 20, n. 6, p. 1060-1064. 2009.
- OLIVEIRA, G. R. B.; SIMÃO, A. A.; PEREIRA, L. S.; ROCHA, F. D.; RAPOSO, N. R. B.; OLIVEIRA, V.; PEREIRA, T. V.; CARMO, H. P.; OLIVEIRA, T. C.; SOUSA, O. V.; ARAUJO, A. L. A.; YAMAMOTO, C. H. Stem bark extracts of *Endopleura uchi* (Huber) Cuatrec: Inhibition of pancreatic lipase and antioxidant activity. *Journal of Medicinal Plant Research*, v. 11, p. 472-479, 2017.
- OLIVEIRA, J. P. et al. Sensitivity analysis of ZnO nanoparticles synthesis costs. *Ceramics International*, v. 48, p. 21567-21576, 2022.
- OLIVEIRA, Y. R.; SILVA, P. H.; ABREU, M. C.; LEAL, C. B.; OLIVEIRA, L. P. Potencial Alelopático de Espécies da Família Fabaceae Lindl. *Ensaio e Ciências*, v. 24, n. 1, p. 65-74, 2020.

- PAARAKH, Padmaa M. *Coriandrum sativum* linn. –review. *Pharmacologyonline*, v. 3, p. 561-573, 2009.
- PATIL, S. S. et al. Cost-effective synthesis of silver nanoparticles: A statistical approach. *Materials Research Express*, v. 6, n. 12, 1250c3, 2019.
- PAULA, G. A. *Modelos de Regressão com Apoio Computacional*. Rio de Janeiro: IMPA, 2013.
- PAVIA, D. L.; LAMPMAN, G. M.; KRIZ, G. S.; VYVYAN, J. R. Introdução à espectroscopia. Tradução da 4ª edição norte americana. São Paulo: Cengage Learning, capítulo 7, 2010.
- PEIXOTO H, ROXO M, SILVA E, VALENTE K, BRAUN M, WANG X, WINK M. Extrato de casca da árvore amazônica *Endopleura uchi* (Humiriaceae) prolonga a vida útil e aumenta a resistência ao estresse em *Caenorhabditis elegans*. *Moléculas*. V. 24, n. 5. p915. 2019.
- PEREIRA, G. J. V. et al. Uma revisão narrativa da análise de sistemas nanopartículados na formulação e eficácia de fármacos antitumorais. *Revista casa arquivo*. Vol. 13, 2024.
- PETERS, M. S.; Timmerhaus, K. D. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. 5. ed. McGraw-Hill, 2003.
- PICCINNO, F. et al. From laboratory to industrial scale: a scale-up framework for chemical processes. *Journal of Cleaner Production*, v. 135, p. 1085-1097, 2016.
- PINHEIRO, J. P.; ROSARIO, J. S. Avaliação Fitoquímica e Antinociceptiva do extrato bruto aquoso liofilizado da espécie vegetal *Endopleura uchi* (Uxi amarelo). Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de farmácia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2006.
- POLITI, F. A. S.; DE MELLO, J. C. P.; MIGLIATO, K. F.; NEPOMUCENO, A. L. A.; MOREIRA, R. R. D.; PIETRO, R. C. L. R. Antimicrobial, Cytotoxic and Antioxidant Activities and Determination of the Total Tannin Content of Bark Extracts *Endopleura uchi*. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 12, p. 2757-2768, 2011.
- POLITI, F. A. S. Estudo Farmacognóstico e Avaliação De Atividades Biológicas De extratos Obtidos Das Cascas Pulverizadas De *Endopleura uchi* (Huber) Cuatrec (Humiraceae). Dissertação (Mestrado Em Ciências Farmacêutica). 124f. Universidade Estadual Paulista Julio De Mesquita Filho, Araraquara, Sp, 2009. *Revista Owl (Owl Journal)* ISSN: 2965-2634 vol. 2, N. 2, Campina Grande, jan. 2024. 70.
- POLTERAIT, O. Antioxidants and free-radical scavengers of Natural Origin. **Current Organic Chemistry**, v. 1, p. 415-440, 1997.
- PORTO, AS; BEZERRA, MGF; FABIANO, FA; SANTOS, JG Fitotoxicidade por nanopartículas de Cobre e Zinco para diferentes tratamentos na germinação de sementes de *Lactuca sativa*. **Natureza on-line**. 2019.
- QIN, X.; YANG, Y.; FAN, Tt.; GONG, T.; ZHANG, Xn.; HUANG, Y. Preparation, characterization and in vivo evaluation of bergenin-phospholipid complex. *Acta Pharmacologica Sinica*. v. 31, p. 127-136, 2010.
- RAJESHKUMAR, S.; BHARATH, L. Mechanism of plant-mediated synthesis of silver nanoparticles and their applications. *Journal of Nanostructure Chemistry*, v. 7, n. 1, p. 1–14, 2017.
- RAMAIAH, P. Atchuta et al. Isolation and characterisation of bergenin derivatives from *Macaranga peltata*. **Journal of the Chemical Society, Perkin Transactions 1**, p. 2313-2316, 1979.

- RANAL, M. A., & Santana, D. G. How and why to measure the germination process? *Brazilian Journal of Botany*, 29(1), 1-11. DOI: 10. 1590/S0100-84042006000100002, 2006.
- RECEITA FEDERAL DO BRASIL. Instrução Normativa SRF nº 162/2025 – Taxas de depreciação de bens do ativo imobilizado.
- REMER, D. S.; Chai, L. H. Design cost factors for scaling-up engineering equipment. *Chemical Engineering Progress*, v. 86, n. 8, p. 77-82, 1990.
- ROUSSEAU, C.; MARTIN, O. R. Synthesis of bergenin-related natural products by way of an intramolecular C-glycosylation reaction. *Tetrahedron: Asymmetry*, v. 11, n. 2, p. 409-412, 2000.
- SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, v. 1, n. 1, p. 83-98, 2008.
- SABESP. Tabela de preços de serviços de tratamento de efluentes industriais – categoria III. 2026.
- SALAMA, H. M. (2012). Effects of silver nanoparticles in some crop plants, common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and corn (*Zea mays* L.). *International Research Journal of Biotechnology*, 3(10), 190-197.
- SALTELLI, A. et al. *Global Sensitivity Analysis: The Primer*. Wiley, 2008.
- SAKAMAKI, Shigeki et al. Aryl- β -C-glucosidation using glucal boronate: application to the synthesis of tri-O-methylnorbergenin. **Tetrahedron**, v. 68, n. 29, p. 5744-5753, 2012.
- SANTOS, H. M. et al. Cost-effectiveness of green-synthesized silver nanoparticles for antibacterial coatings. *Nanotechnology Reviews*, v. 12, n. 1, 2023.
- SARKAR, S.; SARKAR, S. C. Application of nanotechnology in medicine. In: SARKAR, S.; SARKAR, S. C. (eds.) *Research Trends in Medical Sciences*. New Delhi: Akinik Publications, 2019, capítulo 4, p. 49-72.
- SAVASSA, S. M., et al. (2021). Effects of silver nanoparticles on seed germination and seedling growth: a review. *Journal of Nanoparticle Research*, 23(4), 1-18. DOI: 10. 1007/s11051-021-05185-6.
- SEIF SAHANDI, M.; SOROOSHADEH, A., REZAADEH, H., & NAGHDIBADI, HA. Efeito da nanoprta e do nitrato de prata na produtividade de sementes de borragem. *Jornal de Pesquisa de Plantas Mediciniais*, 5 (2), 171-175. 2011.
- SENA, A. E. C., SOARES, D. M., DA SILVA NUNES, M. R., RAMOS, D. P., DE ANDRADE JÚNIOR, F. P., DE OLIVEIRA LIMA, E., DE ARAÚJO MARQUES, R. Síntese, caracterização e análise antimicrobiana de nanopartículas de prata utilizando extrato de *Humirianthera* ampla como agente redutor. *South American Journal of Basic Education, Technical and Technological*, v. 8, n. (2), p. 664-676. 2021.
- SHARMA, V. K., YNGARD, R. A., & LIN, Y. Silver nanoparticles: Green synthesis and their antimicrobial activities. *Advances in Colloid and Interface Science*, 275, 102061. 2021.
- SHARMA, V.; KAUR, J.; GUPTA, R. Green synthesis of silver nanoparticles using plant extracts: role of concentration, pH and temperature. *Journal of Nanobiotechnology*, v. 17, n. 1, p. 1–12, 2019.
- SIGMA-ALDRICH. Silver nitrate ACS reagent, $\geq 99.0\%$. Catálogo online. Acesso em 10 fev. 2026.

- SILVA, F. A. et al. Continuous flow synthesis of silver nanoparticles: Economic and environmental benefits. *Green Chemistry*, v. 26, p. 1234-1248, 2024.
- SILVA, G. G.; DA CUNHA, R. N. Avaliação de flavonoides totais e da atividade antioxidante em extratos de aranto (*Kalanchoe daigremontiana*). *Perquirere*, v. 2, n. 18, p. 205-217, 2021.
- SILVA JÚNIOR, CARLOS ALBERTO DA; JESUS, DOSIL PEREIRA DE; GIROTTI JÚNIOR, GILDO. Química Verde e a Tabela Periódica de Anastas e Zimmerman: tradução e alinhamentos com o desenvolvimento sustentável. **Química Nova**, v. 45, p. 1010-1019, 2022.
- SILVA, Filomena et al. Coriander (*Coriandrum sativum* L.) essential oil: its antibacterial activity and mode of action evaluated by flow cytometry. *Journal of medical microbiology*, v. 60, n. 10, p. 1479-1486, 2011.
- SILVA, L. R.; TEIXEIRA, R.; Phenolic profile and biological potential of *Endopleura uchi* extracts. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, v. 8, p. 889-897, 2015.
- SINGH, A. et al. Role of plant extract concentration in green synthesis of nanoparticles. *Biotechnology Reports*, v. 30, e00615, 2021.
- SINGH, P., KIM, Y. J., ZHANG, D., YANG, D. C. Biological synthesis of nanoparticles from plants and microorganisms. *Trends in Biotechnology*, 38(7), 767-778. 2020.
- SINGH, P., et al. Nano-enhanced allelopathic activity of *Coriandrum sativum* extracts against weed species. *Plant Physiology Reports*, 2021.
- SOBHANI, Z. et al. Ethnobotanical and phytochemical aspects of the edible herb *Coriandrum sativum* L. *Journal of Food Science*, v. 87, n. 3, p. 986-1014, 2022.
- SOUZA, T. G. et al. Integrating design of experiments and economic analysis for process optimization. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 178, p. 452-464, 2022.
- SOUZA, V. M., et al. (2018). Allelopathic potential of aqueous extracts of Eucalyptus on germination of lettuce and tomato. *Journal of Agricultural Science*, 10(8), 1-9. DOI: 10.5539/jas.v10n8p1.
- STEFFEN W, PERSSON A, DEUTSCH L, ZALASIEWICZ J, WILLIAMS M, RICHARDSON K, CRUMLEY C, CRUTZEN P, FOLKE C, GORDON L, MOLINA M, RAMANATHAN V, ROCKSTRÖM J, SCHEFFER M, SCHELLNHUBER HJ, SVEDIN U. O antropoceno: da mudança global à administração planetária. *Ambio*, n. 1 v. 40, p. 739-761, 2021.
- TACON, L. A.; FREITAS, L. A. P. Box-Behnken design to study the bergenin content and antioxidant activity of *Endopleura uchi* bark extracts obtained by dynamic maceration. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, v. 23, p. 65-71, 2013.
- TAKAHASHI, H. et al. Synthesis and neuroprotective activity of bergenin derivatives with antioxidant activity. **Bioorganic & medicinal chemistry**, v. 11, n. 8, p. 1781-1788, 2003.
- TANAKA, Reiko; MATSUNAGA, Shunyo. Triterpene dienols and other constituents from the bark of *Phyllanthus flexuosus*. **Phytochemistry**, v. 27, n. 7, p. 2273-2277, 1988.
- TANEYAMA, M.; YOSHIDA, S. Studies on C-glycosides in higher plants: II. Incorporation of ¹⁴C-glucose into bergenin and arbutin in *Saxifraga stolonifera*. *The botanical magazine= Shokubutsu-gaku-zasshi*, v. 92, n. 1, p. 69-73, 1979.
- TANEYAMA, M. et al. Isolation of norbergenin from *Saxifraga stolonifera*. **Phytochemistry**, v. 22, n. 4, p. 1053-1054, 1983.

TIWARI, B. K.; KHOSA, R. L. Studies on *Viburnum nervosum* Hook: chemistry and spectroscopy of bergenin and its derivatives. *East and Central African Journal of Pharmaceutical Sciences*, v. 12, n. 1, 2009.

TONET, M. D; LEONEL, A. A. Nanociência e Nanotecnologia: uma revisão bibliográfica acerca das contribuições e desafios para o ensino de Física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 36, n. 2, p. 431-456, ago. 2019.

TORRES, Alef Ney Nunes da Silva. *Explorando a potencialidade da Aloe vera na síntese verde de nanopartículas de cobre*. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Farmácia) – Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Itacoatiara.

TRIBE, M. A.; Alpert, S. B. Scale-up economics in chemical engineering. *Chemical Engineering*, v. 94, n. 5, p. 45-50, 1987.

TRIPATHI, D. K.; SINGH, S.; SINGH, V. P.; et al. Nanomaterials in plants: uptake, transport, and physiological effects. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 110, p. 2–12, 2017.

TSAGKARI, M. et al. Early-stage capital cost estimation of biorefinery processes: A comparative study. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 119, p. 1-14, 2017.

TURTON, R. et al. *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*. 5. ed. Pearson, 2018.

VANNINI, C., et al. Morphological and proteomic responses of *Eruca sativa* exposed to silver nanoparticles or silver nitrate. *PLoS ONE*, 8(7), e68752. DOI: 10. 1371/journal. pone. 0068752., 2013.

VANNINI, C.; DOMENICONI, D.; MARSONI, M.; et al. Morphological and physiological responses of *Eruca sativa* to silver nanoparticles. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 21, p. 11790–11797, 2014.

WANG, D. et al. A carbon–carbon-coupled dimeric bergenin derivative biotransformed by *Pleurotus ostreatus*. **Bioorganic & medicinal chemistry letters**, v. 15, n. 18, p. 4073-4075, 2005.

WANGENSTEEN, Helle; SAMUELSEN, Anne Berit; MALTERUD, Karl Egil. Antioxidant activity in extracts from coriander. **Food chemistry**, v. 88, n. 2, p. 293-297, 2004.

WANI, Ali Abas et al. Characterisation and functional properties of watermelon (*Citrullus lanatus*) seed proteins. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 91, n. 1, p. 113-121, 2011.

YIN, L. Efeitos da exposição a nanopartículas de prata na germinação e no crescimento inicial de onze plantas de áreas úmidas. *Journals. Plos. Org.* 2012.

YOSHIDA, Takashi et al. Bergenin derivatives from *Mallotus japonicus*. **Phytochemistry**, v. 21, n. 5, p. 1180-1182, 1982.

WILLIS, R. J. What is Allelopathy. Cap 1, p. 1-13. In: WILLIS, R. J. *The History of Allelopathy*, 1a ed., Springer, Dordrecht, ISBN: 978-1-4020-4092-4, 2007.

ZAN, R. A., & ZAN, A. S. H. DE S. Nanopartículas metálicas de ouro (AU) e prata (AG) associadas a substâncias naturais, uma proposta de síntese Biogênica pouco explorada / Metallic nanoparticles of gold (AU) and silver (AG) associated with natural substances, a proposal for a little explored Biogenic synthesis. *Brazilian Journal of Development*, v. 8, n. (5), p. 38637–38658, 2022.