

UNIVERSIDADE VILA VELHA - ES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA VEGETAL

PROPRIEDADES QUÍMICAS E BIOATIVAS DO FRUTO DE
***Chrysophyllum cainito* EM DIFERENTES ESTÁDIOS DE**
MATURAÇÃO

LYVIA BRAHIM VALIS MATOS UCELLI

VILA VELHA-ES
AGOSTO/2025

UNIVERSIDADE VILA VELHA - ES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA VEGETAL

PROPRIEDADES QUÍMICAS E BIOATIVAS DO FRUTO DE
***Chrysophyllum cainito* EM DIFERENTES ESTÁDIOS DE**
MATURAÇÃO

Dissertação apresentada a Universidade Vila velha, como pré-requisito do Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia Vegetal para a obtenção do título de Mestra em Biotecnologia Vegetal.

LYVIA BRAHIM VALIS MATOS UCELLI

VILA VELHA-ES
AGOSTO/2025

LYVIA BRAHIM VALIS MATOS UCELLI

**PROPRIEDADES QUÍMICAS E BIOATIVAS DO FRUTO DE
Chrysophyllum cainito EM DIFERENTES ESTÁDIOS DE
MATURAÇÃO**

Dissertação apresentada a Universidade Vila velha, como pré-requisito do Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia Vegetal para a obtenção do título de Mestra em Biotecnologia Vegetal.

Aprovada em 26 de agosto de 2025.

Comissão Examinadora:

Dr. Bruno Gomes de Oliveira (SEDU)

Dra. Kariane Rodrigues de Sousa (UVV)

Dra. Denise Coutinho Endringer (UVV)
Orientadora

Documento original assinado eletronicamente, conforme MP 2200-2/2001, art. 10, § 2º, por:

LYVIA BRAHIM VALIS MATOS UCELLI

PROFESSOR B
10065506394 - SEDU - GOVES
assinado em 22/09/2025 09:10:26 -03:00

DENISE COUTINHO ENDRINGER

CIDADÃO
assinado em 22/09/2025 09:28:32 -03:00

KARIANE RODRIGUES DE SOUSA

CIDADÃO
assinado em 24/09/2025 12:06:04 -03:00

BRUNO GOMES DE OLIVEIRA

PROFESSOR B
SREVV - SEDU - GOVES
assinado em 22/09/2025 09:11:13 -03:00



INFORMAÇÕES DO DOCUMENTO

Documento capturado em 24/09/2025 12:06:04 (HORÁRIO DE BRASÍLIA - UTC-3)
por LYVIA BRAHIM VALIS MATOS UCELLI (PROFESSOR B - 10065506394 - SEDU - GOVES)
Valor Legal: ORIGINAL | Natureza: DOCUMENTO NATO-DIGITAL

A disponibilidade do documento pode ser conferida pelo link: <https://e-docs.es.gov.br/d/2025-GLP4TV>

*Dedico este trabalho a minha família,
bem mais precioso que tenho nesse mundo.*

“Pois desde a criação do mundo os atributos invisíveis de Deus, seu eterno poder e sua natureza divina, têm sido vistos claramente, sendo compreendidos por meio das coisas criadas, de forma que tais homens são indesculpáveis.”

Romanos 1:20

AGRADECIMENTOS

Ao dono da minha vida, ao Senhor da minha história, àquele que abriu portas e me conduziu até aqui. A Ele, que me cercou de pessoas tão especiais e, ao longo dessa caminhada, enviou anjos para me ajudar. A Deus, minha mais profunda e sincera gratidão. Porque dele, por ele e para ele são todas as coisas; glória, pois, a ele eternamente. (*Romanos 11:36*)

Gostaria imensamente de poder nomear cada pessoa a quem sou grata, mas infelizmente não seria possível. Corro o risco de esquecer alguém ou de não encontrar palavras suficientes, nem espaço, para expressar tudo o que sinto. Por isso, deixo aqui registrado meu agradecimento a você, que, de diferentes formas e momentos, contribuiu para que eu pudesse concluir esta página tão especial da minha história.

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

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Árvore de <i>Chrysonphyllum cainito</i>	3
Figura 2 – Frutos de <i>Chrysophyllum cainito</i> em diferentes estádios de maturação	4
Figura 3 – Fruto de <i>Chrysophyllum cainito</i> cortado transversalmente	4
Figura 4 – Estruturas químicas representativas de ácidos fenólicos naturalmente produzidos por plantas	8
Figura 5 - Estruturas químicas representativas das principais classes de flavonoides	9
Figura 6 – Representação da estrutura da antocianidina e os ligantes de acordo com as diferentes formas em que se apresenta	12
Figura 7 - Casca, polpa e semente do fruto de <i>C. cainito</i> em diferentes estádios de maturação	24
Figura 8 - Viabilidade Celular de Células RAW 264.7 Tratadas com Extratos de <i>Chrysophyllum cainito</i>	46
Figura 9 - Viabilidade Celular de Células Fibroblastos L929 Tratadas com Extratos de <i>Chrysophyllum cainito</i>	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características físico-químicas (SST, AT, Razão SST/AT e pH) da casca e polpa de <i>C. cainito</i> em diferentes estádios de maturação	32
Tabela 2 - Características da Composição Centesimal da Casca e Polpa de <i>C. cainito</i> em Diferentes Estádios de Maturação	35
Tabela 3 - Atividade Antioxidante (IC50) da Casca e Polpa de <i>Chrysophyllum cainito</i> em Diferentes Estádios de Maturação pelos Métodos DPPH e ABTS	39
Tabela 4 - Concentração de Antocianinas na Casca e Polpa de <i>Chrysophyllum cainito</i> em Diferentes Estádios de Maturação	42
Tabela 5 - Concentração de Ácido Gálico e Ácido Ferúlico na Casca e Polpa de <i>Chrysophyllum cainito</i> em Diferentes Estádios de Maturação por HPLC	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°Brix	Unidade de medida de concentração de sólidos solúveis
ABTS	Ácido 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfônico)
AT	Acidez titulável
C1	Casca estágio 1
C2	Casca estágio 2
C3	Casca estágio 3
DPPH	2,2-difenil-1-picrilhidrazil
Hepa1c1c7	Linhagem celular de hepatoma de rato
HPLC	Cromatografia líquida de alta eficiência
IC ₅₀	Concentração inibitória média (50%)
IR% Í	Índice de inibição em porcentagem
L929	Linhagem celular de fibroblastos murinos
NaOH	Hidróxido de sódio
P1	Polpa estágio 1
P2	Polpa estágio 2
P3	Polpa estágio 3
QR	Quinona redutase
RAW 264.7	Linhagem celular de macrófagos murinos
SST	Sólidos solúveis totais
UV/DAD	Detector ultravioleta por arranjo de diodos
VET	Valor energético total

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1	<i>Chrysophyllum cainito</i> L.: CARACTERIZAÇÃO BOTÂNICA E UTILIZAÇÃO	3
2.1.1	Descrição Taxonômica, Origem e Distribuição Geográfica	3
2.1.2	Morfologia do Fruto.....	4
2.1.3	Aspectos do Cultivo e Produção.....	5
2.1.4	Utilização Tradicional e Potencial	5
2.2	COMPOSIÇÃO QUÍMICA E COMPOSIÇÃO BIOATIVA DE FRUTAS.....	6
2.2.1	Composição Nutricional de Frutas.....	6
2.2.2	Compostos Fitoquímicos: Conceitos e Importância para a Saúde Humana ...	7
2.2.3	As Antocianinas: Estrutura, Ocorrência e Funções Biológicas	11
2.3	DINÂMICA DA MATURAÇÃO E ACÚMULO DE BIOATIVOS EM FRUTAS TROPICAIS	13
2.3.1	Alterações Físico-Químicas Durante a Maturação	13
2.3.2	Fatores que Influenciam a Maturação	15
2.3.3	Influência da Maturação na Síntese e Acúmulo de Compostos Bioativos	16
2.3.4	Diferenças Químicas e Bioativas entre a Casca e a Polpa.....	17
2.3.5	Estudos Comparativos de Maturação em Frutas Tropicais	18
2.4	FRUTAS SUBUTILIZADAS E A AGENDA DE SUSTENTABILIDADE	19
2.4.1	Conceito e Importância de Frutas Nativas e Plantas Alimentícias Não Convencionais (PANCs)	19
2.4.2	Contribuição para a Segurança Alimentar e Nutricional	20
3	OBJETIVOS	23
3.1	OBJETIVO GERAL	23
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
4	MATERIAL E MÉTODOS	24
4.1	COLETA E PREPARO DAS AMOSTRAS.....	24
4.2	DETERMINAÇÃO DOS ESTÁDIOS DE MATURAÇÃO	25
4.3	PREPARAÇÃO DOS EXTRATOS HIDROETANÓLICOS	25
4.4	COMPOSIÇÃO CENTESIMAL	26

4.5	ENSAIOS DE CAPACIDADE ANTIOXIDANTE	26
4.6	COMPOSIÇÃO FITOQUÍMICA	28
4.6.1	Antocianinas Totais.....	28
4.6.2	Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC)	28
4.7	AVALIAÇÃO DAS ATIVIDADES BIOLÓGICAS IN VITRO	29
4.7.1	Avaliação da Citotoxicidade pelo Ensaio MTT.....	29
4.7.2	Ensaio de Indução da Quinona Redutase (QR) e Atividade Quimiopreventiva de Câncer.....	30
4.8	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	31
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
5.1	AVALIAÇÃO DO ESTÁDIO DE MATURAÇÃO DO <i>Chrysophyllum cainito</i>	32
5.2	AVALIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO CENTESIMAL.....	35
5.3	AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE ANTIOXIDANTE	38
5.3.1	Método DPPH.....	38
5.3.2	Método ABTS	40
5.4	AVALIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO FITOQUÍMICA	41
5.4.1	Antocianinas	41
5.4.2	Análise por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC)	43
5.5	ATIVIDADE BIOLÓGICA	45
5.5.1	Avaliação da Citotoxicidade.....	45
5.5.2	Indução da Quinona Redutase e Atividade Quimiopreventiva de Câncer	47
6	CONCLUSÃO.....	49
7	PERSPECTIVAS FUTURAS	50
	REFERÊNCIAS.....	51

RESUMO

UCELLI, Lyvia Brahim Valis Matos; Diss.; Universidade Vila Velha; Agosto de 2025; **Propriedades Químicas e Bioativas do Fruto de *Chrysophyllum Cainito* em Diferentes Estádios de Maturação**; Orientadora: Dra. Denise Coutinho Endringer.

O consumo de frutas é amplamente reconhecido por promover benefícios metabólicos e fisiológicos à saúde humana. No entanto, diversas espécies frutíferas permanecem subutilizadas, apresentando lacunas no conhecimento científico sobre suas propriedades. Entre estas, o *Chrysophyllum cainito* L. destaca-se por seu potencial ainda pouco explorado. Este estudo investigou as propriedades químicas e bioativas do fruto em diferentes estádios de maturação. Foram analisadas características físico-químicas, composição centesimal, atividade antioxidante (DPPH e ABTS), perfil fitoquímico por cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC), citotoxicidade *in vitro* e atividade quimiopreventiva de câncer pela indução da enzima quinona redutase. Os resultados demonstraram variações significativas na composição entre casca e polpa ao longo da maturação. A casca apresentou maior teor de compostos fenólicos e flavonoides, bem como maior atividade antioxidante, especialmente nos estádios verde e maduro. O ácido gálico foi identificado na casca e polpa, enquanto o ácido ferúlico foi exclusivo da casca. Os extratos não demonstraram citotoxicidade significativa, indicando segurança para uso. Na concentração estudada, o extrato não apresentou capacidade de induzir a atividade da enzima quinona redutase. Os resultados sugerem que o fruto, especialmente sua casca, apresenta elevado potencial funcional e nutracêutico, reforçando sua relevância como alimento bioativo, contribuindo para a valorização de espécies subutilizadas e para sua viabilidade em aplicações sustentáveis e agroindustriais.

Palavras-chave: Maturação de frutos; fitoquímicos; antocianinas; capacidade antioxidante; citotoxicidade; quinona redutase.

ABSTRACT

UCELLI, Lyvia Brahim Valis Matos Ucelli; Diss.; Vila Velha University; August 2025; **Chemical and Bioactive Properties of *Chrysophyllum Cainito* Fruit at Different Ripening Stages**; Advisor: Dr. Denise Coutinho Endringer.

Fruit consumption is widely recognized for promoting metabolic and physiological benefits to human health. However, several fruit species remain underutilized, presenting gaps in scientific knowledge regarding their properties. Among these, *Chrysophyllum cainito* L. stands out for its still underexplored potential. This study investigated the chemical and bioactive properties of the fruit at different ripening stages. Physicochemical characteristics, centesimal composition, antioxidant activity (DPPH and ABTS), phytochemical profile by high-performance liquid chromatography (HPLC), in vitro cytotoxicity, and cancer chemopreventive activity by induction of the quinone reductase enzyme were analyzed. The results demonstrated significant compositional variations between peel and pulp throughout ripening. The peel showed higher content of phenolic compounds and flavonoids, as well as greater antioxidant activity, especially in the green and ripe stages. Gallic acid was identified in both peel and pulp, while ferulic acid was exclusive to the peel. The extracts did not show significant cytotoxicity and did not induce the quinone reductase enzyme at the studied concentration, indicating their safety for use. The findings suggest that the fruit, particularly its peel, possesses high functional and nutraceutical potential, reinforcing its relevance as a bioactive food, contributing to the valorization of underutilized species, and supporting its viability for sustainable and agro-industrial applications.

Keywords :Fruit ripening, phytochemicals; anthocyanins; antioxidant capacity; cytotoxicity; quinone reductase.

1 INTRODUÇÃO

Os frutos representam um dos grupos alimentares mais diversificados e nutricionalmente relevantes. Caracterizam-se não apenas por sua composição nutricional essencial, mas também pela presença de compostos bioativos com propriedades funcionais capazes de promover benefícios metabólicos e fisiológicos significativos (Liu, 2013).

Este potencial tem despertado crescente interesse científico, particularmente em relação a espécies frutíferas subutilizadas. Embora apresentem relevante potencial nutricional e econômico, essas espécies permanecem pouco exploradas, tanto na alimentação humana (Tuler e Silva, 2019; Aurino et al., 2024), quanto no desenvolvimento de produtos com propriedades nutracêuticas.

Nesse cenário, o Brasil, com sua megadiversidade vegetal e condições edafoclimáticas privilegiadas (Simão, 1998), apresenta um enorme potencial para o estudo e aproveitamento dessas espécies frutíferas ainda subexploradas.

Dentre essas espécies, destaca-se *Chrysophyllum cainito* L., conhecida popularmente como abiu roxo, maçã estrela ou cainito. Esta é uma árvore frutífera nativa da América Central pertencente à família *Sapotaceae* (Luo et al., 2002). No Brasil, há registros de ocorrência dessa espécie nas regiões Norte, Nordeste, Sudeste e Sul (Alves-Araújo et al., 2020).

O *C. cainito* é uma fruta tropical de elevado valor nutricional, destacando-se por seu conteúdo significativo de carboidratos, açúcares, proteínas, vitaminas C e A, carotenoides e minerais como cálcio e fósforo (Doan e Le, 2020). Sua composição contribui para a hidratação e o fornecimento de energia, além de conter compostos bioativos com propriedades antioxidantes, potencial hipoglicemiante e efeitos benéficos à saúde cardiovascular (Hegde et al., 2016; Mao et al., 2015).

Estudos preliminares revelaram que os frutos apresentam uma composição fitoquímica rica e diversificada, com destaque para a presença de compostos fenólicos e flavonoides e sua reconhecida atividade antioxidante (Souza et al., 2023).

Estudos recentes também têm apontado o potencial quimiopreventivo de *C. cainito*, com destaque para os efeitos de seus compostos fenólicos sobre células tumorais. Os estudos de LI et al. (2015) demonstraram que a fração polifenólica extraída da polpa do fruto foi capaz de inibir significativamente a proliferação de

células de osteossarcoma humano (U-2), de forma dose-dependente, além de induzir a apoptose celular.

Entretanto, apesar desses avanços, importantes lacunas persistem no conhecimento científico sobre esta espécie, particularmente no que diz respeito à dinâmica de acumulação de seus compostos nutricionais e bioativos durante o processo de maturação e sua correlação com as propriedades funcionais.

Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a composição química, o conteúdo de compostos bioativos e o potencial antioxidante, citotóxico e quimiopreventivo do fruto de *C. cainito* em diferentes estádios de maturação.

Esta pesquisa oferece subsídios importantes tanto para o aproveitamento racional dessa espécie frutífera, quanto para o desenvolvimento de produtos com valor agregado. Paralelamente, contribui para o avanço do conhecimento científico e, ao mesmo tempo, do desenvolvimento sustentável de comunidades locais.

Ademais, o estudo está em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial o ODS 2 – Fome Zero e Agricultura Sustentável, bem como com o ODS 3 – Saúde e Bem-Estar, ao propor alternativas sustentáveis que promovem a segurança alimentar, a saúde pública e o uso consciente dos recursos naturais.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 *Chrysophyllum cainito* L.: CARACTERIZAÇÃO BOTÂNICA E UTILIZAÇÃO

2.1.1 Descrição Taxonômica, Origem e Distribuição Geográfica

O gênero *Chrysophyllum*, pertencente à família *Sapotaceae*, agrupa espécies nativas de regiões tropicais e subtropicais, reconhecidas por seus frutos comestíveis e madeiras nobres (MARQUI, 2007). Dentre as espécies do gênero, destaca-se *Chrysophyllum cainito* L., conhecida popularmente como maçã estrela, abiu roxo ou cainito (Luo et al, 2002; Doan Le, 2020a), vide Figura 1.

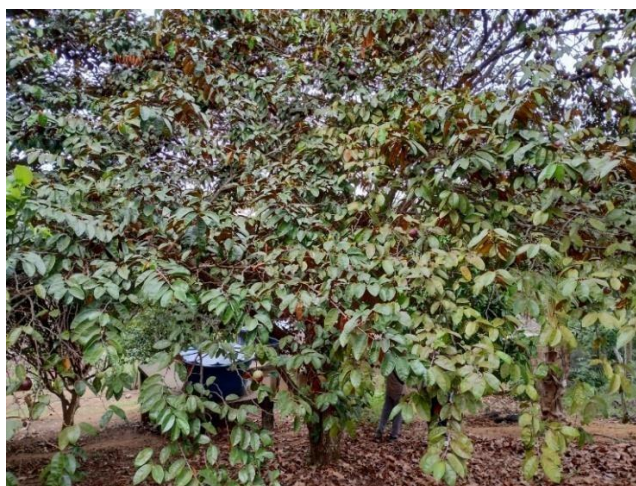


Figura 1 – Árvore de *Chrysonphyllum cainito*

Originária da América Central e das Antilhas (Doan e Le, 2020a; Carneiro et al., 2015), o *C. cainito* apresenta ampla distribuição em regiões tropicais e subtropicais do mundo, incluindo o Brasil. Embora não seja endêmica do território brasileiro (Flora e Funga do Brasil, s.d.), sua presença é registrada em várias regiões, como Norte, Nordeste, Sudeste e Sul (Alves-Araújo et al., 2020), o que demonstra sua adaptabilidade e seu potencial de cultivo.

No estado do Espírito Santo, a ocorrência da espécie foi confirmada por meio de levantamentos florísticos da família *Sapotaceae* (Dutra et al., 2017). Dentre as variedades existentes, a de casca roxa se destaca por sua intensa pigmentação e constitui o foco do presente estudo.

2.1.2 Morfologia do Fruto

O fruto de *C. cainito* apresenta características morfológicas distintas que variam entre cultivares e estádios de maturação. Em geral, trata-se de uma baga globosa a subglobosa, com diâmetro entre 5 e 10 cm, e peso influenciado pelas condições de cultivo (Yahia e Gutierrez-Orozco, 2011). Sua coloração externa varia do verde ao roxo intenso durante a maturação, atribuída à presença de antocianinas concentradas na casca (Luo et al., 2002; Doan e Le, 2020), conforme Figura 2.



Figura 2 – Frutos de *Chrysophyllum cainito* em diferentes estádios de maturação

Internamente, o fruto apresenta casca fina e lisa aderente à polpa, que é suculenta, translúcida e gelatinosa, com coloração variando do branco ao arroxeado pálido, conforme o estágio de maturação (Doan e Le, 2020a). As sementes, de coloração preta, brilhantes e achatadas, geralmente em número de cinco a oito, estão dispostas radialmente em compartimentos internos, formando um padrão estelar quando o fruto é cortado transversalmente (Doan e Le, 2020a) conforme Figura 3.



Figura 3 – Fruto de *Chrysophyllum cainito* cortado transversalmente

Essa morfologia, em especial a distinção entre casca e polpa quanto à cor e textura, é essencial para compreender as diferenças na composição química e no perfil de compostos bioativos, que variam com o estágio de desenvolvimento do fruto.

2.1.3 Aspectos do Cultivo e Produção

O cultivo de *C. cainito* é favorecido por condições tropicais, visto que a espécie é sensível a geadas e a temperaturas baixas. Climas quentes e úmidos, com solos bem drenados, férteis e pH neutro a levemente ácido proporcionam melhores condições para o seu desenvolvimento (Doan e Le, 2020a).

A frutificação pode iniciar entre o terceiro e quinto ano de cultivo, com produtividade máxima alcançada a partir do sétimo ano (Doan e Le, 2020a). A colheita, manual, ocorre nos meses mais quentes e úmidos, variando conforme a região. No Brasil há registros de safras prolongadas, com picos de produção distribuídos ao longo do ano (Alves-Araújo et al., 2020).

2.1.4 Utilização Tradicional e Potencial

Tradicionalmente, os frutos de *C. cainito* são consumidos *in natura*, utilizados na preparação de sobremesas, sucos, compotas e sorvetes (Doan e Le, 2020a). Além do uso alimentício, partes da planta, como as cascas, as folhas e as sementes, são empregadas na medicina popular para o tratamento de febres, inflamações, diabetes e diarreias (Doan e Le, 2020; Luo et al., 2002; Souza et al., 2023).

Além disso, estudos recentes com extratos da casca do caule de *C. cainito* evidenciaram a capacidade deste de induzir apoptose em linhagens de hepatocarcinoma, via mitocondrial mediada por ROS (Doan et al., 2020b).

Apesar do seu potencial terapêutico e nutricional, a espécie é frequentemente classificada como uma Planta Alimentícia Não Convencional (PANC). A baixa inserção dessas plantas em mercados formais, a escassez de tecnologias de processamento e o pouco conhecimento científico sistematizado sobre elas representam desafios para seu maior aproveitamento e valorização (Tuler e Silva, 2019; Aurino et al., 2024).

O subaproveitamento é notável especialmente na casca, rica em compostos bioativos, mas geralmente descartada. Estudos com outras frutas, como uva, jabuticaba e romã, mostram que estruturas secundárias (como a casca) acumulam

maiores teores de polifenóis, taninos e antocianinas, associados às atividades antioxidantes e anti-inflamatórias (Bar-Yaakov et al., 2019 a).

A valorização integral do fruto, incluindo seus subprodutos, apresenta-se como estratégia viável para agregar valor, reduzir desperdícios e promover a sustentabilidade. A medida alinha-se à economia circular e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Pelo exposto, vê-se que o *C. cainito* se revela uma espécie promissora não apenas pela sua adaptabilidade e valor nutricional, mas também pelo seu potencial terapêutico e contribuição para práticas sustentáveis. O fruto trata-se de um exemplo de como espécies subutilizadas podem integrar estratégias de inovação agroalimentar e conservação da biodiversidade.

2.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA E COMPOSIÇÃO BIOATIVA DE FRUTAS

2.2.1 Composição Nutricional de Frutas

Os frutos representam um componente fundamental em uma dieta equilibrada e saudável, sendo reconhecidos globalmente por sua contribuição significativa de nutrientes essenciais. Sua matriz é particularmente rica em carboidratos, principal fonte de energia, predominantemente na forma de açúcares simples, como frutose, glicose e sacarose. Estas, por sua vez, são as responsáveis pelo sabor doce característico da fruta (Bobbio e Bobbio, 2001).

As frutas também são excelentes fontes de fibras alimentares, tanto solúveis quanto insolúveis, que desempenham papéis cruciais na saúde digestiva, na modulação da glicemia e na redução dos níveis de colesterol (Liu, 2013). No caso do *C. cainito*, a polpa é se sobressai pelo seu alto teor de açúcares totais, o que contribui para seu sabor adocicado, e o torna um fruto apreciado para o consumo *in natura* (Souza et al., 2023).

Em termos de macronutrientes, as proteínas e os lipídeos geralmente estão presentes em menores proporções nas frutas, embora sua composição específica varie amplamente entre as espécies (Watt e Merrill, 1963). No entanto, o valor nutricional do *C. cainito* é substancialmente complementado por um rico perfil de micronutrientes.

Os micronutrientes encontrados no fruto são notáveis fontes de diversas vitaminas, incluindo a vitamina C (ácido ascórbico), reconhecida por sua potente ação antioxidante e papel na imunidade, e vitaminas do complexo B, essenciais para o metabolismo energético. (Kubola et al., 2011)

Quanto aos minerais, cálcio, potássio, magnésio e ferro, estes são frequentemente encontrados em quantidades relevantes, contribuindo para diversas funções fisiológicas no organismo (Doan e Le, 2020a). O *C. cainito*, em particular, tem sido apontado como uma fonte considerável desses micronutrientes, reforçando seu valor na nutrição humana.

Importa salientar que a composição nutricional de uma fruta não é estática. É influenciada por uma série de fatores, tais como a espécie, a cultivar, as condições edafoclimáticas de cultivo (solo, clima, luz solar), o manejo pós-colheita e, de forma significativa, o estágio de maturação.

Durante o processo de amadurecimento, ocorrem profundas alterações bioquímicas que afetam diretamente o teor de açúcares, ácidos orgânicos, vitaminas e a biodisponibilidade de minerais, moldando o perfil nutricional final do fruto (Doan e Le, 2020a).

O *C. cainito*, objeto do presente estudo, insere-se nesse panorama de variação nutricional, cujas particularidades em diferentes estádios de maturação são de grande interesse para a sua valorização, notadamente no que tange à sua composição de compostos bioativos.

2.2.2 Compostos Fitoquímicos: Conceitos e Importância para a Saúde Humana

Para além dos nutrientes essenciais, o *C. cainito* destaca-se pela riqueza em metabólitos secundários, também conhecidos como compostos fitoquímicos. Essas substâncias são produzidas pelas plantas em resposta a estresses ambientais, tais como a radiação UV, patógenos e herbivoria. Não obstante, elas exercem diversas atividades biológicas benéficas quando consumidas por humanos (Liu, 2003).

Diferentemente dos macronutrientes e micronutrientes essenciais, os fitoquímicos não são considerados vitais para a sobrevivência humana. Todavia, sua presença na dieta tem sido fortemente associada à promoção da saúde e à prevenção de doenças crônicas (Liu, 2003; Prior, 2003).

Das classes de compostos fitoquímicos encontradas nas frutas destaca-se neste trabalho os compostos fenólicos e flavonoides. Os primeiros (compostos fenólicos) caracterizam-se pela presença de um ou mais grupos hidroxila ligados a um anel aromático.

Estes compostos são a classe mais abundante de fitoquímicos e englobam diversas subclasses, como os ácidos fenólicos, amplamente distribuídos e reconhecidos por suas propriedades antioxidantes e anti-inflamatórias, conforme demonstra a Figura 4.

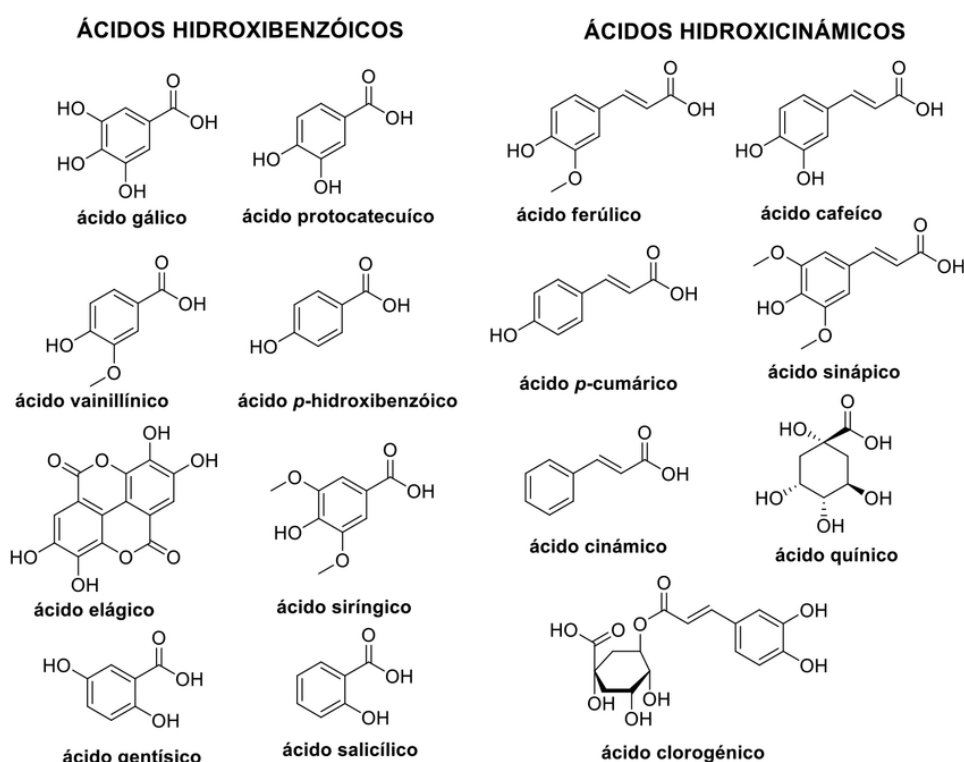


Figura 4 – Estruturas químicas representativas de ácidos fenólicos naturalmente produzidos por plantas.

Fonte: Figura adaptada de Martins et al. (2011)

No caso do *C. cainito*, estudos fitoquímicos, incluindo a identificação em amostras do fruto, revelaram a presença de ácidos fenólicos importantes, tais como o ácido gálico e o ácido ferúlico (Luo et al., 2002). O ácido gálico, um ácido fenólico simples, é conhecido por suas amplas atividades biológicas, incluindo potentes efeitos antioxidantes, anti-inflamatórios e anticancerígenos. Já o ácido ferúlico, um derivado do ácido cinâmico, é um antioxidante fenólico de ocorrência comum, também com propriedades anti-inflamatórias e fotoprotetoras. A presença desses compostos

contribui significativamente para a capacidade antioxidante total do fruto (Souza et al., 2023).

Os flavonoides representam a maior e mais estudada classe de polifenóis, com uma estrutura básica de 15 átomos de carbono (C₆-C₃-C₆) e se subdividem em diversas categorias. A exemplo, tem-se os flavonóis (quercetina, kaempferol), flavonas (apigenina, luteolina), flavanonas (hesperidina, naringenina) e antocianinas, vide Figura 5 abaixo.

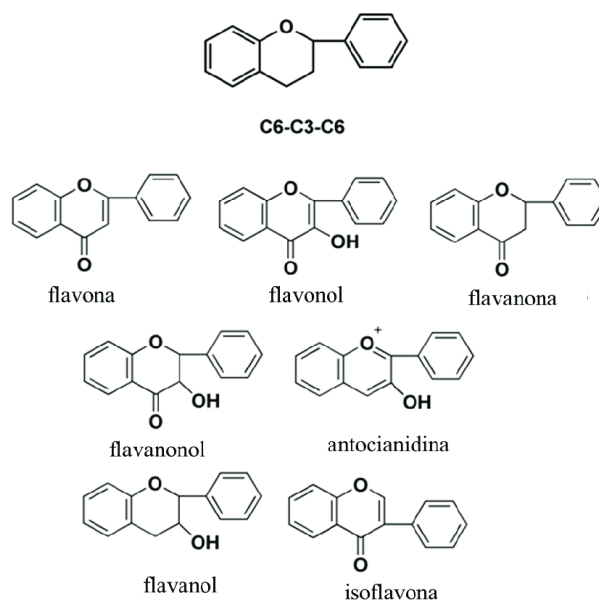


Figura 5 - Estruturas químicas representativas das principais classes de flavonoides.
Fonte: MAGALHÃES E SANTOS (2021).

A importância desses compostos para a saúde humana reside na sua capacidade de interagir com diversas vias metabólicas. Eles atuam, dentre outros, na modulação da atividade enzimática, na regulação da expressão gênica, na comunicação celular e, notavelmente, na neutralização de radicais livres e espécies reativas de oxigênio (ROS), o que os confere um papel crucial na proteção contra o estresse oxidativo e na manutenção da homeostase celular (Liu, 2003).

2.2.2.1 Papel Funcional de Compostos Bioativos

A significância dos compostos fitoquímicos para a saúde humana reside nas suas diversas e complexas atividades biológicas, que atuam na modulação de processos fisiológicos e na proteção contra o desenvolvimento de diversas patologias.

Dentre essas atividades, destacam-se a capacidade antioxidante e a ação quimiopreventiva.

A atividade antioxidante é uma das propriedades mais amplamente estudadas dos compostos bioativos. O estresse oxidativo, caracterizado pelo desequilíbrio entre a produção de espécies reativas de oxigênio (ROS) e a capacidade dos sistemas de defesa antioxidante do organismo, está implicado na etiologia e progressão de diversas doenças crônicas, incluindo doenças cardiovasculares, neurodegenerativas e câncer (Liu, 2003; Prior, 2003).

Os antioxidantes presentes nos alimentos atuam por múltiplos mecanismos para neutralizar o estresse oxidativo, como a doação de elétrons ou átomos de hidrogênio para radicais livres (capacidade sequestrante de radicais livres), a quelatação de íons metálicos pró-oxidantes, a inibição de enzimas que geram ROS e a indução de enzimas antioxidantes endógenas (Prior, 2003).

A ação quimiopreventiva de câncer refere-se à capacidade de certas substâncias de inibir, retardar ou reverter a carcinogênese em seus estádios iniciais. Os compostos bioativos presentes em frutas desempenham um papel crucial nesse processo por meio de diversos mecanismos. Estes incluem a indução de apoptose (morte celular programada) em células pré-cancerígenas ou cancerígenas, a inibição da proliferação celular, a supressão da angiogênese tumoral e a modulação de enzimas envolvidas no metabolismo de carcinógenos (Liu, 2003).

Particularmente relevante para este estudo é a capacidade de alguns fitoquímicos de induzir enzimas de Fase II de biotransformação, como a Quinona Redutase (QR). A indução da QR é um indicador de potencial quimiopreventivo, pois essa enzima atua na detoxificação de metabólitos reativos e carcinógenos, convertendo-os em formas menos tóxicas e mais facilmente elimináveis pelo organismo (Dinkova-Kostova, Talalay, 2010).

Estudos recentes, inclusive com a casca do caule de *C. cainito*, já demonstraram a capacidade de induzir apoptose em linhagens celulares de hepatocarcinoma, sinalizando um promissor potencial antitumoral mediado por vias como a mitocondrial através da geração de ROS (Doan et al., 2020).

2.2.2.2 Relação entre Consumo de Frutas e Prevenção de Doenças Crônicas

A crescente prevalência de Doenças Crônicas Não Transmissíveis (DCNTs), como doenças cardiovasculares, diabetes *mellitus* tipo 2, obesidade e diversos tipos de câncer, representa um desafio global de saúde pública. Nesse cenário, o padrão alimentar emerge como um fator modificável de grande impacto, e o consumo adequado de frutas e vegetais é consistentemente associado a um menor risco de desenvolvimento dessas condições (Who, 2018).

Estudos epidemiológicos e revisões sistemáticas têm demonstrado que dietas ricas em frutas e vegetais podem reduzir significativamente a incidência de DCNTs. Essa proteção é atribuída não apenas à presença de vitaminas, minerais e fibras, mas, principalmente, à ação sinérgica e aditiva dos diversos compostos fitoquímicos presentes na matriz alimentar complexa das frutas (Liu, 2003). Por exemplo, a capacidade antioxidante desses compostos auxilia na redução do estresse oxidativo e da inflamação crônica, mecanismos fundamentais na patogênese de muitas dessas doenças (Prior, 2003).

Especificamente, a ingestão regular de frutas tem sido associada à melhora do perfil lipídico, regulação da pressão arterial, controle glicêmico e modulação da resposta imune, contribuindo para a manutenção da homeostase e a resiliência do organismo contra agressões que levam à doença. (Liu, 2003).

O incentivo ao consumo de frutas, incluindo espécies ainda subutilizadas como *C. cainito*, representa uma estratégia promissora para a promoção da saúde e prevenção de DCNTs em diversas populações, alinhando-se com as diretrizes de saúde pública que preconizam uma alimentação rica e variada.

2.2.3 As Antocianinas: Estrutura, Ocorrência e Funções Biológicas

As antocianinas constituem uma subclasse notável de flavonoides, pertencente ao vasto grupo dos compostos fenólicos. São pigmentos hidrossolúveis amplamente distribuídos no reino vegetal, responsáveis pelas vibrantes cores vermelha, roxa e azul presentes em muitas flores, frutas e vegetais (Guisti e Wrolstad, 2001).

Quimicamente, as antocianinas são glicosídeos de antocianidinas. Ou seja, consistem em uma aglicona (antocianidina) ligada a uma ou mais moléculas de açúcares por meio de ligações glicosídicas.

A estrutura fundamental das antocianidinas é um esqueleto de 15 átomos de carbono (C₆-C₃-C₆), organizado em dois anéis aromáticos (A e B) e um heterociclo contendo oxigênio (anel C), conforme Figura 6 abaixo.

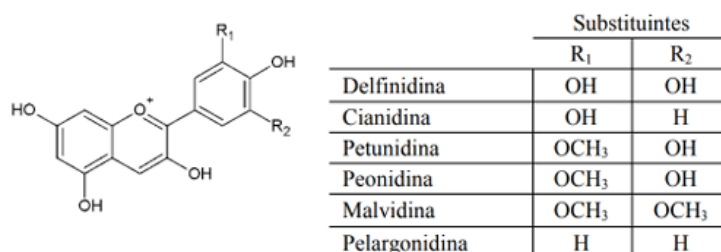


Figura 6 – Representação da estrutura da antocianidina e os ligantes de acordo com as diferentes formas em que se apresenta

Fonte: GOMES et al. (2022) *apud* CHAVES (2014).

As seis antocianidinas mais comuns na natureza são a cianidina, delfinidina, petunidina, peonidina, malvidina e pelargonidina. Estas diferenciam-se, principalmente, pelo número e padrão de hidroxilações e metoxilações no anel B (Guisti e Wrolstad, 2001).

A ligação de diferentes açúcares (glicose, galactose, ramnose, arabinose, entre outros) e a acilação (ligação a ácidos orgânicos) a essas antocianidinas dão origem a uma vasta gama de antocianinas, cada uma com características de cor e estabilidade específicas.

Apesar dos diversos benefícios atribuídos às antocianinas, uma limitação importante é sua instabilidade frente a condições ambientais e químicas. Elementos como pH, luz, temperatura, sulfitos, ácido ascórbico, oxigênio, co-pigmentação e enzimas podem comprometer a estrutura das antocianinas, afetando negativamente suas propriedades bioativas e acelerando seu processo de degradação. (Enaru et al. 2021)

Durante o amadurecimento, a biossíntese desses pigmentos é ativamente regulada, resultando em alterações significativas na concentração e no perfil das antocianinas, o que confere a cor característica de cada estágio (Luo et al., 2002).

Além de seu papel como pigmentos naturais, as antocianinas são amplamente estudadas por suas notáveis funções biológicas e benefícios à saúde. Elas são potentes antioxidantes, capazes de neutralizar radicais livres, reduzir o estresse

oxidativo e proteger as células contra danos oxidativos, contribuindo para a prevenção de doenças crônicas (Liu, 2003; Enaru et al., 2021).

Outras atividades importantes incluem propriedades anti-inflamatórias, mediadas pela inibição de vias inflamatórias e pela redução da produção de mediadores pró-inflamatórios. As antocianinas também demonstram potencial quimiopreventivo de câncer, modulando a proliferação celular, induzindo apoptose e regulando enzimas de biotransformação de carcinógenos (Doan et al., 2020; Enaru et al. 2021).

No contexto de *C. cainito*, a casca do fruto, especialmente na variedade roxa, é reconhecidamente rica em antocianinas, o que contribui para sua coloração característica e seu potencial bioativo (Luo et al., 2002). A investigação da variação dessas antocianinas em diferentes estádios de maturação do fruto de *C. cainito* é fundamental para compreender seu aproveitamento como fonte de pigmentos e compostos funcionais.

Pelo exposto, verifica-se que a composição química e bioativa das frutas, especialmente de espécies como *C. cainito*, transcende o valor nutricional básico, posicionando-se como um recurso estratégico na prevenção de doenças crônicas e na promoção de uma alimentação funcional e sustentável.

2.3 DINÂMICA DA MATURAÇÃO E ACÚMULO DE BIOATIVOS EM FRUTAS TROPICAIS

2.3.1 Alterações Físico-Químicas Durante a Maturação

A maturação é um processo fisiológico complexo e irreversível em frutas, caracterizado por uma série de mudanças coordenadas que culminam no desenvolvimento de características desejáveis para o consumo, como sabor, aroma, cor e textura (Kays e Paull, 2018). Essas alterações são o resultado de reações bioquímicas e enzimáticas intensas que transformam a composição do fruto ao longo do tempo.

Entre as modificações físico-químicas mais proeminentes, observa-se uma dinâmica marcante no teor de Sólidos Solúveis Totais (SST). Frutos em maturação tipicamente exibem um aumento gradual nos SST, que reflete principalmente a

hidrólise de polissacarídeos de reserva, como o amido, em açúcares mais simples (glicose, frutose e sacarose) (Chitarra e Chitarra, 2005).

Concomitantemente, ocorre uma redução na Acidez Titulável (AT) e um aumento no pH, devido à degradação de ácidos orgânicos (cítrico, málico, tartárico), contribuindo para a diminuição da acidez e o desenvolvimento de um sabor mais doce e menos adstringente (Yahia et al., 2011). O monitoramento da AT e do pH é frequentemente utilizado como indicador de maturação comercial e de colheita.

A cor do fruto é um dos indicadores visuais mais evidentes do estágio de maturação. A mudança de coloração, como a transição do verde para o roxo intenso na casca da *C. cainito*, resulta da degradação da clorofila e da síntese e acúmulo de novos pigmentos. No caso de frutos roxos, como o fruto do *C. cainito*, há uma acentuada biossíntese de antocianinas (Luo et al., 2002), enquanto em frutos de coloração amarela/laranja predominam os carotenoides (Kays e Paull, 2018).

A textura e firmeza são também profundamente alteradas durante a maturação. Frutos verdes são geralmente mais firmes e rígidos devido à alta integridade da parede celular. À medida que amadurecem, ocorre um amolecimento progressivo, que é resultado da ação de enzimas hidrolíticas, como a poligalacturonase e a pectinametilesterase.

As enzimas hidrolíticas degradam as substâncias pécticas e hemiceluloses da parede celular. O amolecimento dos frutos, dessa forma, é crucial para a palatabilidade dele, mas também afeta sua vida útil pós-colheita (Chitarra e Chitarra, 2005).

Todas essas alterações físico-químicas são inter-relacionadas e seu monitoramento é essencial para determinar o ponto ideal de colheita e consumo. A importância reside, também, no entendimento do perfil de compostos bioativos em diferentes estágios de amadurecimento, como investigado no presente estudo.

Além disso, durante a maturação, ocorrem alterações nos compostos voláteis, com impacto direto no aroma e sabor característicos de cada espécie. Estes compostos aromáticos, como álcoois, ésteres e aldeídos, se formam por reações enzimáticas, que também são intensificadas nesse período. Colheita. (Chitarra e Chitarra, 2005).

Todas essas alterações físico-químicas são inter-relacionadas e seu monitoramento é essencial para determinar o ponto ideal de colheita e consumo. Além disso, o monitoramento propicia a compreensão do perfil de compostos bioativos em diferentes estádios de amadurecimento.

2.3.2 Fatores que Influenciam a Maturação

A complexidade do processo de maturação em frutas é regulada por uma complexa rede de fatores internos e externos, que atuam de forma sinérgica para desencadear e controlar as transformações físico-químicas e bioquímicas. Dentre os fatores internos, destaca-se o papel do etileno, um hormônio vegetal gasoso reconhecido como o principal regulador da maturação em frutos climatéricos (Kays e Paull, 2018).

Em frutos como *C. cainito*, que exibem um pico respiratório e de produção de etileno durante o amadurecimento, este hormônio atua como um sinal endógeno. Por conseguinte, deflagra a cascata de eventos moleculares que levam ao amolecimento, à mudança de cor, ao desenvolvimento de aromas e sabores, e à degradação ou síntese de diversos compostos (Yahia et al., 2011).

A produção e a percepção do etileno são cruciais para a coordenação do processo de amadurecimento, sendo que sua aplicação exógena pode acelerar a maturação, enquanto a inibição de sua ação pode retardá-la.

Além dos fatores intrínsecos, as condições ambientais exercem uma influência significativa na taxa e na qualidade da maturação. A temperatura é um dos fatores ambientais mais críticos. Temperaturas elevadas geralmente aceleram as reações metabólicas e enzimáticas, resultando em um amadurecimento mais rápido, mas que pode comprometer a qualidade final do fruto se for excessivamente alta. Por outro lado, temperaturas muito baixas podem retardar a maturação ou até induzir distúrbios fisiológicos, como danos pelo frio, em espécies sensíveis. (Kays e Paull, 2018).

A luz é outro fator ambiental importante, especialmente na síntese de pigmentos e na acumulação de certos compostos bioativos. A intensidade e a qualidade da luz afetam diretamente a fotossíntese e a ativação de vias biossintéticas de pigmentos, a exemplo das antocianinas e dos carotenoides. Estes são responsáveis pela coloração final da casca dos frutos (Kays e Paull, 2018). Em frutos

como *C. cainito*, a exposição à luz é essencial para o desenvolvimento da coloração roxa intensa da casca, indicativa de seu estágio de maturação.

A interação desses fatores, sejam eles hormonais, genéticos ou ambientais, determina a velocidade e o padrão das mudanças de maturação. A compreensão desses mecanismos é fundamental para o manejo pós-colheita, visando otimizar a qualidade do fruto e o acúmulo de seus compostos bioativos.

2.3.3 Influência da Maturação na Síntese e Acúmulo de Compostos Bioativos

O processo de maturação nas frutas vai além das alterações físico-químicas visíveis e sensoriais, impactando profundamente o perfil e a concentração de seus compostos bioativos. A síntese, degradação e interconversão de diversas classes de fitoquímicos são processos dinâmicos e altamente regulados durante o amadurecimento, resultando em variações significativas no potencial funcional do fruto. (Chitarra e Chitarra, 2005).

Essa modulação bioquímica é de particular interesse no estudo de frutas tropicais, onde as mudanças de cor e textura frequentemente coincidem com a acumulação de metabólitos secundários de valor à saúde. As antocianinas, responsáveis pela coloração roxa intensa da casca de *C. cainito*, são um exemplo proeminente de compostos cuja biossíntese é fortemente influenciada pela maturação. Em frutos pigmentados, a produção de antocianinas geralmente se intensifica à medida que o fruto amadurece, culminando no desenvolvimento da cor característica (Guisti e Wrolstad, 2001; Luo et al., 2002).

Essa acumulação é um processo enzimático complexo, que envolve a via dos fenilpropanoides e a via dos flavonoides. A concentração final e o tipo de antocianinas podem variar não apenas com o estágio de maturação, mas também com fatores genéticos e ambientais, como a exposição à luz e a temperatura (Yahia et al., 2011). A presença dessas antocianinas confere não apenas atratividade visual, mas também um significativo potencial antioxidante ao fruto.

A capacidade antioxidante total do fruto também sofre modificações notáveis durante a maturação. Embora o comportamento exato possa variar dependendo da espécie e da predominância de determinados compostos bioativos, é comum observar um aumento na capacidade antioxidante à medida que o fruto amadurece,

impulsionado pela síntese de antocianinas, outros polifenóis e vitaminas como a vitamina C (Luo et al., 2002).

No entanto, em alguns casos, pode haver uma redução da capacidade antioxidante em estádios de supermaturação, devido à degradação de compostos termossensíveis ou instáveis. A relação entre os diferentes fitoquímicos e a capacidade antioxidante total é complexa, refletindo a ação sinérgica e aditiva de múltiplos compostos (Liu, 2003).

Estudos com *C. cainito* e outras frutas tropicais têm demonstrado essa variação no perfil de compostos bioativos e na atividade antioxidante em diferentes estádios de amadurecimento (Souza et al., 2023). Compreender essas dinâmicas é crucial não apenas para determinar o ponto ideal de colheita para consumo fresco, mas também para identificar estádios específicos de maturação que maximizem o rendimento de compostos bioativos, abrindo novas perspectivas para o processamento e a valorização industrial do fruto e de seus subprodutos.

2.3.4 Diferenças Químicas e Bioativas entre a Casca e a Polpa

A heterogeneidade na composição de um fruto estende-se além das variações durante a maturação, manifestando-se também nas distinções físico-químicas e no perfil de compostos bioativos entre suas diferentes partes, notadamente a casca e a polpa. Essa segregação de componentes reflete as distintas funções biológicas que cada parte desempenha na planta e sua interação com o ambiente.

A casca de muitas frutas é consistentemente reconhecida como a porção mais rica em compostos bioativos, particularmente polifenóis (como antocianinas, flavonoides e ácidos fenólicos) e carotenoides (Luo et al., 2002; Doan e Le, 2020). Essa concentração elevada de fitoquímicos na casca é atribuída, em grande parte, à sua função protetora contra estresses ambientais, como a radiação ultravioleta, a ação de patógenos e a herbivoria.

Os pigmentos, como as antocianinas na casca roxa do fruto do *C. cainito*, não apenas conferem cor, mas também atuam como filtros UV e antioxidantes primários, protegendo as células subjacentes. Consequentemente, a atividade antioxidante da casca é, em geral, significativamente superior à da polpa (Luo et al., 2002).

Em contraste, a polpa do fruto, embora seja a parte mais consumida e responsável pela maior parte da massa do fruto, geralmente apresenta menor

concentração de compostos fenólicos e pigmentos específicos (Doan e Le, 2020). Sua composição é dominada por água, açúcares e ácidos orgânicos, que conferem as características de sabor e suculência desejadas para o consumo *in natura*.

No entanto, a polpa ainda contém vitaminas (como a vitamina C), minerais e fibras, além de outros compostos bioativos em concentrações mais modestas ou com perfis distintos em relação à casca.

A compreensão dessas diferenças é de suma importância para a valorização integral do fruto. A casca, muitas vezes descartada como resíduo na agroindústria ou no consumo doméstico, representa um valioso subproduto com potencial para o desenvolvimento de ingredientes funcionais, corantes naturais, suplementos alimentares e extratos bioativos (Liu, 2003).

A investigação detalhada da composição e das atividades biológicas da casca de *C. cainito*, em comparação com sua polpa, especialmente em diferentes estádios de maturação, é fundamental para otimizar o aproveitamento de todas as partes do fruto e promover práticas mais sustentáveis na cadeia produtiva.

2.3.5 Estudos Comparativos de Maturação em Frutas Tropicais

A compreensão da dinâmica da maturação e do acúmulo de compostos bioativos em diferentes espécies de frutas tropicais é fundamental para otimizar seu manejo pós-colheita e potencializar seu aproveitamento como fonte de nutrientes e fitoquímicos. Ao comparar os padrões de amadurecimento, é possível identificar similaridades e particularidades que enriquecem o conhecimento sobre a fisiologia e bioquímica desses alimentos.

Nesse contexto, estudos comparativos são valiosos para contextualizar as características do *C. cainito*. A exemplo, Souza et al. (2023) investigaram fitoquímicos e atividades antioxidante e antiglicante em *Chrysophyllum cainito*, *Hancornia speciosa* Gomes (mangaba) e *Plinia glomerata* Berg. (jabuticaba).

O estudo demonstrou que todas as frutas apresentaram um perfil fitoquímico e capacidade antioxidante relevantes, embora com variações significativas entre as espécies. Para a *C. cainito*, especificamente, o estudo de Souza et al. (2023) destacou que a casca apresentou os maiores teores de fenóis totais (90.34 $\mu\text{g GAE mg}^{-1}$) e flavonoides (30.4 $\mu\text{g RE mg}^{-1}$) entre as frutas analisadas, além de uma notável atividade antioxidante em seus extratos.

Outros estudos sobre a dinâmica da maturação em frutas tropicais também fornecem comparações relevantes. Ferreira et al. (2022) analisaram os atributos de qualidade, compostos bioativos e atividade antioxidante da uvaieira (*Eugenia pyriformis*) durante a maturação. Os estudos revelaram padrões de acúmulo de compostos funcionais que podem ser correlacionados com a *C. cainito*. Similarmente, Carvalho et al. (2020) caracterizaram a composição nutricional e o teor de pigmentos de pitanga (*Eugenia uniflora* L.) nas variedades vermelha e roxa, evidenciando a variação de compostos como antocianinas com o estágio de amadurecimento.

Essas comparações são essenciais para situar os achados do presente estudo sobre o fruto do *C. cainito* no cenário da pesquisa com frutas tropicais, permitindo inferir padrões gerais ou destacar aspectos únicos deste fruto em seus diferentes estádios de maturação.

2.4 FRUTAS SUBUTILIZADAS E A AGENDA DE SUSTENTABILIDADE

2.4.1 Conceito e Importância de Frutas Nativas e Plantas Alimentícias Não Convencionais (PANCs)

A crescente padronização da dieta global em torno de um número limitado de espécies cultivadas tem levado à negligência de uma vasta riqueza de recursos alimentares, muitas vezes com elevado potencial nutricional e funcional. Nesse contexto, inserem-se as frutas subutilizadas ou negligenciadas. Trata-se de espécies com valor intrínseco, mas que permanecem pouco exploradas no cultivo em larga escala, na comercialização e no consumo habitual.

O cenário retratado acima culmina em desafios, como a falta de conhecimento sistematizado e a limitada inserção em mercados formais (Tuler e Silva, 2019; Aurino et al., 2024). No âmbito brasileiro, muitas dessas frutas são de espécies nativas, adaptadas aos ecossistemas locais e com grande relevância cultural e socioambiental.

Em um conceito mais amplo, que engloba não apenas os frutos, mas diversas partes de plantas, destacam-se as Plantas Alimentícias Não Convencionais (PANCs). Segundo a definição proposta por Kelen et al. (2015), as PANCs são "todas as plantas que possuem uma ou mais partes comestíveis, sendo elas espontâneas ou cultivadas, nativas ou exóticas que não estão incluídas em nosso cardápio cotidiano".

Essa categorização abrange uma diversidade impressionante de espécies que, embora muitas vezes conhecidas e utilizadas por comunidades tradicionais ou em nichos regionais, não fazem parte da dieta *mainstream*. A importância de frutas nativas e PANCs reside em múltiplos aspectos. Primeiramente, contribuem significativamente para a diversificação dos sistemas alimentares, reduzindo a dependência de monoculturas e aumentando a resiliência frente a desafios climáticos e fitossanitários. (Aurino et al., 2024).

Em segundo lugar, muitas dessas espécies são fontes riquíssimas de vitaminas, minerais, fibras e, notadamente, compostos fitoquímicos com propriedades funcionais (como antioxidantes e anti-inflamatórios), frequentemente superando em teor nutricional as frutas convencionalmente consumidas. A mencionada riqueza nutricional e a necessidade de aprofundamento do conhecimento científico sobre suas propriedades e manejo as tornam cruciais para a melhoria da qualidade nutricional da dieta (Tuler e Silva, 2019; Aurino et al., 2024).

Adicionalmente, por serem espécies nativas ou bem adaptadas a ecossistemas específicos, muitas PANCs demandam menos insumos externos (água, fertilizantes, pesticidas) para seu desenvolvimento e cultivo. Isso as tornam opções mais sustentáveis para a produção de alimentos. (Tuler e Silva, 2019; Aurino et al., 2024).

Por fim, representam um valioso patrimônio cultural, estando frequentemente associadas a conhecimentos tradicionais de manejo, uso e preparo, que são essenciais para sua conservação e valorização. (Tuler e Silva, 2019)

Dentro desse cenário de frutas subutilizadas e PANCs, o *C. cainito*, embora amplamente consumido em algumas regiões da América Central, pode ser considerado subexplorado no Brasil, apesar de sua ocorrência em diversas regiões. O estudo de suas propriedades é, portanto, fundamental para promover sua valorização e inserção mais ampla na dieta e em cadeias produtivas.

2.4.2 Contribuição para a Segurança Alimentar e Nutricional

A Segurança Alimentar e Nutricional (SAN), definida como a garantia do acesso regular e permanente a alimentos de qualidade, em quantidade suficiente, sem comprometer o acesso a outras necessidades essenciais, e baseada em práticas alimentares promotoras da saúde, que respeitem a diversidade cultural e que sejam

ambiental, cultural, econômica e socialmente sustentáveis (FAO, 1996), é um desafio global.

Nesse contexto, a valorização e a inserção de frutas subutilizadas e das PANCs nos sistemas alimentares emergem como estratégias promissoras para fortalecer a SAN (Kelen et al., 2015).

A contribuição dessas espécies para a SAN é multifacetada. Elas aumentam a disponibilidade e diversidade de alimentos, pois ao ampliar o leque de alimentos disponíveis, as frutas subutilizadas e PANCs oferecem alternativas importantes para dietas monótonas e para regiões onde a produção de culturas convencionais pode ser desafiadora.

A mencionada diversificação reduz a dependência de poucas culturas, aumentando a resiliência dos sistemas alimentares a choques climáticos, pragas ou crises econômicas. Além disso, promovem a melhoria do perfil nutricional da dieta, já que muitas dessas espécies são naturalmente ricas em micronutrientes essenciais (vitaminas e minerais) e em uma vasta gama de compostos bioativos, como polifenóis e carotenoides, que atuam na promoção da saúde e na prevenção de doenças crônicas.

A inclusão dessas frutas na dieta pode, portanto, combater a "fome oculta" – deficiências de micronutrientes – e melhorar a qualidade nutricional geral, suprimindo lacunas importantes, um aspecto frequentemente destacado para o desenvolvimento sustentável e a segurança alimentar (Aurino et al., 2024). Adicionalmente, apoiam sistemas de produção sustentáveis, pois por serem espécies adaptadas aos seus ecossistemas, muitas PANCs demandam menos insumos externos, como fertilizantes e pesticidas, e podem prosperar em condições menos favoráveis às culturas comerciais.

Isso promove práticas agrícolas mais sustentáveis, alinhadas com a conservação da biodiversidade e a saúde do solo. E, por fim, fortalecem a soberania alimentar, pois o incentivo ao cultivo e consumo de espécies locais fortalece as cadeias produtivas regionais. Ademais, esse incentivo projeta-se ainda no empoderamento de agricultores familiares e das comunidades tradicionais, e reduz a dependência de alimentos importados ou de grandes corporações.

A pesquisa sobre o potencial do *C. cainito*, ao elucidar sua riqueza em nutrientes e compostos bioativos, contribui diretamente para a promoção de seu

consumo. Essa valorização pode, por sua vez, apoiar a diversificação agrícola e alimentar, reforçando a segurança alimentar e nutricional em comunidades onde a fruta pode ser cultivada e aproveitada.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Investigar as propriedades químicas e bioativas do fruto de *Chrysophyllum cainito* L. em diferentes estádios de maturação, com foco em seu potencial antioxidante, citotóxico e quimiopreventivo de câncer.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Caracterizar a composição centesimal e o perfil fitoquímico do fruto de *C. cainito* em diferentes estádios de maturação;
- b. Comparar a composição química e as propriedades bioativas do fruto nos diferentes estádios, identificando aquele com maior potencial funcional;
- c. Avaliar o potencial antioxidante dos extratos do fruto por meio de métodos químicos;
- d. Identificar e quantificar os compostos bioativos presentes nos extratos do fruto;
- e. Investigar a atividade citotóxica *in vitro* dos extratos em culturas de células RAW 264.7 e fibroblastos L929;
- f. Analisar o potencial quimiopreventivo de câncer dos extratos por meio da indução da enzima quinona redutase.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 COLETA E PREPARO DAS AMOSTRAS

A coleta dos frutos de *Chrysophyllum cainito* L. foi realizada na zona rural do município de Anchieta, no estado do Espírito Santo, especificamente no Sítio Vista Linda, localizado no bairro Belo Horizonte (20°44'30.0"S, 40°36'46.2"W). Após a coleta, os frutos foram acondicionados em embalagens adequadas e transportados ao Laboratório de Produtos Naturais da Universidade de Vila Velha (UVV), onde foram desembalados, pesados e higienizados por lavagem em água corrente. Em seguida, foram classificados em três grupos, de acordo com o estágio de maturação.

No Estádio 1, os frutos apresentavam casca de coloração verde e polpa rígida e esbranquiçada. No Estádio 2, a casca exibia coloração mesclada entre tons de verde e arroxeadado, com polpa menos rígida e parcialmente arroxeadada. Já no Estádio 3, os frutos possuíam casca roxa escura, com polpa macia e de coloração arroxeadada (Figura 2 e Figura 7). A classificação adotada neste estudo foi desenvolvida para a pesquisa, em virtude da ausência de respaldo específico na literatura para esta espécie.

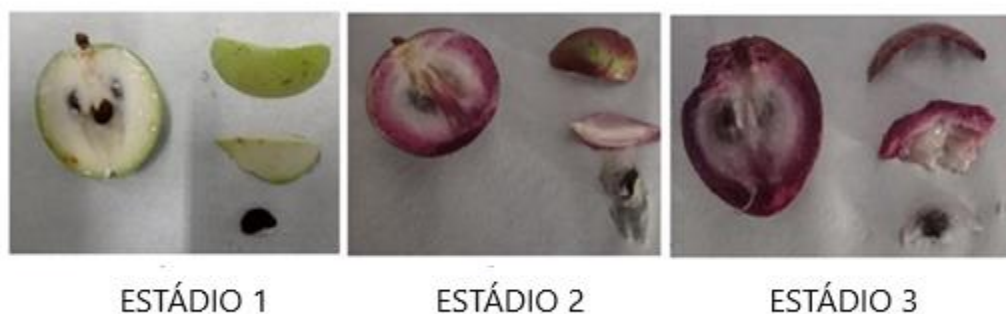


Figura 7 - Casca, polpa e semente do fruto de *C. cainito* em diferentes estádios de maturação

Após a classificação, realizou-se a separação manual das partes do fruto: casca, polpa e semente. As cascas foram identificadas como C1, C2 e C3, e as polpas como P1, P2 e P3, correspondendo aos estádios de maturação 1, 2 e 3, respectivamente. As sementes, por não serem objeto de análise, foram descartadas. As cascas e polpas foram então acondicionadas separadamente, conforme o estágio de maturação, e armazenadas em freezer a -20°C até o momento das análises.

A identificação botânica da espécie foi realizada pelo Professor Dr. Anderson Alves Araújo (Universidade Federal da Bahia – UFBA), e o material testemunho (*voucher*) foi depositado no herbário da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), sob o número 64710.

4.2 DETERMINAÇÃO DOS ESTÁDIOS DE MATURAÇÃO

Para a determinação dos estádios de maturação dos frutos, os seguintes parâmetros físico-químicos foram avaliados: sólidos solúveis totais (SST), acidez total titulável (ATT), relação SST/ATT (*ratio*) e pH, conforme a metodologia adaptada de Oliveira et al. (2022).

A determinação dos SST foi realizada utilizando-se um refratômetro digital (Tecnal®, Metash, China), previamente calibrado com água destilada. As amostras (após homogeneização) foram aplicadas em alíquotas de 1 a 2 gotas no prisma do equipamento, com leitura direta dos valores em °Brix.

Para a determinação da acidez total titulável (ATT), aproximadamente 10 g de cada amostra (base fresca) foram pesados em balança analítica em um erlenmeyer de 250 mL e homogeneizados com 100 mL de água destilada. Em seguida, adicionaram-se duas gotas de solução indicadora de fenolftaleína, e a amostra foi titulada com solução de hidróxido de sódio (NaOH) 0,1 N até o aparecimento de coloração levemente rósea persistente. O volume de NaOH consumido foi registrado, e a ATT foi expressa em % de ácido cítrico (g de ácido cítrico/100 g de amostra).

A relação SST/ATT (*ratio*) foi calculada pela divisão entre o valor dos sólidos solúveis totais (°Brix) e a acidez total titulável (% de ácido cítrico).

A determinação do pH das amostras foi realizada utilizando um pHmetro digital (Incorterm®, PHB550). O equipamento foi previamente calibrado com soluções tampão padrão de pH 4,0 e 7,0. Para a medição, as amostras foram primeiramente homogeneizadas e, em seguida, maceradas manualmente. O eletrodo do pHmetro foi inserido diretamente na porção líquida resultante para a leitura do pH.

4.3 PREPARAÇÃO DOS EXTRATOS HIDROETANÓLICOS

Para a obtenção do extrato seco, utilizou-se a metodologia descrita por Silva et al. (2023) com adaptações. Aproximadamente 100 g de cada parte do fruto (base fresca) foram macerados em liquidificador doméstico (Philips Walita®, 650W) em 1000

mL de solução hidroalcoólica de etanol a 70%. A maceração foi seguida de agitação manual intermitente por 5 minutos à temperatura ambiente.

Posteriormente, a suspensão foi submetida à sonicação por 16 minutos e, em seguida, filtrada em papel filtro (Whatman nº 1). Os extratos líquidos foram concentrados em um evaporador rotativo (Buchi®, B-100) sob pressão reduzida até a remoção completa do solvente. O extrato resultante foi congelado a -20°C e, subsequentemente, liofilizado (Terroni®, Enterprise I, LT 600), obtendo-se o extrato hidroetanólico seco.

4.4 COMPOSIÇÃO CENTESIMAL

As análises foram realizadas em triplicata, seguindo as metodologias descritas pelo Instituto Adolfo Lutz (2008), com adaptações específicas para a extração de lipídios em amostras de frutas. O teor de umidade foi determinado por secagem em estufa a 105°C até o peso constante. O teor de proteína foi quantificado pelo método de Kjeldahl, utilizando-se o fator de conversão 6,25 (nitrogênio para proteína). A determinação do teor de cinzas foi realizada por incineração em mufla a 550°C .

Os lipídios totais foram extraídos pelo método de Goldfish, utilizando-se o hexano como solvente por 4 horas, a uma temperatura de 80°C . O teor de carboidratos totais foi calculado por diferença, subtraindo-se de 100 a soma dos valores de umidade, proteína, lipídios e cinzas. O valor energético total foi estimado utilizando os fatores de conversão de Atwater: 4 kcal/g para proteínas e carboidratos, e 9 kcal/g para lipídios (Watt; Merrill, 1963).

4.5 ENSAIOS DE CAPACIDADE ANTIOXIDANTE

4.5.1 Método DPPH

A atividade antioxidante foi avaliada pelo método de sequestro do radical livre 2,2-difenil-1-picrilhidrazil (DPPH), conforme descrito por Scherer e Godoy (2009), com adaptações para microplacas. O ensaio foi replicado em três experimentos independentes (N=3), sendo cada experimento realizado em triplicata (n=3), totalizando nove repetições para todas as amostras das diferentes partes do fruto.

Para a análise, uma solução estoque dos extratos foi preparada na concentração de 10 mg/mL em metanol 70%. A partir dessa solução estoque, diluições

seriadas foram realizadas diretamente nas microplacas de 96 poços para obter uma faixa de concentrações adequada. Em cada poço, foram adicionados 20 µL da amostra diluída e 280 µL de uma solução de DPPH.

Após 60 minutos de reação à temperatura ambiente e protegido da luz, a absorbância foi medida a 517 nm em um leitor de microplacas (Espectrofotômetro de microplacas Multiskan SkyHigh UV/Vis, Thermoscientific®). Os controles foram preparados em uma placa de 96 poços separada no dia do experimento, utilizando 20 µL de metanol 70% e 280 µL da solução de DPPH.

A porcentagem de inibição do radical DPPH (I%) foi calculada pela equação: $I(\%) = \frac{\text{Abscontrole} - \text{Absamostra}}{\text{Abscontrole}} \times 100$, onde Abscontrole é a absorbância média do controle (DPPH + metanol) e Absamostra é a absorbância das amostras. Os resultados foram expressos como IC₅₀ (Concentração Inibitória 50%), que representa a concentração de amostra necessária para inibir 50% dos radicais livres, determinada a partir da curva de inibição (%).

4.5.2 Método ABTS

A capacidade de sequestro do radical livre 2,2'-azinobis 3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfônico (ABTS) foi determinada por método colorimétrico, com base na metodologia de Re et al. (1999), com modificações. Os ensaios foram realizados em triplicata (n=3) para todas as amostras das diferentes partes do fruto.

Para a análise, uma solução estoque dos extratos foi preparada na concentração de 10 mg/mL em metanol 70%. A partir dessa solução estoque, diluições seriadas foram realizadas diretamente nas microplacas de 96 poços para obter uma faixa de concentrações adequada. Em cada poço de ensaio, foram adicionados 30 µL da amostra diluída e 270 µL da solução de ABTS. Os controles foram preparados em uma placa de 96 poços separada no dia do experimento, utilizando 30 µL de metanol 70% e 270 µL da solução de ABTS.

As microplacas foram incubadas no escuro por 6 minutos. Após esse período de reação, a absorbância foi medida a 734 nm em um espectrofotômetro de microplacas Multiskan SkyHigh UV/Vis (Thermoscientific®, Estados Unidos).

A porcentagem de inibição do radical ABTS (I%) foi calculada pela equação: $I(\%) = \frac{\text{Abscontrole} - \text{Absamostra}}{\text{Abscontrole}} \times 100$, onde Abscontrole é a absorbância média do controle (ABTS + metanol) e Absamostra é a absorbância das amostras. Os

resultados foram expressos como IC₅₀ (Concentração Inibitória 50%), determinada a partir da curva de inibição (%).

4.6 COMPOSIÇÃO FITOQUÍMICA

4.6.1 Antocianinas Totais

O teor total de antocianinas monoméricas nos extratos da casca e da polpa de *Chrysophyllum cainito* foi quantificado usando um método espectrofotométrico baseado em variação de pH, conforme descrito por Giusti e Wrolstad (2001). Para a análise, os extratos foram dissolvidos diretamente em duas soluções tampão: cloreto de potássio (pH 1,0) e acetato de sódio (pH 4,5), resultando em uma concentração final de extrato de 10 mg/mL em cada tampão.

As absorvâncias foram medidas em um Espectrofotômetro Digital UV/Vis (Global Analyzer®, GTA-96) nos comprimentos de onda de 520 nm e 700 nm. A absorvância final (A) foi calculada pela fórmula: $A = (A_{520 \text{ nm}} - A_{700 \text{ nm}})_{\text{pH 1.0}} - (A_{520 \text{ nm}} - A_{700 \text{ nm}})_{\text{pH 4.5}}$.

O teor total de antocianinas foi então determinado usando o equivalente de cianidin-3-glicosídeo e a equação: Teor total de antocianinas (mg/g) = $(\epsilon \times l) \times (A \times MW \times DF \times 1000)$ onde A representa a absorvância final, MW é a massa molecular do cianidin-3-glicosídeo (449,2 g/mol), DF é o fator de diluição da amostra, 1000 é o fator de conversão de g para mg, ϵ é o coeficiente de absorvância molar do cianidin-3-glicosídeo (26900 L·cm⁻¹·mol⁻¹) e l é a espessura da cubeta (1 cm). Os resultados foram expressos em mg/L.

4.6.2 Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC)

A identificação e quantificação de compostos fenólicos (ácido gálico, ferúlico, cinâmico, clorogênico, cafeico e taninos, expressos como equivalente de ácido tânico) e flavonoides (catequina e cianidina) nos extratos foram realizadas por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC) em um sistema Agilent 1260 Infinity II (Agilent Technologies®, Estados Unidos), acoplado a detectores Ultravioleta (UV) e de Arranjo de Diodos (DAD).

Todos os padrões e reagentes de grau HPLC foram adquiridos da Sigma-Aldrich® (Steinheim, Alemanha). Curvas analíticas com 12 pontos de concentração

de 10 a 500 µg/mL foram preparadas a partir de soluções estoque de 10 mg/mL em metanol.

As amostras foram preparadas na concentração de 4 mg/mL, filtradas em filtros PTFE hidrofílico (0,45 µm, Analítica, China), colocadas em vials. Após dispostos no equipamento, 10 µL foram injetados por corrida. A separação cromatográfica utilizou uma coluna Phenomenex C-18 (3 µm, 100 x 4,6 mm D.I.) mantida a 30 °C. A fase móvel consistiu de Solvente A: ácido trifluoroacético (TFA) a 0,1% em água deionizada, e solvente B: acetonitrila.

O gradiente de eluição, adaptado de Al-Taie et al. (2018), foi: 0–10 min, 0–100% de Solvente B; 10–12 min, 100% de Solvente B; 12–14 min, gradiente para 50% de Solvente B; 14–15 min, gradiente para 0% de Solvente B (retorno a 100% de Solvente A). Uma etapa de limpeza de 1 min com metanol (Solvente C) foi realizada após 15 min. A taxa de fluxo foi de 1 mL/min. Antes da injeção, as fases móveis foram submetidas a banho ultrassônico por 30 minutos a 25 °C.

A detecção foi realizada a 280 nm para ácidos fenólicos e 254 nm para flavonoides. Foram realizadas três injeções por vial, mantendo as mesmas condições para amostras e padrões. A identificação foi realizada por espectro UV, considerando os limites de detecção (LD). A quantificação foi baseada nas curvas analíticas e nos limites de quantificação (LQ), com resultados expressos em µg do composto por mL do extrato. Os picos eluídos foram monitorados e os dados processados no software *OpenLab* versão 3.6.

4.7 AVALIAÇÃO DAS ATIVIDADES BIOLÓGICAS IN VITRO

4.7.1 Avaliação da Citotoxicidade pelo Ensaio MTT

A avaliação da citotoxicidade celular foi conduzida utilizando o método colorimétrico MTT (brometo de [3-(4,5-dimetiltiazol-2-il)-2,5-difeniltetrazólio]) sendo este um teste colorimétrico usado para medir a atividade metabólica de células vivas, fornecendo uma estimativa da viabilidade celular.

O método baseia-se na redução do sal de tetrazólio a cristais de formazana púrpura por enzimas mitocondriais presentes em células metabolicamente ativas, como a succinato desidrogenase, fornecendo uma estimativa da viabilidade celular.

Foi seguido a metodologia de Magalhães, Thá e Leme (2018) com modificações. O ensaio foi realizado com as linhagens de fibroblastos L929 e macrófagos RAW 264.7.

Uma solução-mãe dos extratos foi preparada dissolvendo 10 mg de extrato seco em 1 mL de DMSO, resultando em uma concentração de 10 mg/mL. Para o ensaio, as células foram inicialmente cultivadas em placas de 96 poços e, em seguida, expostas a diferentes concentrações dos extratos (50 µg/mL, 5 µg/mL e 0,5 µg/mL) por 24 horas. A incubação ocorreu a 37 °C em atmosfera de 5% CO₂. Após o período de tratamento, o reagente MTT foi adicionado e as placas foram incubadas por 2 horas para a formação dos cristais de formazana.

O sobrenadante contendo o excesso de MTT foi cuidadosamente aspirado, e os cristais formados foram dissolvidos em 100 µL de dimetilsulfóxido (DMSO). A absorbância foi lida a 570 nm em um espectrofotômetro de microplacas Multiskan SkyHigh UV/Vis (Thermoscientific®, Estados Unidos). A viabilidade celular foi determinada comparando a absorbância das células tratadas com a dos controles não tratados, e os resultados expressos em porcentagem de viabilidade.

4.7.2 Ensaio de Indução da Quinona Redutase (QR) e Atividade Quimiopreventiva de Câncer

A avaliação da indução da enzima quinona redutase (QR) foi conduzida empregando a linhagem celular de hepatoma de rato Hepa1c1c7. A metodologia seguiu o protocolo de Prochaska e Santamaria (1988), com adaptações conforme Gerhauser et al. (1997).

As células foram inicialmente semeadas em duas placas de 96 poços, separadamente designadas para o ensaio de Proteína e para o ensaio de QR, e mantidas em incubação por 24 horas. Após a remoção do meio de cultura inicial, 190 µL de meio fresco foram adicionados a cada poço.

Em seguida, 10 µL das soluções-teste foram aplicados, que incluíam as amostras (solução estoque de 10 mg/mL), o indutor positivo 4'-bromoflavona (curva de diluição variando de 50,0 µM a 0,4 µM) ou DMSO a 10% (empregado como controle negativo). As placas foram então incubadas por 48 horas em estufa com atmosfera de 5% CO₂.

Para a determinação do conteúdo proteico na placa específica para "Proteína", o meio foi substituído por 200 µL de uma solução de cristal violeta a 2% em etanol.

Após 10 minutos de incubação à temperatura ambiente, a solução de cristal violeta foi removida, e a placa foi lavada com água destilada e seca. Posteriormente, 200 µL de SDS a 0,5% em etanol 50% foram adicionados, e a placa foi incubada sob agitação por 5 a 10 minutos para dissolução. A absorbância foi lida a 595 nm, e o valor do controle negativo foi ajustado para 1,0.

Na placa do “QR ensaio”, após a remoção do meio, 50 µL de digitonina a 0,8% (excluindo os poços de branco) foram adicionados, seguido por incubação a 37 °C por 10 minutos. Concluída essa etapa e após nova agitação, 200 µL de uma mistura enzimática reacional (contendo 0,33 mg/mL de BSA, 10 µM de FAD, 60 µM de NADPH em tampão 25 mM Tris-HCl, pH 7,4) foram adicionados. A leitura da absorbância foi realizada a 595 nm em um espectrofotômetro de microplacas Multiskan SkyHigh UV/Vis (Thermoscientific®, Estados Unidos), com o valor do controle negativo ajustado para 0,4. Cada experimento foi conduzido em duplicata (n=2).

4.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados obtidos nas análises foram apresentados como média acompanhada de desvio padrão (DP) e/ou erro padrão da média (EPM), com base em, no mínimo, três experimentos independentes. A análise estatística empregou o software livre BioEstat versão 5.0, juntamente com os programas IBM SPSS Statistics versão 24 e STATA versão 14.

Para comparar as medidas avaliadas entre os frutos verdes, intermediários e maduros, utilizou-se a ANOVA para medidas repetidas, seguida pelo teste de comparações múltiplas de Bonferroni. Essa abordagem foi selecionada por ser um teste que compara mais de duas médias e é adequada para avaliar o mesmo fruto em diferentes estádios de maturação (verde, intermediário e maduro).

Enquanto a ANOVA indica a existência de diferenças significativas entre as médias, o teste de Bonferroni identifica especificamente quais pares de grupos diferem. Em todas as análises, adotou-se um nível de significância de 5% ($\alpha=0,05$).

Os resultados dos ensaios de citotoxicidade (MTT) e indução da quinona redutase foram apresentados de forma descritiva, dado o formato das replicatas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 AVALIAÇÃO DO ESTÁDIO DE MATURAÇÃO DO CHRYSOPHYLLUM CAINITO

A avaliação do estágio de maturação do *C. cainito* revelou padrões físico-químicos distintos para a polpa e a casca, refletindo a complexa interação entre fatores intrínsecos e extrínsecos no desenvolvimento do fruto (Tabela 1).

Tabela 1 - Características físico-químicas (SST, AT, Razão SST/AT e pH) da casca e polpa de *C. cainito* em diferentes estádios de maturação

Estádio de Maturação	SST (°Brix)		AT (g ac. cítrico/100g)		Razão SST/AT		pH	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
C1	9.00	± 0.10a	0.16	± 0.01a	57.49	± 1.63b	4.21	± 0.05b
C2	9.43	± 0.32a	0.31	± 0.03b	30.36	± 3.79a	3.22	± 0.01a
C3	8.60	± 0.26a	0.16	± 0.01a	53.94	± 4.68b	3.43	± 0.29a
P1	6.00	± 0.50a	0.09	± 0.01a	69.68	± 10.40a	4.62	± 0.04a
P2	7.40	± 0.10a	0.07	± 0.01a	107.32	± 16.93a	4.66	± 0.04a
P3	8.00	± 0.20a	0.06	± 0.01a	126.99	± 11.49a	4.93	± 0.01a

Médias seguidas por letras distintas em cada coluna são significativamente diferentes ($p < 0.050$) pelo teste ANOVA para amostras pareadas, seguido pelo teste post-hoc de Bonferroni.

C - Casca; P - polpa; 1 (verde); 2 (intermediária); 3 (madura)

Os sólidos solúveis totais (SST), representados predominantemente por açúcares (65-80%) (Chitarra, 1990), demonstraram comportamentos distintos na casca e na polpa (Tabela 1). Na casca, não houve diferença estatisticamente significativa nos valores de SST entre os estágios de maturação (C1: $9,00 \pm DP0,10$ °Brix; C2: $9,43 \pm DP0,32$ °Brix; C3: $8,60 \pm DP0,26$ °Brix; $p > 0,05$), apesar de uma variação numérica, que mostra um aumento do estágio 1 para o estágio 2, e declínio no estágio 3.

Essa estabilidade na casca, em contraste com o que poderia ser esperado em outros tecidos, pode ser atribuída à sua exposição direta a fatores ambientais (luz, temperatura, umidade), que influenciam o metabolismo e a concentração de SST de maneiras distintas da polpa (Zheng et al., 2022). Para a polpa, observou-se uma tendência numérica de aumento do SST com o amadurecimento (P1: $6,00 \pm DP0,50$ °Brix; P2: $7,40 \pm DP0,10$ °Brix; P3: $8,00 \pm DP0,20$ °Brix). No entanto, de acordo com a

análise estatística, não houve diferença significativa entre os estágios P1, P2 e P3 para o teor de SST ($p > 0,05$).

O resultado, embora biológica e numericamente coerente com o acúmulo de açúcares devido à quebra do amido durante a respiração (Pigozzi, 2020), sugere que as variações no teor de açúcares na polpa de *C. cainito* durante os estágios avaliados não atingem um limiar estatisticamente discernível.

A acidez titulável (AT) atribuída aos ácidos orgânicos e o pH apresentaram comportamentos distintos entre a polpa e a casca (Tabela 1). Na polpa, a AT demonstrou uma tendência numérica de diminuição com o amadurecimento (de $0,09 \pm DP0,01$ g ac. cítrico/100g em P1 para $0,06 \pm DP0,01$ g ac. cítrico/100g em P3). Complementarmente, o pH da polpa apresentou uma tendência numérica de aumento conforme o avanço dos estágios de maturação (de $4,62 \pm DP0,04$ em P1 para $4,93 \pm 0,01$ em P3).

Contudo, para ambos os parâmetros (AT e pH) na polpa, não houve diferença estatisticamente significativa entre os estágios P1, P2 e P3 ($p > 0,05$). Esse comportamento, onde a acidez se mantém relativamente estável em níveis baixos, é consistente com a maturação de frutos nos quais os ácidos orgânicos são consumidos na respiração ou convertidos em açúcares, embora essa transição não seja estatisticamente acentuada nesta espécie (Oliveira, 2015).

A casca, por outro lado, apresentou um comportamento singular para a acidez: o estágio C2 exibiu os maiores valores de AT ($0,31 \pm DP0,03$ g ac. cítrico/100g) e o menor pH ($3,22 \pm DP0,01$), sendo estatisticamente diferente dos estágios C1 ($0,16 \pm DP0,01$ g ac. cítrico/100g e $4,21 \pm DP0,05$) e C3 ($0,16 \pm DP0,01$ g ac. cítrico/100g e $3,43 \pm 0,29$) para ambas as características ($p < 0,05$). Os estágios C1 e C3 da casca não apresentaram diferença significativa na AT ou no pH.

A razão SST/AT, um importante índice de doçura e maturidade do fruto, também refletiu esses padrões distintos. Na polpa, a razão SST/AT apresentou uma tendência numérica de aumento progressivo do estágio P1 ($69,68 \pm DP10,40$) para P3 ($126,99 \pm DP11,49$).

No entanto, não houve diferença estatisticamente significativa entre os estágios P1, P2 e P3 ($p > 0,05$) para este parâmetro. Apesar da ausência de significância estatística, a elevação numérica da razão é coerente com a tendência de acúmulo de SST e a estabilidade da AT, sugerindo uma melhoria da palatabilidade.

Em contraste, na casca, a razão SST/AT foi significativamente menor no estágio C2 ($30,36 \pm 3,79$) em comparação com os estágios C1 ($57,49 \pm 1,63$) e C3 ($53,94 \pm 4,68$) ($p < 0,05$), que não diferiram significativamente entre si (Tabela 1). Esse valor reduzido no estágio C2 para a casca está diretamente relacionado à alta AT e baixo pH observados neste estágio, indicando uma proporcionalmente maior acidez em relação aos sólidos solúveis.

Esse padrão atípico na casca, onde a acidez (e conseqüentemente uma baixa razão SST/AT) aumenta transitoriamente no estágio 2, pode ser explicado pela intensa atividade metabólica da casca no estágio intermediário.

É possível que ocorra uma maior produção de ácidos orgânicos, como o ácido málico e cítrico, a partir da conversão de açúcares, via vias anapleróticas e o ciclo do ácido tricarbóxico, superando temporariamente sua degradação ou consumo pela respiração celular (Etienne et al., 2013).

O acúmulo desses ácidos na casca, um tecido diretamente exposto a fatores ambientais, pode ser influenciado pelas condições externas que modulam a atividade enzimática e as rotas metabólicas (Zheng et al., 2022). A variabilidade nos níveis de ácidos orgânicos na casca, observada em diferentes frutos (Bar-Yaakov. et al., 2019b), corrobora a complexidade do metabolismo desse tecido.

Em suma, a avaliação dos parâmetros de maturação demonstra que, mesmo em um mesmo fruto de *C. cainito*, a casca e a polpa apresentam comportamentos distintos e significativamente diferentes no decorrer do amadurecimento, sendo influenciados por fatores intrínsecos e extrínsecos.

Pôde-se observar que a polpa, embora com tendências numéricas de aumento de SST, Razão SST/AT e pH, e diminuição de AT, não apresenta alterações estatisticamente significativas entre os estágios de maturação para esses parâmetros.

Este comportamento contrasta com padrões comumente registrados na literatura para uma vasta gama de frutos que demonstram mudanças estatisticamente robustas. No entanto, a casca exibiu um comportamento distintamente mais dinâmico, com variações significativas de AT, Razão SST/AT e pH, o que pode estar relacionado à sua função protetora no fruto, bem como a fatores extrínsecos aos quais foi exposta durante o desenvolvimento.

A carência de dados detalhados na literatura sobre *C. cainito* torna os parâmetros físico-químicos aqui apresentados uma referência primária valiosa. Estes

dados abrem caminho para o aprofundamento do conhecimento sobre o processo de amadurecimento desta espécie e o consequente aproveitamento otimizado de suas diferentes partes.

5.2 AVALIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO CENTESIMAL

A composição centesimal da casca e polpa de *C. cainito* revelou um perfil nutricional característico, com variações significativas entre as diferentes partes e estágios de maturação (Tabela 2).

De modo geral, os resultados obtidos para a polpa (P1, P2, P3) apresentaram boa concordância com dados da literatura para a porção comestível de *C. cainito*, que reportam umidade entre 75,90% e 85,7%, proteínas de 0,72 a 2,33 g/100g, e carboidratos de 14,65 a 18,39 g/100g (Yahia e Gutierrez-Orozco, 2011; Oranusi et al., 2015).

Tabela 2 - Características da Composição Centesimal da Casca e Polpa de *C. cainito* em Diferentes Estádios de Maturação

Estágio de Maturação	Umidade (%)	Cinzas (%)	Lipídios (%)	Proteínas (%)	Carboidratos (%)	VETC (kcal/100g)
	Média ±	Média ±	Média ±	Média ±	Média ±	Média ±
	Desvio padrão	Desvio padrão	Desvio padrão	Desvio padrão	Desvio padrão	Desvio padrão
C1	80.42±2.03a	0.76±0.05b	1.22±0.10b	2.39±0.11a	15.21±2.21a	79.55±0.04a
C2	78.16 ±1.62a	0.60±0.06a	0.50±0.03a	3.22±0.22a	17.51±1.72a	76.98±7.01a
C3	73.69±1.01a	0.65±0.02ab	1.18±0.10b	2.86±0.14a	21.62±1.05a	99.73±4.41b
P1	81.67±0.48a	0.40±0.00a	1.07±0.07b	1.64±0.22a	15.21±0.75b	72.12±2.50b
P2	84.26±0.89b	0.36±0.02a	0.89±0.03a	1.24±0.01a	13.25±0.91a	62.47±3.47a
P3	82.64±0.92ab	0.39±0.04a	0.93±0.01ab	1.28±0.10a	14.76±0.79b	68.95±3.23ab

Médias seguidas por letras distintas em cada coluna são significativamente diferentes ($p < 0.050$) pelo teste ANOVA para amostras pareadas, seguido pelo teste *post-hoc* de Bonferroni. C - Casca; P - polpa; 1 (verde); 2 (intermediária); 3 (madura); VETC – valor calórico estimado

Os resultados indicaram que tanto a casca quanto a polpa de *C. cainito* são predominantemente compostas por água. No entanto, o teor de umidade nos diferentes estágios de maturação revelou variações dependendo da parte do fruto. Na casca (C1, C2 e C3), não foram observadas diferenças estatisticamente significativas ($p > 0,05$).

Essa estabilidade na umidade da casca durante o amadurecimento também foi reportada para outros frutos (Rodrigues et al., 2021). Em contraste, para a polpa, o teor de umidade aumentou significativamente de P1 para P2 ($p < 0,05$), com P2 apresentando o maior teor ($84,26 \pm DP0,89\%$). O estágio P3 ($82,64 \pm DP0,92\%$), por sua vez, não diferiu estatisticamente de P1 ($81,67 \pm DP0,48\%$) nem de P2, posicionando-se como uma condição intermediária entre esses dois estágios.

O aumento da umidade em P2 pode refletir uma fase de intensa expansão celular e acúmulo de água na polpa, processo comum durante o desenvolvimento inicial ou intermediário de muitos frutos e a queda posterior no estágio 3, um indicativo de possível senescência do fruto

O teor de cinzas, que representa o conteúdo de minerais, foi consistentemente maior na casca do fruto em comparação com a polpa. Na casca, C1 ($0,76 \pm DP0,05\%$) apresentou um teor significativamente maior que C2 ($0,60 \pm DP0,06\%$) ($p < 0,05$), enquanto C3 ($0,65 \pm DP0,02\%$) não diferiu estatisticamente de C1 nem de C2. Este padrão sugere flutuações no conteúdo mineral da casca ao longo da maturação.

A polpa, por sua vez, não apresentou diferenças significativas no teor de cinzas entre os estágios ($p > 0,05$). A maior concentração de minerais na casca é um padrão comum em frutos (Sachini et al., 2018), onde a epiderme pode concentrar nutrientes, ressaltando o potencial do consumo do fruto inteiro para uma maior ingestão de nutrientes.

Em relação aos lipídios, na casca, os maiores teores foram observados nos estágios C1 ($1,22 \pm DP0,10\%$) e C3 ($1,18 \pm DP0,10\%$), os quais foram estatisticamente superiores ao estágio C2 ($0,50 \pm DP0,03\%$) ($p < 0,05$). Essa flutuação pode estar relacionada a processos de síntese e degradação de lipídios de membrana ou ceras da cutícula, que variam durante o amadurecimento e a formação da barreira protetora do fruto (Lara & Heredia, 2020).

Na polpa, o maior teor lipídico foi em P1 ($1,07 \pm DP0,07\%$), que diferiu significativamente de P2 ($0,89 \pm DP0,03\%$) ($p < 0,05$), enquanto P3 ($0,93 \pm DP0,01\%$)

não diferiu de P1 nem P2. A diminuição inicial dos lipídios na polpa pode indicar seu uso como substrato energético. Especificamente para a polpa de *C. cainito*, Oranusi et al. (2015) reportaram um teor de 0,88% de lipídeos, valor que se alinha com os resultados obtidos neste estudo para os estágios P2 e P3.

Quanto ao teor de proteínas, a casca de *C. cainito* apresentou porcentagens médias numericamente superiores em relação à polpa. No entanto, tanto para a casca (C1, C2, C3) quanto para a polpa (P1, P2, P3), não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre os estágios para este parâmetro ($p > 0,05$).

Esses resultados demonstram que a casca de *C. cainito* apresenta valores proteicos superiores aos encontrados em cascas de diversas frutas, como ameixa (1,43%), mamão (2,57%) e manga (1,00%) (Stefanello & Rosa, 2012), além de se equiparar ou superar os valores descritos para espécies da família Annonaceae, como atemoia (3,43%), pinha (2,86%) e graviola (1,62%) (Bramont et al., 2018). Tais achados reforçam o potencial nutricional da casca de *C. cainito*, um subproduto tradicionalmente descartado, como uma fonte viável para aplicação em formulações alimentícias funcionais.

Os carboidratos representaram o principal componente da matéria seca remanescente após a umidade. Na casca, embora haja uma tendência numérica de aumento em C3 ($21,62 \pm 1,05\%$), não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre os estágios ($p > 0,05$) para este parâmetro.

Isso pode ser reflexo do acúmulo de açúcares na casca à medida que o fruto amadurece. Na polpa, o teor de carboidratos em P2 ($13,25 \pm DP0,91\%$) foi significativamente menor que em P1 ($15,21 \pm DP0,75\%$) e P3 ($14,76 \pm DP0,79\%$) ($p < 0,05$), sendo P1 e P3 estatisticamente similares. A diminuição em P2 pode indicar um período de alta demanda energética ou conversão de carboidratos em outros compostos.

Por fim, os valores calóricos estimados (VETC) demonstraram variações entre as partes e estágios do fruto. Na casca, C3 ($99,73 \pm DP4,41$ kcal/100g) apresentou um VETC significativamente maior que C1 ($79,55 \pm DP0,04$ kcal/100g) e C2 ($76,98 \pm DP7,01$ kcal/100g) ($p < 0,05$).

Este aumento é consistente com a tendência de acúmulo de carboidratos nesse estágio. Na polpa, P2 ($62,47 \pm 3,47$ kcal/100g) exibiu um VET significativamente menor que P1 ($72,12 \pm 2,50$ kcal/100g) ($p < 0,05$), enquanto P3 ($68,95 \pm 3,23$ kcal/100g) não

diferiu significativamente de P1 ou P2. Essa variação está diretamente relacionada aos teores de macronutrientes, principalmente carboidratos, que são os maiores contribuintes para o valor energético.

Os valores calóricos da polpa de *C. cainito* são comparáveis aos reportados na literatura, que variam de 67,2 a 89,32 kcal/100g (Doan & Le, 2020; Oranusi et al., 2015). A casca de *C. cainito* apresentou, em geral, um valor calórico mais elevado do que a polpa, o que se alinha com seus maiores teores de carboidratos e, em alguns estágios, proteínas e lipídios.

Em síntese, a casca de *C. cainito* demonstra um perfil nutricional distinto e mais denso em comparação com a polpa e outras frutas comumente consumidas, destacando-se pelos maiores teores de proteínas, e, dependendo do estágio, carboidratos e minerais.

Essa característica sublinha o potencial da casca como uma fonte subutilizada de nutrientes, o que pode ter implicações para o aproveitamento integral do fruto e o desenvolvimento de produtos alimentícios ou nutracêuticos.

As variações observadas na composição entre as diferentes amostras e partes do fruto reforçam a importância de considerar fatores como o estágio de maturação e as condições de cultivo ao avaliar o valor nutricional de *C. cainito*.

5.3 AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE ANTIOXIDANTE

5.3.1 Método DPPH

A análise dos dados revelou diferenças significativas na atividade antioxidante entre a casca e a polpa, conforme demonstrado pelos valores de IC50 em diferentes estágios de maturação (Tabela 3).

Tabela 3 - Atividade Antioxidante (IC50) da Casca e Polpa de *Chrysophyllum cainito* em Diferentes Estádios de Maturação pelos Métodos DPPH e ABTS

Estádio de maturação	IC50 DPPH (mg/mL)			IC50 ABTS (mg/mL)		
	Média	Desvio padrão		Média	Desvio padrão	
C1	0.12	± 0.01a		0.21	± 0.02a	
C2	0.16	± 0.01b		0.37	± 0.02b	
C3	0.11	± 0.01a		0.36	± 0.02b	
P1	0.24	± 0.02a		1.33	± 0.03a	
P2	0.71	± 0.09b		3.50	± 0.04b	
P3	1.38	± 0.12c		7.57	± 0.17c	

Médias seguidas por letras distintas em cada coluna são significativamente diferentes ($p < 0.050$) pelo teste ANOVA para amostras pareadas, seguido pelo teste *post-hoc* de Bonferroni.

C - Casca; P - polpa; 1 (verde); 2 (intermediária); 3 (madura)

A casca apresentou maior eficiência antioxidante de forma consistente. Essa superioridade é evidenciada pelos menores valores de IC50. Os estádios 1 e 3 exibiram a atividade mais alta ($0.12 \text{ mg/mL} \pm \text{DP } 0.01 \text{ mg/mL}$ e $0.11 \text{ mg/mL} \pm \text{DP } 0.01 \text{ mg/mL}$, respectivamente). Não houve diferença estatisticamente significativa na atividade antioxidante entre os estádios C1 e C3. Contudo, o Estádio 2 (C2) da casca mostrou uma redução na atividade antioxidante ($0,16 \pm \text{DP } 0,001 \text{ mg/mL}$), sendo estatisticamente diferente dos estádios 1 e 3, indicando uma dinâmica não linear dos compostos antioxidantes nesse tecido ao longo do amadurecimento.

Comparativamente, estudos prévios também evidenciam a capacidade antioxidante da casca do *Chrysophyllum cainito*. Dos Santos (2023) verificou que o extrato da casca de *C. cainito*, na concentração de $1000 \mu\text{g/mL}$, atingiu 65,64% de eficácia no teste DPPH, com um IC50 de $379,87 \mu\text{g/mL}$ (ou $0,37987 \text{ mg/mL}$).

Na polpa, o Estádio 1 (P1), apresentou a maior atividade antioxidante ($0,24 \pm \text{DP } 0,02 \text{ mg/mL}$). No entanto, houve um declínio acentuado e estatisticamente significativo na atividade antioxidante no Estádio 2 (P2) ($0,71 \pm \text{DP } 0,09 \text{ mg/mL}$). Essa tendência de declínio acentuou-se ainda mais no Estádio 3 (P3), que apresentou a menor atividade antioxidante ($1,38 \pm \text{DP } 0,12 \text{ mg/mL}$).

Todos os estádios da polpa foram estatisticamente diferentes entre si. Essa redução na eficiência pode ser atribuída à degradação ou consumo de compostos antioxidantes na polpa com o avanço da maturação, em detrimento do aumento de

açúcares e outras substâncias. Ainda que a polpa apresentou uma menor capacidade antioxidante que a casca, aquela se configura como uma importante fonte de antioxidantes. Luo et al. (2002) demonstraram uma elevada capacidade antioxidante, com um IC50 de 22 $\mu\text{g mL}^{-1}$ (ou 0,022 mg mL^{-1}) para a fração de acetato de etila do extrato metanólico do fruto inteiro.

Os resultados do presente estudo para a casca, particularmente nos estádios 1 e 3 (menores IC50), reforçam o seu potencial como fonte de antioxidantes, apresentando valores que, embora obtidos em condições específicas de extrato, são comparáveis à magnitude da atividade antioxidante reportada para outras frações ou extratos de *C. cainito* na literatura.

5.3.2 Método ABTS

A avaliação da atividade antioxidante pelo método ABTS, expressa em IC50 (Tabela 3), corrobora o padrão observado no ensaio de DPPH, com a casca apresentando maior capacidade antioxidante geral do que a polpa em todos os estádios de maturação.

Na casca, o Estádio 1 (C1) demonstrou a maior atividade antioxidante ($0,21 \pm \text{DP}0,02 \text{ mg/mL}$), sendo estatisticamente diferente dos estádios C2 e C3. Os estádios C2 ($0,370 \pm \text{DP}0,020 \text{ mg/mL}$) e C3 ($0,363 \pm \text{DP}0,015 \text{ mg/mL}$) não apresentaram diferença estatística significativa entre si, mas mostraram uma atividade antioxidante significativamente menor (maiores IC50) em comparação com C1. Esse resultado sugere que a casca no estágio imaturo (C1) possui a maior concentração de compostos que reagem com o radical ABTS, e que essa atividade diminui nos estádios posteriores de maturação.

Para a polpa, observou-se um declínio progressivo e altamente significativo na atividade antioxidante à medida que o fruto amadureceu, indicando um aumento substancial nos valores de IC50. O Estádio 1 (P1) apresentou a maior atividade antioxidante ($1,33 \pm \text{DP}0,03 \text{ mg/mL}$), sendo estatisticamente diferente do Estádio 2 ($3,497 \pm \text{DP}0,035 \text{ mg/mL}$). Por sua vez, o Estádio 2 mostrou uma atividade significativamente maior que o Estádio 3 ($7,57 \pm \text{DP}0,17 \text{ mg/mL}$), que exibiu a menor atividade antioxidante (maior IC50). Esse padrão de redução da atividade antioxidante com o amadurecimento na polpa é consistente com mudanças na composição como resultado do desenvolvimento dos frutos. (Javiere et al., 2012)

Em comparação com os resultados de DPPH, os valores de IC50 para ABTS são geralmente maiores, o que é esperado e pode refletir as diferenças nas propriedades químicas dos radicais DPPH e ABTS, bem como a afinidade dos compostos antioxidantes presentes no extrato por cada um. Ambos os métodos, no entanto, concordam em apontar a casca como a parte do fruto com maior atividade antioxidante e em um estágio mais jovem (C1) com a maior capacidade de sequestro de radicais e um declínio acentuado dessa atividade na polpa com o avanço da maturação.

5.4 AVALIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO FITOQUÍMICA

5.4.1 Antocianinas

A análise do teor total de antocianinas monoméricas revelou diferenças significativas entre as amostras da casca e da polpa de *C. cainito.*, assim como variações notáveis dentro das próprias amostras (Tabela 4). De modo geral, as amostras da casca (C1, C2, C3) demonstraram teores de antocianinas substancialmente superiores em comparação com as amostras da polpa (P1, P2, P3).

Este padrão é largamente consistente com a literatura para diversas frutas, onde a casca, sendo a porção mais exposta à luz solar e atuando como uma barreira protetora contra estresses ambientais, frequentemente acumula maiores concentrações de pigmentos como as antocianinas (Giusti e Wrolstad, 2001; Lasota et al., 2024).

Tabela 4 - Concentração de Antocianinas na Casca e Polpa de *Chrysophyllum cainito* em Diferentes Estádios de Maturação

Estádio de Maturação	Antocianinas (mg/L de extrato)		
	Média	±	Desvio padrão
C1	2.42	±	0.08a
C2	10.39	±	0.50b
C3	26.91	±	0.40c
P1	0.47	±	0.04a
P2	3.48	±	0.18c
P3	2.98	±	0.17b

Médias seguidas por letras distintas em cada coluna são significativamente diferentes ($p < 0.050$) pelo teste ANOVA para amostras pareadas, seguido pelo teste *post-hoc* de Bonferroni.

C - Casca; P - polpa; 1 (verde); 2 (intermediária); 3 (madura)

Na casca, observou-se um aumento progressivo e estatisticamente significativo na concentração de antocianinas com o avanço da maturação. O Estádio 1 (C1) apresentou $2,42 \pm DP0,08$ mg/L, o Estádio 2 (C2) atingiu $10,39 \pm DP0,5$ mg/L, e o Estádio 3 (C3) alcançou $26,91 \pm DP0,40$ mg/L.

Este padrão reflete uma intensa síntese e acúmulo desses pigmentos, responsáveis pela coloração da casca, atingindo seu pico no estágio de maturação mais avançado. O aumento de cerca de 4 vezes do Estádio 1 para o Estádio 2 (de $\sim 2,4$ para $10,4$ mg/L), e de mais de 10 vezes do Estádio 1 para o Estádio 3 (de $\sim 2,4$ para $26,9$ mg/L), demonstra o significativo potencial de coloração e bioatividade da casca madura.

Na polpa, o padrão foi diferente: o Estádio 1 (P1) registrou $0,47 \pm DP0,04$ mg/L, o Estádio 2 (P2) atingiu $3,48 \pm DP0,18$ mg/L, e o Estádio 3 (P3) apresentou $2,98 \pm DP0,19$ mg/L. A polpa, portanto, apresentou um aumento inicial e estatisticamente significativo no Estádio 2, atingindo seu pico de antocianinas, seguido por um declínio também estatisticamente significativo no Estádio 3 em comparação com P2. Este comportamento sugere que, na polpa, as antocianinas podem ser degradadas, convertidas em outras formas ou diluídas por outros componentes do fruto em estádios mais avançados de maturação.

Em uma comparação geral, a casca de *C. cainito* revelou-se uma fonte significativamente mais rica em antocianinas do que a polpa em todos os estádios de maturação. O pico de antocianinas na casca no estágio 3 (C3 com $26,91 \pm DP0,4$ mg/L) foi substancialmente maior do que o pico na polpa (P2 com $3,48 \pm DP0,18$ mg/L). Isso é esperado, dado que esses pigmentos são os principais responsáveis pela intensa coloração roxa do fruto, concentrando-se predominantemente na parte externa.

Um estudo relevante, realizado por Chim-Chi et al. (2024), sobre o desenvolvimento de filmes de embalagem inteligente com antocianinas da casca do *C. cainito*, reportou um teor de antocianinas de $45,48 \pm 0,10$ mg/L para a casca. Embora o valor máximo encontrado no presente estudo para a casca madura (C3) seja numericamente inferior a este dado de referência, ele ainda representa uma concentração considerável de antocianinas na solução de leitura. A variação observada pode ser atribuída a diversos fatores, como diferenças na cultivar, nas condições edafoclimáticas de cultivo (luz solar, temperatura), e mesmo especificidades ao processo de extração e diluição da amostra antes da leitura.

Especificamente, a casca C3 (correspondente ao estágio mais maduro) representa uma oportunidade valiosa para a indústria de alimentos, tanto como uma fonte de corantes naturais vibrantes, que podem substituir aditivos sintéticos, quanto como um ingrediente em produtos nutracêuticos. Além disso, o consumo da casca de frutos maduros, que muitas vezes é descartada, poderia agregar valor nutricional e bioativo à dieta, promovendo a utilização integral do fruto e o desenvolvimento de novos produtos alimentícios ricos em antioxidantes.

5.4.2 Análise por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC)

A análise por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC) dos extratos de casca e polpa de *C. cainito* na concentração de 4mg/ml, nos diferentes estádios de maturação (Tabela 5) permitiu identificar e quantificar diversos compostos fenólicos e flavonoides, avaliando suas dinâmicas ao longo da maturação.

Dentre os investigados (ácido gálico, ácido ferúlico, ácido cinâmico, ácido clorogênico, ácido cafeico, taninos como ácido tânico, catequina e cianidina), apenas o ácido gálico foi confirmado em ambas as partes do fruto, e ácido ferúlico exclusivamente na casca. Os demais compostos não foram detectados.

Tabela 5 - Concentração de Ácido Gálico e Ácido Ferúlico na Casca e Polpa de *Chrysophyllum cainito* em Diferentes Estádios de Maturação por HPLC

	Composto	Tempo de Retenção (RT)	Concentração no Vial ($\mu\text{g/mL}$) ²	Status de Quantificação ³	Concentração no Extrato (mg/g) ¹
C1	Ácido Gálico	1,31–1,33 min	9,439	LQ	2,360 \pm 0,004a
	Ácido Ferúlico	5,05 min	1.593,89	LQ	398,473 \pm 16,929A
C2	Ácido Gálico	1,31–1,33 min	12,836	LQ	3,209 \pm 0,024b
	Ácido Ferúlico	5,05 min	1.390,57	LQ	347,641 \pm 3,707B
C3	Ácido Gálico	1,31–1,33 min	13,205	LQ	3,301 \pm 0,004c
	Ácido Ferúlico	5,05 min	1.550,91	LQ	387,676 \pm 0,816A
P1	Ácido Gálico	1,31–1,33 min	10,617	LQ	2,654 \pm 0,016a
P2	Ácido Gálico	1,31–1,33 min	4,948	LD	1,237 \pm 0,005b
P3	Ácido Gálico	1,31–1,33 min	5,206	LD	1,301 \pm 0,014b

1 Médias seguidas por letras distintas em cada coluna são significativamente diferentes ($p < 0.050$) pelo teste ANOVA para amostras pareadas, seguido pelo teste *post-hoc* de Bonferroni. Letras minúsculas indicam a significância para Ácido Gálico, e letras maiúsculas para Ácido Ferúlico.

2 Concentrações no vial calculadas a partir das áreas médias das triplicatas usando as respectivas curvas de calibração.

3 Status de Quantificação: **LQ** (Quantificável, acima do Limite de Quantificação), **LD** (Detectável, acima do Limite de Detecção mas abaixo do LQ), **ND** (Não Detectável, abaixo do Limite de Detecção). Os valores de LQ e LD para Ácido Gálico são 7,824 $\mu\text{g/mL}$ e 2,582 $\mu\text{g/mL}$, respectivamente. Para Ácido Ferúlico, são 10,847 $\mu\text{g/mL}$ e 3,579 $\mu\text{g/mL}$, respectivamente.

A presença de ácido gálico em frutos, na casca e polpa, é consistente com a literatura (Luo et al., 2002; Kubola et al., 2011). Na casca, suas concentrações aumentaram significativamente com o amadurecimento (C1: 2,360 \pm 0,004a mg/g; C2: 3,209 \pm 0,024b mg/g; C3: 3,301 \pm 0,004c mg/g), mantendo-se quantificáveis (LQ).

Na polpa, contudo, a concentração foi significativamente maior no estágio imaturo P1 (2,654 \pm 0,016a mg/g), diminuindo acentuadamente nos estádios P2

(1,237±0,005b mg/g) e P3 (1,301±0,014b mg/g), onde o ácido gálico tornou-se apenas detectável (LD). Essa dinâmica sugere metabolismo ou degradação do composto na polpa madura, aprofundando o conhecimento sobre o perfil fitoquímico do *C. cainito*.

O ácido ferúlico demonstrou distribuição altamente seletiva, sendo exclusivamente detectado e quantificado na casca em todos os estádios de maturação, e não na polpa. Na casca, a maior concentração foi em C1 (398,473±16,929A mg/g), com uma redução significativa em C2 (347,641±3,707B mg/g), seguida por um aumento em C3 (387,676±0,816A mg/g), atingindo patamares estatisticamente comparáveis a C1. Todas as concentrações na casca estiveram acima do LQ.

Em suma, a HPLC revelou uma notável diferenciação na composição e perfis de concentração de compostos fenólicos entre a casca e a polpa, com alterações dinâmicas e estágio-dependentes ao longo da maturação do *C. cainito*. A casca destaca-se como fonte primária de ácido ferúlico e um importante reservatório de ácido gálico nos estádios avançados, enquanto a polpa exibe um perfil distinto. Essas descobertas são valiosas para o entendimento da fitoquímica do *C. cainito* e para seu potencial aproveitamento industrial em diferentes estádios de desenvolvimento.

5.5 ATIVIDADE BIOLÓGICA

5.5.1 Avaliação da Citotoxicidade

Os extratos da casca e da polpa de *C. cainito* foram submetidos ao ensaio de viabilidade celular MTT para avaliar sua citotoxicidade em linhagens celulares *in vitro*. A atividade das enzimas desidrogenases mitocondriais permite avaliar a viabilidade das células por meio da conversão do sal de MTT em cristais de formazan. Quanto maior a redução do MTT, maior é a atividade mitocondrial, sendo este processo um indicativo direto da integridade celular (Mosmann, 1983).

Os resultados demonstraram ausência de citotoxicidade significativa em todas as concentrações avaliadas (50,0 µg/mL, 5,0 µg/mL e 0,5 µg/mL) e nas duas linhagens celulares testadas, RAW 264.7 e fibroblastos L929 (Figura 8 e 9)

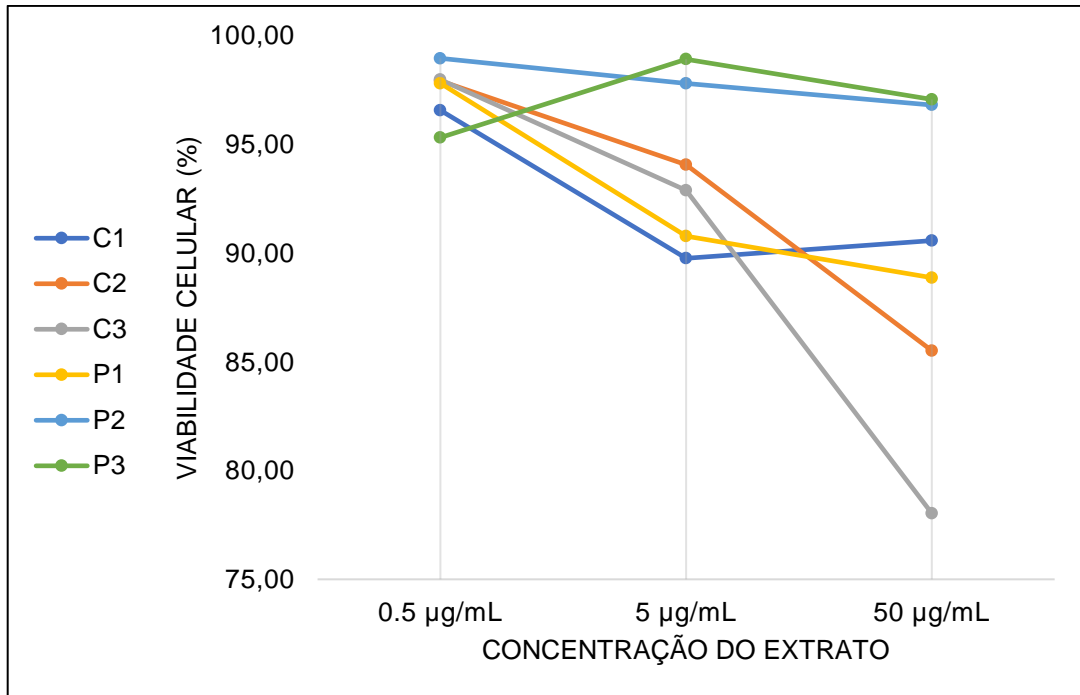


Figura 8 - Viabilidade Celular de Células RAW 264.7 Tratadas com Extratos de *Chrysophyllum cainito*

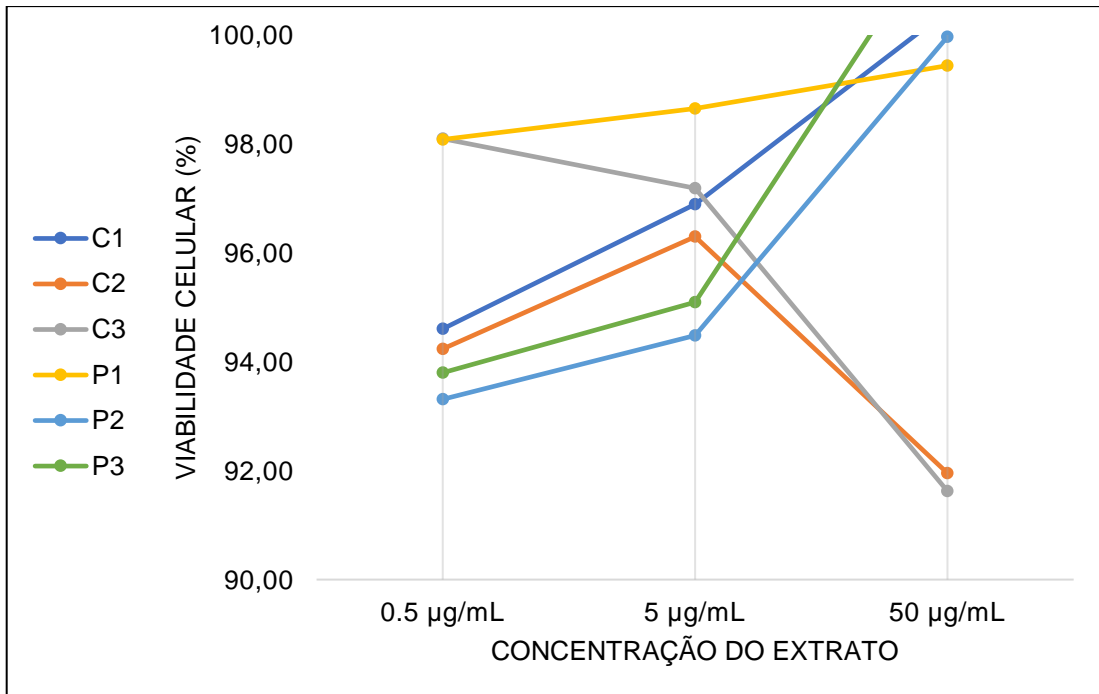


Figura 9 - Viabilidade Celular de Células Fibroblastos L929 Tratadas com Extratos de *Chrysophyllum cainito*

Para as células RAW 264.7, a viabilidade celular manteve-se consistentemente acima de 75% para a maioria dos extratos e concentrações, indicando um perfil de segurança favorável. Similarmente, nos fibroblastos L929, a viabilidade celular permaneceu em grande parte acima de 91%, reforçando a baixa toxicidade dos extratos. É importante notar que, mesmo na maior concentração (50,0 µg/mL), onde potenciais efeitos citotóxicos seriam mais pronunciados, a integridade e a atividade metabólica das células não foram comprometidas.

Consequentemente, esses achados sugerem que os extratos de *C. cainito* possuem um perfil de segurança celular promissor, validando seu potencial para aplicações biotecnológicas, nutracêuticas e alimentícias. A ausência de citotoxicidade nas concentrações avaliadas é um requisito fundamental para o desenvolvimento de produtos seguros para consumo humano e para aplicações terapêuticas, sem risco aparente de efeitos adversos às linhagens celulares avaliadas neste contexto.

5.5.2 Indução da Quinona Redutase e Atividade Quimiopreventiva de Câncer

A capacidade dos extratos da casca e da polpa de *C. cainito*., em seus diferentes estádios de maturação, de induzir a atividade da quinona redutase (QR), uma enzima de Fase II, foi avaliada em dois experimentos independentes, utilizando a concentração de 10 mg/mL. A indução de enzimas de Fase II, como a QR, é um importante marcador de atividade quimiopreventiva, visto seu papel na detoxificação de carcinógenos.

Os resultados obtidos revelaram um fator de indução igual a 1 para todos os extratos, indicando que a atividade da QR nas células tratadas foi equivalente à atividade nas células controle. Ou seja, a substância testada não induziu a produção ou a atividade da enzima quinona redutase nas condições específicas do experimento.

Essa ausência de alterações relevantes na atividade enzimática sugere que os compostos presentes nos extratos de *C. cainito* podem não atuar diretamente como indutores dessa enzima, ou que as concentrações e composições específicas, nas condições experimentais utilizadas, não foram suficientes para promover essa atividade. Consequentemente, por este método, os extratos não apresentaram atividade quimiopreventiva por via da indução de QR.

Esses dados apontam para a necessidade de investigações complementares para compreender melhor os mecanismos bioquímicos associados aos extratos de *C.*

cainito. Futuras pesquisas poderiam explorar diferentes concentrações e tempos de exposição, ou mesmo outras vias enzimáticas e mecanismos de quimioprevenção que não envolvam diretamente a indução da quinona redutase, visto o potencial bioativo do fruto em outras frentes.

6 CONCLUSÃO

Ao investigar as propriedades químicas e bioativas do fruto de *C. cainito*, este estudo demonstrou que as características do fruto variam significativamente em função do estágio de maturação e das suas partes, casca e polpa. A casca, em particular, destacou-se por apresentar um perfil fitoquímico superior, com maior teor de compostos fenólicos e antocianinas, o que lhe conferiu uma notável atividade antioxidante, especialmente nos estágios de maturação C1 (verde) e C3 (maduro). As análises revelaram a presença de ácido gálico tanto na casca quanto na polpa, enquanto o ácido ferúlico foi identificado exclusivamente na casca. A ausência de citotoxicidade significativa reforça a segurança do fruto independente do estágio de maturação, e embora não tenha sido observada atividade quimiopreventiva via indução de quinona redutase, os resultados confirmam o potencial funcional e nutracêutico do fruto, especialmente da casca, como recurso alimentar e tecnológico promissor e ainda subutilizado.

7 PERSPECTIVAS FUTURAS

Este estudo, ao preencher lacunas no conhecimento fundamental sobre *Chrysophyllum cainito*, abre novas e importantes avenidas para investigações futuras.

Considerando o notável potencial da casca, é saliente a necessidade de mais estudos focados especificamente nesta parte do fruto para elucidar plenamente suas propriedades e identificar e quantificar novos compostos bioativos, visando a aplicações específicas.

Além disso, futuras pesquisas poderiam incluir:

- Aprofundamento na identificação e quantificação de fitoquímicos específicos tanto na casca quanto na polpa por técnicas avançadas (como metabolômica). A validação dos potenciais antioxidantes, citoprotetores e outras atividades biológicas *in vitro* através de estudos *in vivo* é crucial para o avanço em aplicações de saúde.
- Estudos para otimizar métodos de extração e purificação para o aproveitamento industrial dos compostos bioativos da casca e polpa de *C. cainito*. Isso inclui a prospecção para a criação de ingredientes funcionais, corantes naturais, e formulações nutraceuticas ou farmacêuticas.
- Investigações sobre a viabilidade econômica e social da introdução do *C. cainito* em larga escala em sistemas agroalimentares, considerando seu potencial para a segurança alimentar e nutricional e o desenvolvimento regional sustentável.
- Investigar a otimização de sistemas de cultivo para *C. cainito* visando maximizar a produção e o acúmulo de compostos de interesse. Paralelamente, o desenvolvimento de tecnologias de pós-colheita que preservem a qualidade nutricional e a estabilidade dos compostos bioativos em diferentes estádios de maturação é fundamental para a viabilidade comercial.

REFERÊNCIAS

Alves-Araújo, Anderson et al. (2020). *Chrysophyllum cainito* L. In *Jardim Botânico do Rio de Janeiro, Catálogo Virtual de Plantas do Brasil - Flora do Brasil 2020*.

Recuperado em 28 julho, 2025 de:

<https://floradobrasil2020.jbrj.gov.br/FB87883>

Aurino, A. N. B.; Ribeiro, D. F.; Gomes, P. D. F.; Silva, J. A. O.; Silva, D. E. A. (2024).

Plantas alimentícias não convencionais: segurança alimentar e nutricional para o desenvolvimento sustentável no Semiárido brasileiro? *Flovet – Boletim do Grupo de Pesquisa da Flora, Vegetação e Etnobotânica*, 2(13), e2024013.

Recuperado em 28 julho, 2025 de:

<https://www.researchgate.net/publication/385895582>

Bar-Yaakov, I.; Ben-Moshe, M.; Ben-Ari, J.; Amir, R.; Holland, D. (2019a). Primary Metabolites, Anthocyanins, and Hydrolyzable Tannins in the Pomegranate Fruit. *Frontiers in Plant Science*, 10, p. 620. Recuperado em 28 julho, 2025 de: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00620/full>

Bar-Yaakov, I.; Ben-Moshe, M.; Ben-Ari, J.; Amir, R.; Holland, D. (2019b). Chemical composition and antioxidant activity of pomegranate peel, pulp and seed extracts from different cultivars. *Food Science and Biotechnology*, 28(4), pp. 1097–1104. Recuperado em 28 julho, 2025 de: <https://doi.org/10.1590/fst.29420>

Bobbio, P. A. & Bobbio, F. O. (2001). *Química do Processamento de Alimentos*. 3ª Ed. Editora Livraria Varela. São Paulo, Brasil.

Bramont, W. B.; Alves, P. P. D. S.; Souza, B. B. S.; Silva, L. V. G. S.; Sales, A. L.; Dias, F. A. (2018). Comparação da composição centesimal, mineral e fitoquímica de polpas e cascas de dez diferentes frutas. *Revista Virtual de Química*, 10(4), pp. 811–823. Recuperado em 28 julho, 2025 de: <http://static.sites.sbq.org.br/rvq.sbq.org.br/pdf/BramontNoPrelo.pdf>

Carvalho, D. B.; Santos, V. N.; Diniz, D. P.; Reis, P. F.; Costa, V. V.; Oliveira, A. L. (2020). Caracterização da composição nutricional e do teor de pigmentos de pitanga (*Eugenia uniflora* L.) nas variedades vermelha e roxa. *Brazilian Journal of Development*, 6(10), pp. 79187–79201. Recuperado em 28 julho, 2025 de: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/14976/123>
64

Chim-Chi, Y. A.; Chi-Canul, R. J.; Ocampo-López, R. J.; Aguilar-Castillo, E. M. (2024). Desenvolvimento de filmes de embalagem inteligentes indicadores de pH com antocianinas da casca da maçã estrela roxa (*Chrysophyllum cainito* L.). *Revista de Medição e Caracterização de Alimentos*, 18, pp. 2651–2660. Recuperado em 28 julho, 2025 de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11694-023-02344-2>

Chitarra, M. I. F.; Chitarra, A. B. (2005). *Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio*. 2 ed. UFLA, Minas Gerais.

Doan, H. V.; Le, T. P. (2020). *Chrysophyllum cainito*: a tropical fruit with multiple health benefits. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2020, pp. 1–9. Recuperado em 28 julho, 2025 de:
<https://doi.org/10.1155/2020/7259267>

Doan, H. V.; Sritangos, P.; Iyara, R.; Chudapongse, N. (2020). *Chrysophyllum cainito* stem bark extract induces apoptosis in Human hepatocarcinoma HepG2 cells through ROS-mediated mitochondrial pathway. *PeerJ*, 8, e10168.

Dinkova-Kostova AT, Talalay P. 2010. NAD(P)H:quinone acceptor oxidoreductase 1 (NQO1), 1 multifuncional antioxidant enzyme and exceptionally versatile cytoprotector. *Arch Bioch Bioph*, 501, pp. 116-123. Recuperado em 29 julho, 2025 de: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20361926/>

Dutra, V. O.; Costa, E. A. P.; Fraga, C. N. (2017). Flora do Espírito Santo: *Chrysophyllum* (Sapotaceae). *Rodriguésia*, 68(5), e68519. Recuperado em 28 julho, 2025 de: <https://peerj.com/articles/10168>

Enaru, B., Drețcanu, G., Pop, T. D., Stănilă, A., Diaconeasa, Z. (2021). Anthocyanins: Factors affecting their stability and degradation. *Antioxidants*, 10(12), pp. 1967. Recuperado em 01 agosto, 2025 de:
<https://doi.org/10.3390/antiox10121967>

Etienne, A.; Génard, M.; Lobit, P.; Vercambre, G. (2013). What controls fleshy fruit acidity? A review of malate and citrate accumulation in fruit cells. *Journal of Experimental Botany*, 64(6), pp. 1451–1469. Recuperado em 28 julho, 2025 de: <https://doi.org/10.1093/jxb/ert035>

Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO (1996). *World Food Summit: Rome Declaration on World Food Security and World Food Summit Plan of Action*. Recuperado em 28 julho, 2025 de: <https://www.fao.org/3/w3548e/w3548e00.htm>

Ferreira, F. V.; Lima, T. M.; Melo, G. V. C.; Costa, L. J. C.; Costa, S. T.; Carvalho, L. V. (2022). Atributos de qualidade, compostos bioativos e atividade antioxidante de frutos de uvaieira durante a maturação. *Revista Agrarian*, 15(57), pp. 341–355. Recuperado em 28 julho, 2025 de: <https://ojs.ufgd.edu.br/agrarian/article/view/8684/5903>

Flora e Funga do Brasil. (s.d.). *Chrysophyllum cainito* L. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Recuperado em 28 julho, 2025 de: <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/listaBrasil/FichaPublicaTaxonUC/FichaPublicaTaxonUC.do?id=FB87883>

Giusti, M. M. e Wrolstad, R. E. (2001). Characterization and Measurement of Anthocyanins by UV-Visible Spectroscopy.. In R. E. Wrolstad (Ed.), *Current Protocols in Food Analytical Chemistry* (Unidade F1.2). John Wiley & Sons.

Recuperado em 28 julho, 2025 de:

<https://currentprotocols.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/0471142913.faf0102s00>

Gomes, B. B.; Jesus, M. O.; Costa, G. F.; Dias, T. P. M.; Farias, K. B. C.; Souza, M. V. (2022). Health effects of anthocyanins: a systematic review.. *Research, Society and Development*, 11(4), e6411427069. Recuperado em 28 julho, 2025 de: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/27069>

Hegde, K.; Arathi, A. P.; Mathew, A. (2016). Evaluation of antidiabetic activity of hydro alcoholic extract of *Chrysophyllum cainito* fruits. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 7(11), pp. 4422–4428. Recuperado em 28 julho, 2025 de: <https://ijpsr.com/bft-article/evaluation-of-antidiabetic-activity-of-hydro-alcoholic-extract-of-chrysophyllum-cainito-fruits/>

Instituto Adolfo Lutz. (2008). *Métodos físico-químicos para análise de alimentos*. São Paulo: 4 ed, São Paulo, Instituto Adolfo Lutz. Recuperado em 28 julho, 2025 de: https://www.academia.edu/31046624/AN%C3%81LISE_DE_ALIMENTOS_Instituto_Adolfo_Lutz

Kays, S. J. e Paull, R. E. (2018). *Postharvest biology and technology of fruits, vegetables, and Flowers*. 3 ed. CABI. Recuperado em 28 julho, 2025 de: <https://download.e-bookshelf.de/download/0000/5875/11/L-G-0000587511-0002361679.pdf>

Kelen, R. B., Santos, A. C. C., Pereira, C. C., & Schneider, P. (2015). Plantas alimentícias não convencionais (PANCS): Hortaliças espontâneas e nativas. UFRGS. Recuperado em 28 julho, 2025 de:
<https://www.ufrgs.br/viveiroscomunitarios/wp-content/uploads/2015/11/Cartilha-15.11-online.pdf>

Kubola, J., Siriamornpun, S. (2011). Phytochemicals and antioxidant activity of different fruit fractions (peel, pulp, aril and seed) of Thai gac (*Momordica cochinchinensis* Spreng). *Food Chemistry*, 127(3), pp. 1138–1145.
Recuperado em 28 julho, 2025 de:
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.01.115>

Lara, I. e Heredia, A. (2020). The fruit cuticle: structure, composition, and its role in fruit quality. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(19), pp. 3290-3306. Recuperado em 28 julho, 2025 de:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092552141300269X>

Lasota, M.; Zukowski, J.; Lasota, K.; Lasota, I.; Rzymowska, J.; Konieczny, P. (2024). Pulp or Peel? Comparative Analysis of the Phytochemical Content and Selected Cosmetic-Related Properties of *Annona cherimola* L., *Diospyros kaki* Thumb., *Cydonia oblonga* Mill. and *Fortunella margarita* Swingle Pulp and Peel Extracts Swingle. *Molecules*, 29(5), p. 1133. Recuperado em 28 julho, 2025 de:
<https://doi.org/10.3390/molecules29051133>

- Li, L. B.; Zhang, J.; Li, R. L. (2015). Fração polifenólica do extrato de *Chrysophyllum cainito* induz morte celular em células de osteossarcoma. *Bangladesh Journal of Pharmacology*, 10(4), pp. 972–979. Recuperado em 28 julho, 2025 de: <https://doi.org/10.3329/bjp.v10i4.24576>
- Liu, R. H. (2003). Health benefits of fruit and vegetables are from additive and synergistic combinations of phytochemicals. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 78(3), pp. 517S–520S. Recuperado em 28 julho, 2025 de: <https://doi.org/10.1093/ajcn/78.3.517S>
- Liu, R. H. et al. (2013). Dietary bioactive compounds and their health implications. *Journal of Food Science*, 78(Suppl. 1), pp. A18–A25. Recuperado em 28 julho, 2025 de: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12101>
- Luo, X. D.; Basile, M. J.; Kennelly, E. J. (2002). Antioxidantes polifenólicos dos frutos de *Chrysophyllum cainito* L. (maçã estrela). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(6), pp. 1377–1381. Recuperado em 28 julho, 2025 de: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jf011178n>
- Magalhães, B. E. A. e Santos, W. N. L. (2021). Estrutura química de flavonoides. In B. E. A. Magalhães & W. N. L. Santos, *Capacidade antioxidante e conteúdo fenólico de infusões e decocções de ervas medicinais* (Figura 2). Recuperado em 28 julho, 2025 de: https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Estrutura-quimica-de-flavonoides_fig2_351285132

Magalhães, Washington Luiz Esteves et al. (2018). *Método de determinação de concentrações não citotóxicas para avaliação da capacidade protetora da lignina contra danos ao DNA* (Comunicado Técnico, n. 427). Embrapa Florestas. Recuperado em 28 julho, 2025 de:
<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1104215/1/CT4271572final2.pdf>

Mao, J.-H.; Liu, C.-H.; Bu, P.-L. (2015). In Vitro, Ex Vivo and In Vivo Anti-hypertensive Activity of *Chrysophyllum cainito* L. Extract. *International Journal of Clinical and Experimental Medicine*, 8(10), pp. 17912–17921. Recuperado em 28 julho, 2025 de: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4694285/>

Marqui, S. R. (2007). *Estudo fitoquímico e busca de substâncias bioativas de Chrysophyllum flexuosum (Sapotaceae)*. Master's dissertation - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", SP. Repositório UNESP. Recuperado em 28 julho, 2025 de:
<https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/65b7ba43-0c4b-4121-b581-696ae535930d/content>

Martins, S.; Barreira, J. C. M.; Ferreira, I. C. F. R. (2016). Exemplo de ácidos fenólicos que se produzem naturalmente. In K. Suárez-Medina & E. D. Coy-Barrera, *Diversidad de los compuestos orgánicos bioactivos de origen natural: una singularidad manifestada por la plasticidade en el metabolismo secundario* (Figura 3). Recuperado em 28 julho, 2025 de:

https://www.researchgate.net/figure/Figura-3-Ejemplo-de-acidos-fenolicos-que-se-producen-naturalmente-Modificada-de-Martins_fig3_340616785

Mosmann, T. (1983). Rapid colorimetric assay for cellular growth and survival: application to proliferation and cytotoxicity assays. *Journal of Immunological Methods*, 65, pp. 55–63. Recuperado em 28 julho, 2025 de: [https://doi.org/10.1016/0022-1759\(83\)90303-4](https://doi.org/10.1016/0022-1759(83)90303-4)

Oliveira, B. G. de. (2015). *Perfil químico de manga Ubá (Mangifera indica L.) por espectrometria de massas de altíssima resolução e exatidão (FT-ICR-MS)*. Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Espírito Santo, ES. Repositório UFES. Recuperado em 28 julho, 2025 de: <https://repositorio.ufes.br/server/api/core/bitstreams/4b1f953b-b1ad-4880-a3d2-29b0e1af8080/content>

Oliveira, V. C. de; Moreira, J. J. S.; Lima, A. M. T.; Carvalho, L. V. (2022). Determinação do estágio de maturação de frutos. Trabalho apresentado no VIII ENAG e CITAG. Agron Food Academy. Recuperado em 29 julho, 2025 de: <https://doi.org/10.53934/9786585062046-70>

Oranusi, S. U.; Braide, W.; Umeze, R. U. (2015). Antimicrobial activities and chemical compositions of *Chrysophyllum cainito* (star apple) fruit. *Microbiology Research International*, 3(3), pp. 41–50. Recuperado em 29 julho, 2025 de: <https://www.researchgate.net/publication/319839838>

- Pigozzi, M. T.; Soares, J. A.; Lima, A. P. L.; Viana, B. F. (2020). Qualidade pós-colheita de banana revestida com álcool polivinílico e amido. *Brazilian Journal of Development*, 6(10), pp. 74637–74648. Recuperado em 29 julho, 2025 de: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n10-041>
- Prior, R. L. (2003). Oxygen radical absorbance capacity (ORAC): new horizons in food antioxidant research. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83(10), pp. 989–993. Recuperado em 29 julho, 2025 de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1756464614003971>
- Prochaska, H. J. e Santamaria, A. B. (1988). Direct measurement of NAD(P)H:quinone reductase from cell cultured in microtiter wells: a screening assay for anticarcinogenic enzymes inducers. *Analytical Biochemistry*, 169(1), pp. 328–336.
- Re, R.; Pellegrini, N.; Pannala, A.; Yang, M.; Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26(9–10), pp. 1231–1237. Recuperado em 29 julho, 2025 de: [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- Rodrigues, M. G.; de Oliveira, T. M.; Correia, R. T. P.; Matias, E. M.; da Silva, I. B. (2021). Avaliação físico-química da casca da banana (*Musa spp.*) *in natura* e desidratada em diferentes estádios de maturação. *Revista Ciência e Sustentabilidade*, 1(1), pp. 1–15. Recuperado em 29 julho, 2025 de:

<https://periodicos.ufca.edu.br/ojs/index.php/cienciasustentabilidade/article/view/211>

Sachini, R.; Smaniotto, L.; Schimitt, F. (2018). *Teores minerais na casca e polpa em frutos de cultivares de macieira*. Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC). Recuperado em 29 julho, 2025 de:

https://www.udesc.br/arquivos/cav/id_cpmenu/1318/TEORES_MINERAIS_RI_CARDO_SACHINI_RBF_COMPLETO_1581969611416_1318.pdf

Santos, R. dos (2023). Phytoconstituents, antioxidant and antiglycation activity of *Chrysophyllum cainito* L., *Hancornia speciosa* Gomes and *Plinia glomerata* Berg. fruits. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 95(2). Recuperado em 28 julho, 2025 de:

<https://www.scielo.br/j/aabc/a/3tMSGLS7n9Tm8QH5bKyx4vd/?lang=en>

Scherer, R. e Godoy, H. T. (2009). Antioxidant activity index (AAI) by the 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl method. *Food Chemistry*, 112(3), pp. 654–658. Recuperado em 29 julho, 2025 de:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0308814608007218>

Stefanello, C. L. e Rosa, C. S. (2012). Composición aproximada de las cáscaras de diferentes frutas. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 17(1), pp. 34–37.

Recuperado em 29 julho, 2025 de:

<https://www.redalyc.org/pdf/3826/382679028006.pdf>

Silva, A. P. da; Santos, C. P.; Ferreira, P. D. (2023). Obtenção de extratos vegetais de plantas medicinais e avaliação da atividade antibacteriana. *Revista Mundimago*, 6(1), pp. 1–10. Recuperado em 29 julho, 2025 de: <https://revistas.ifpr.edu.br/index.php/mundimaa/article/view/1852/1712>

Simão, S. (1998). *Manual de fruticultura*. Agronômica Ceres.

Souza, L. S. de; Souza, A. L. G.; Camargo, A. (2023). Phytoconstituents, antioxidant and antiglycation activity of *Chrysophyllum cainito* L., *Hancornia speciosa* Gomes and *Plinia glomerata* Berg. fruits. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 95(2). Recuperado em 29 julho, 2025 de: <https://www.scielo.br/j/aabc/a/3tMSGLS7n9Tm8QH5bKyx4vd/>

Tuler, A. C.; Peixoto, A. L.; Silva, N. C. B. da. (2019). Plantas alimentícias não convencionais (PANC) na comunidade rural de São José da Figueira, Durandé, Minas Gerais, Brasil. *Rodriguésia*, 70, e01142018. Recuperado em 29 julho, 2025 de: <https://www.scielo.br/j/rod/a/t6QpNtZ8dcwsLzZsSPCXhSg/?lang=pt>

Watt, B. K. e Merrill, A. L. (1963). *Composition of foods: raw, processed, prepared* (Agriculture Handbook, no. 8). Consumer and Food Economics Research Division, Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture.

World Health Organization - WHO. (2018). Noncommunicable diseases fact sheet.

Recuperado em 29 julho, 2025 de: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/noncommunicable-diseases>

Yahia, E. M. e Gutierrez-Orozco, F. (2011). Star apple (*Chrysophyllum cainito* L.). In

E. M. Yahia (Ed.), *Biologia e Tecnologia Pós-Colheita de Frutas Tropicais e Subtropicais*. Woodhead Publishing. pp. 392–398. Recuperado em 29 julho, 2025 de:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780857090904500196>

Zheng, Y.; Wang, Z.; Zhang, J.; Li, S. (2022). Response of Tomato Sugar and Acid Metabolism and Fruit Quality under Different High Temperature and Relative Humidity Conditions. *Phyton – Journal of Experimental Botany*, 91(9).

Recuperado em 29 julho, 2025 de:

<https://www.techscience.com/phyton/v91n9/47710/html>