



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS - UFAM
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO - PROPESP
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS -
PPGCEM

BRENDY PABLO RIBEIRO DA SILVA

NANOENCAPSULAMENTO DE VITAMINA C OBTIDA DE SUCO DE CAMU-CAMU
(*Myrciaria dubia*) CONCENTRADO POR NANOFILTRAÇÃO: ESTUDO DA
ESTABILIDADE, LIBERAÇÃO CONTROLADA E POTENCIAL DE APLICAÇÃO
TECNOLÓGICA

MANAUS/AM

2026

BRENDOPABLO RIBEIRO DA SILVA

**NANOENCAPSULAMENTO DE VITAMINA C OBTIDA DE SUCO DE CAMU-CAMU
CONCENTRADO POR NANOFILTRAÇÃO: ESTUDO DA ESTABILIDADE,
LIBERAÇÃO CONTROLADA E POTENCIAL DE APLICAÇÃO TECNOLÓGICA**

Dissertação apresentada como requisito para à
obtenção do título de mestre em Ciência e
Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-
Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais
– PPGCEM da Universidade Federal do
Amazonas – UFAM.

Orientador: Prof. Dr.Lizandro Manzato

Ficha Catalográfica

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

-
- S586n Silva, Brendo Pablo Ribeiro da
 Nanoencapsulamento de vitamina c obtida de suco de camu-camu
 (Myrciaria dubia) concentrado por nanofiltração: estudo da estabilidade,
 liberação controlada e potencial de aplicação tecnológica / Brendo Pablo
 Ribeiro da Silva. - 2026.
 80 f. : il., color. ; 31 cm.
- Orientador(a): Lizandro Manzato.
 Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa
 de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Manaus, 2026.
1. Camu-Camu. 2. Nanofiltração. 3. Encapsulação. 4. Nanocápsulas. 5.
 Polimeros Biodegradáveis. I. Manzato, Lizandro. II. Universidade Federal
 do Amazonas. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de
 Materiais. III. Título
-

Toda a nossa ciência comparada com a realidade, é primitiva e infantil - e, no entanto, é a coisa mais preciosa que temos.
– Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

À vida e a tudo aquilo que, mesmo não sendo plenamente compreendido, me proporcionou força, equilíbrio e perseverança para seguir em frente. Ao longo desta caminhada, encontrei motivos para continuar mesmo nos momentos de incerteza e dificuldade. Sou profundamente grato pelas oportunidades, pelos aprendizados e por todas as circunstâncias que contribuíram para que eu pudesse concluir mais esta importante etapa da minha trajetória.

À minha mãe, por todo o amor, cuidado e apoio oferecidos ao longo dessa estrada da vida. Agradeço por ser meu alicerce e por estar sempre ao meu lado, proporcionando-me apoio moral, emocional e financeiro durante toda a minha trajetória acadêmica. Sua dedicação, seus esforços e sua confiança em mim foram fundamentais para que eu pudesse seguir em frente e alcançar este objetivo. Esta conquista também é sua.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Lizandro Manzato, por todas as oportunidades que me proporcionou ao longo desses anos, por acreditar em meu potencial e por contribuir de maneira tão significativa para minha formação acadêmica, profissional e pessoal. Agradeço por todo o conhecimento compartilhado, pela confiança depositada em mim, pela orientação e pelo incentivo constante durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, pela disponibilidade, atenção e dedicação na avaliação deste trabalho. Agradeço pelas valiosas considerações, sugestões e contribuições, que certamente foram fundamentais para o aprimoramento desta pesquisa e para meu crescimento acadêmico e profissional.

Ao Prof. Dr. Sidney Azevedo, ao Prof. Juliano Camurça e à Thalissa Rosário, por todo o apoio, disponibilidade e pelas valiosas contribuições para a realização deste trabalho, especialmente durante os experimentos desenvolvidos no Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais.

Aos colegas de laboratório Vitória Guedes, Marcela Cortez, Maria Tereza, Marcus Valério, André Ferreira e Willian Ribeiro, por toda a ajuda, direta ou indireta, pela troca de conhecimentos e pelos momentos compartilhados ao longo desta caminhada. A convivência, o companheirismo e a colaboração de vocês contribuíram para tornar o ambiente de trabalho mais acolhedor e agradável.

Aos animais comunitários do LSCN, Nana e Nano, por todo o carinho e afeto

proporcionados durante esses anos. Suas presenças tornaram os dias no laboratório mais leves, alegres e especiais, principalmente nos momentos de maior cansaço e dificuldade.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Amazonas (PPGCEM/UFAM), pela oportunidade de aprimoramento acadêmico e científico, pelos conhecimentos adquiridos e por todas as experiências que contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional ao longo do mestrado.

Ao Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais do Instituto Federal do Amazonas (LSCN/IFAM), por disponibilizar a infraestrutura, os equipamentos e o suporte necessários para a realização desta pesquisa. Durante esses dois anos, o laboratório tornou-se minha segunda casa, sendo um espaço de aprendizado, convivência e crescimento. Sem a estrutura e o acolhimento oferecidos, a conclusão deste trabalho não teria sido possível.

Ao Centro Multiusuário para Análise de Fenômenos Biomédicos da Universidade do Estado do Amazonas (CMABio/UEA), pela parceria e pelo acesso à infraestrutura e aos equipamentos utilizados na obtenção das micrografias que integraram e contribuíram para a caracterização das amostras deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior — Brasil (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado e pelo apoio financeiro ao desenvolvimento desta pesquisa.

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

Por fim, expresso minha sincera gratidão a todas as pessoas que, de alguma maneira, contribuíram para que esta pesquisa fosse realizada e para que esta importante etapa da minha vida fosse concluída. Cada gesto de apoio, palavra de incentivo, conhecimento compartilhado e ajuda recebida foi essencial ao longo desta trajetória.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo desenvolver e caracterizar sistemas de nanoencapsulamento contendo vitamina C proveniente do suco de camu-camu (*Myrciaria dubia*) concentrado por nanofiltração, visando aumentar sua estabilidade e avaliar sua liberação controlada. O suco foi submetido à nanofiltração em sistema de fluxo tangencial e, posteriormente, o extrato concentrado foi incorporado em formulações poliméricas à base de goma xantana e goma arábica, óleo de castanha-do-brasil e Tween 80, utilizando homogeneização de alta pressão. Inicialmente, foram avaliadas quatro formulações: xantana vazia, xantana contendo extrato, goma arábica vazia e goma arábica contendo extrato. Essas formulações foram caracterizadas por espalhamento dinâmico de luz, potencial zeta e microscopia eletrônica de transmissão, enquanto as formulações contendo extrato foram submetidas aos ensaios de fotoestabilidade. Entre as condições de nanofiltração avaliadas, a combinação de 14 bar e 400 rpm proporcionou aumento de 66,19% no teor de vitamina C. As formulações apresentaram diâmetros hidrodinâmicos médios entre 136,6 e 149,0 nm, situados na faixa submicrométrica. A formulação de xantana contendo extrato apresentou diâmetro hidrodinâmico médio de 136,6 nm, PDI de 0,212 e potencial zeta de -39,6 mV. As micrografias evidenciaram diferenças morfológicas e de dispersão entre os sistemas, com partículas visualmente mais homogêneas na formulação de xantana contendo extrato. Nos ensaios de fotoestabilidade, essa formulação apresentou o melhor desempenho entre os sistemas avaliados, mantendo 96,34% da vitamina C sob luz branca e 93,55% sob radiação ultravioleta. Considerando o desempenho global observado e o tempo disponível para a conclusão das análises, a formulação de xantana contendo extrato foi selecionada para as etapas posteriores do estudo. Assim, as análises por espectroscopia no infravermelho, a determinação da eficiência aparente de encapsulamento e o ensaio de liberação controlada foram conduzidos prioritariamente com essa formulação. O FTIR evidenciou bandas compatíveis com possíveis interações entre os constituintes do extrato e a matriz de xantana, sem comprovar isoladamente o encapsulamento. A eficiência aparente de encapsulamento foi estimada em $92 \pm 5\%$. Após 96 horas, a concentração detectada no meio receptor atingiu 57,08 mg/100 mL, correspondendo à liberação reportada de 9,30% pelo procedimento de cálculo original. Os resultados indicam que a formulação de goma xantana apresenta potencial para proteção e modulação da liberação da vitamina C do camu-camu, em alimentos funcionais, nutracêuticos e cosméticos, condicionado a estudos complementares de estabilidade, segurança e desempenho.

Palavras chave: Camu-Camu. Nanofiltração. Encapsulação. Nanocápsulas. Polímeros Biodegradáveis.

ABSTRACT

This study aimed to develop and characterize nanoencapsulation systems containing vitamin C from camu-camu (*Myrciaria dubia*) juice concentrated by nanofiltration, with the purpose of improving its stability and evaluating its controlled release. The juice was subjected to nanofiltration in a tangential-flow system, and the concentrated extract was subsequently incorporated into polymeric formulations based on xanthan gum and gum arabic, Brazil nut oil, and Tween 80 using high-pressure homogenization. Initially, four formulations were evaluated: blank xanthan gum, xanthan gum containing extract, blank gum arabic, and gum arabic containing extract. These formulations were characterized by dynamic light scattering, zeta potential, and transmission electron microscopy, whereas the extract-containing formulations were subjected to photostability assays. Among the nanofiltration conditions evaluated, the combination of 14 bar and 400 rpm resulted in a 66.19% increase in vitamin C content. The formulations showed mean hydrodynamic diameters ranging from 136.6 to 149.0 nm, within the submicrometric range. The xanthan gum formulation containing extract showed a mean hydrodynamic diameter of 136.6 nm, a PDI of 0.212, and a zeta potential of -39.6 mV. The micrographs revealed differences in morphology and dispersion among the systems, with visually more homogeneous particles in the xanthan gum formulation containing extract. In the photostability assays, this formulation showed the best performance among the evaluated systems, retaining 96.34% of vitamin C under white light and 93.55% under ultraviolet radiation. Considering the overall performance observed and the time available to complete the analyses, the xanthan gum formulation containing extract was selected for the subsequent stages of the study. Therefore, infrared spectroscopy, apparent encapsulation efficiency determination, and controlled release testing were primarily conducted using this formulation. FTIR analysis revealed bands consistent with possible interactions between the extract constituents and the xanthan gum matrix, without independently confirming encapsulation. The apparent encapsulation efficiency was estimated at $92 \pm 5\%$. After 96 hours, the concentration detected in the receptor medium reached 57.08 mg/100 mL, corresponding to the reported release of 9.30% according to the original calculation procedure. The results indicate that the xanthan gum formulation has potential for protecting and modulating the release of vitamin C from camu-camu in functional foods, nutraceuticals, and cosmetics, subject to further studies on stability, safety, and performance.

Keywords: Camu-Camu. Nanofiltration. Encapsulation. Nanocapsules. Biodegradable Polymers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fórmula estrutural do ácido L-ascórbico.....	16
Figura 2 - Camu-Camu (<i>Myrciaria dubia</i>).....	19
Figura 3 - Nanocápsula polimérica.....	27
Figura 4 - Polpa de camu-camu a -80 °C.	35
Figura 5 - Sistema de fluxo tangencial em operação.....	36
Figura 6 - Determinação de Tillmans realizada em triplicata	37
Figura 7 - Preparação das nanocápsulas poliméricas	38
Figura 8 - Homogeneização da pré-emulsão em alta pressão.	38
Figura 9 - Ensaio de liberação controlada da nanocápsula de xantana carregada com extrato de camu-camu	42
Figura 10 - Câmara de fotoestabilidade utilizada nos ensaios de fotoestabilidade	43
Figura 11 - Gráficos dos diâmetros das nanocápsulas de (A) Arábica Vazia, (B) Arábica carregada com extrato de camu-camu, (C) Xantana Vazia e (D) Xantana carregada com extrato de camu-camu.	47
Figura 12 - Gráficos de potencial zeta de (A) Arábica Vazia, (B) Arábica carregada com extrato de camu-camu, (C) Xantana Vazia e (D) Xantana carregada com extrato de camu-camu.	48
Figura 13 - Micrografias obtidas por MET das nanocápsulas de (A) xantana vazia, (B) xantana contendo extrato de camu-camu, (C) goma arábica vazia e (D) goma arábica contendo extrato de camu-camu.....	50
Figura 14 - Curva analítica do extrato de camu-camu (absorbância a 240 nm versus concentração do extrato).	52
Figura 15 - Espectros de FTIR das amostras: (a) nanocápsulas de xantana vazias; (b) nanocápsulas de xantana carregadas com extrato de camu-camu; e (c) extrato de camu-camu livre.	57
Figura 16 - Perfil de liberação das nanocápsulas contendo extrato de camu-camu. (A) Espectros de absorbância das amostras coletadas ao longo do ensaio de liberação controlada; (B) concentração de vitamina C liberada das nanocápsulas em função do tempo, em meio aquoso com pH ajustado para 5,0. 60	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condições operacionais aplicadas na nanofiltração do suco de camu-camu	36
Tabela 2 - Comparação entre o suco pré-tratado e o nanofiltrado nas condições avaliadas.....	44
Tabela 3 - Tamanho de Partícula, Potencial Zeta e Polidispersividade (PDI) das nanocápsulas de Xantana e Arábica obtidas pelo método de homogeneização de alta pressão.	46
Tabela 4 - Teor médio de vitamina C após exposição à luz branca.	53
Tabela 5 - Teor de vitamina C após exposição à radiação ultravioleta.	54
Tabela 6 - Principais grupos químicos encontrados nos espectros de FTIR do extrato de camu-camu, nanocápsulas carregadas com extrato de camu-camu e nanocápsulas vazias.	56

LISTA DE SIGLAS

(ζ) – Potencial zeta

ABTS – Azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfônico)

AOAC – Association of Official Analytical Chemists

CMABio - Centro Multiusuário para Análise em Fenômenos Biomédicos

DLS – Espalhamento dinâmico de luz (dynamic light scattering)

DPPH - 1,1-difenil-2-picrilhidrazila

EDTA – Ácido etilenodiamino tetra-acético

FRAP – *Ferric Reducing Antioxidant Power* (Poder Antioxidante Redutor do Ferro)

FTIR – Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier

GA – Goma Arábica

GX – Goma Xantana

HPLC – *High Performance Liquid Chromatography* (Cromatografia Líquida de Alta Eficiência)

IFAM - Instituto Federal do Amazonas

LSCN - Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais

MET – Microscopia Eletrônica de Transmissão

NF – Nanofiltração

ORAC – Oxygen Radical Absorbance Capacity (Capacidade de Absorção de Radicais de Oxigênio)

PCL – Poli(ϵ -caprolactona)

PDI – Índice de Polidispersão

PGA – Poli(ácido glicólico)

pH – Potencial Hidrogeniônico

PLA – Ácido polilático

PLGA – poli(ácido láctico-co-glicólico)

RPM – Rotação por minuto

SFT – Sistema por fluxo tangencial

TPP – tripolifosfato de sódio

TWEEN 80 – Polissorbato 80

UF – Ultra Filtração

UV - Ultravioleta

UV-Vis – Espectroscopia no Ultravioleta e Visível

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1 Vitamina C: Estrutura, Funções e Estabilidade	16
2.1.1 Estabilidade e Degradação.....	17
2.1.2 Estratégias de Estabilização.....	18
2.2 Camu-Camu (<i>Myrciaria dubia</i>).....	19
2.3 Nanofiltração Aplicada à Concentração de Compostos Bioativos	20
2.4 Princípios do Nanoencapsulamento e Sistemas Nanoestruturados.....	23
2.5 Polímeros Biodegradáveis Utilizados em Sistemas Nanoestruturados.....	25
2.5.1 Polímeros de Origem Natural e Sintéticos Biodegradáveis.....	25
2.6 Nanocápsulas Poliméricas: Características e Vantagens	27
2.7 Liberação Controlada e seus Mecanismos.....	29
2.8 Estabilidade das Formulações Nanoencapsuladas.....	31
3 PROBLEMATIZAÇÃO E HIPÓTESES.....	33
3.1 Hipóteses.....	33
4 OBJETIVOS.....	34
4.1.1 Objetivo Geral	34
4.1.2 Objetivos Específicos.....	34
5 METODOLOGIA.....	35
5.1 Recebimento e Pré-tratamento da polpa	35
5.2 Nanofiltração	35
5.3 Determinação da Vitamina C	36
5.4 Desenvolvimento das nanopartículas poliméricas.....	37
5.5 Caracterização das nanocapsulas.....	39
5.5.1 Tamanho, Índice de Polidispersão (PDI) e potencial zeta (ζ).....	39
5.5.2 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	39
5.5.3 Eficiência de Encapsulação (EE) por UV-Vis.....	40
5.5.4 Ensaio de Liberação Controlada.....	41
5.5.5 Ensaio de fotoestabilidade	42
5.5.6 Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET).....	43
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
6.1 Nanofiltração e Determinação da Vitamina C.....	44
6.2 Tamanho de Partícula, Índice de Polidispersão (PDI) e potencial zeta (ζ).....	45
6.3 Análise Morfológica e Estrutural das Nanopartículas	50
6.4 Análise de fotoestabilidade.....	52
6.5 Análise FTIR	56
6.6 Eficiência de Encapsulamento.....	58

6.7 Ensaio de Liberação controlada.....	60
7. APLICAÇÕES POTENCIAIS DOS SISTEMAS NANOENCAPSULADOS	63
8 CONCLUSÃO.....	66
9 REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	68

1. INTRODUÇÃO

O crescente interesse da indústria de alimentos, cosméticos e suplementos nutricionais por ingredientes naturais e funcionais tem impulsionado o desenvolvimento de formulações mais seguras, estáveis e eficazes. Entre os compostos mais valorizados nesse contexto está a vitamina C (ácido ascórbico), um micronutriente essencial ao organismo humano, que atua como antioxidante primário, cofator de reações enzimáticas e modulador de processos fisiológicos, como a síntese de colágeno, regeneração de tecidos, aumento da biodisponibilidade de ferro e proteção imunológica (Ravidran *et al.*, 2011; Avelino, 2018). No entanto, seu uso em formulações comerciais é limitado devido à sua elevada instabilidade físico-química. Fatores como exposição ao oxigênio, luz, pH elevado e temperaturas moderadas já são suficientes para induzir sua degradação oxidativa, com consequente perda de funcionalidade e eficácia terapêutica (Shen *et al.*, 2021).

O camu-camu (*Myrciaria dubia*), fruto amazônico amplamente estudado, destaca-se como uma das fontes naturais mais ricas em vitamina C, com concentrações que podem ultrapassar 2.000 mg/100 g de polpa fresca. Além disso, é uma excelente fonte de polifenóis, antocianinas e flavonoides, que, em sinergia com o ácido ascórbico, contribuem para sua potente atividade antioxidante (Yuyama, 2011; Aguiar *et al.*, 2015; Nascimento *et al.*, 2021). Apesar desse potencial, a industrialização do camu-camu ainda é limitada, principalmente em razão da perecibilidade do fruto e da instabilidade do seu principal composto bioativo.

Com o objetivo de preservar e concentrar a fração bioativa da vitamina C presente no camu-camu, a tecnologia de nanofiltração tem sido cada vez mais aplicada como alternativa aos métodos térmicos convencionais. A nanofiltração (NF) é um processo de separação por membranas com poros de diâmetro nanométrico, capaz de reter seletivamente compostos de baixo peso molecular (Ma *et al.*, 2020; Conidi *et al.*, 2020). Essa tecnologia pode ser utilizada em processos de sistema por fluxo tangencial (SFT), permitindo a obtenção de extratos concentrados em vitamina C com mínima degradação do composto, reduzindo o volume do extrato, aumentando sua estabilidade e mantendo suas propriedades funcionais (Soares *et al.*, 2019).

Além disso, a proteção e a liberação adequada de compostos bioativos, como a vitamina C, podem ser alcançadas por meio de estratégias de nanoencapsulamento. Essa tecnologia consiste na incorporação do composto ativo em uma matriz ou vesícula protetora com dimensões inferiores a 1.000 nanômetros, formando estruturas como nanopartículas, nanoemulsões, lipossomas ou micelas (Pateiro *et al.*, 2021). A nanoencapsulação apresenta diversas vantagens, como aumento da estabilidade frente a condições ambientais, mascaramento de sabor, melhora da biodisponibilidade e controle da taxa de liberação do ativo no organismo. No caso da vitamina C, estudos já demonstraram que sistemas nanoestruturados são capazes de proteger

significativamente o ácido ascórbico contra a oxidação, além de permitir a liberação gradual em meios simulados de digestão, elevando sua eficácia funcional (Romano *et al.*, 2024).

Diversos materiais têm sido utilizados como matrizes de encapsulamento, desde polímeros naturais, como goma xantana, goma arábica, quitosana e pectina, até sistemas lipídicos, como lipossomas e nanopartículas lipídicas sólidas, todos com capacidade variável de retenção, proteção e liberação do ativo. A escolha da tecnologia adequada depende de fatores como solubilidade, afinidade química, compatibilidade com o produto final e condições do processo (Zhao *et al.*, 2020; Ghosh; Outuki, 2016).

Dessa forma, a integração das tecnologias de nanofiltração e nanoencapsulamento representa uma abordagem moderna e sustentável para o aproveitamento integral do camu-camu como fonte de vitamina C concentrada e estabilizada. A combinação dessas duas estratégias permite, por um lado, a concentração seletiva e a preservação da fração ativa por membranas e, por outro, sua proteção e liberação dirigida por sistemas nanoestruturados, ampliando as possibilidades de aplicação do composto em alimentos funcionais, nutracêuticos e cosméticos.

A literatura indica ainda que o nanoencapsulamento de vitamina C pode resultar em ganhos significativos em termos de meia-vida do composto, redução de perdas por oxidação e aumento da biodisponibilidade. Em alguns estudos, a retenção do ácido ascórbico ultrapassou 80% após 30 dias de armazenamento em sistemas encapsulados, quando comparada às formas livres, que apresentaram perdas superiores a 50% no mesmo período (Yin *et al.*, 2022). Além disso, a aplicação de modelos cinéticos, como os de Higuchi e Korsmeyer-Peppas, permite descrever e prever com precisão o comportamento de liberação dos compostos ativos a partir de matrizes nanoestruturadas, auxiliando na projeção de formulações mais eficazes e funcionais.

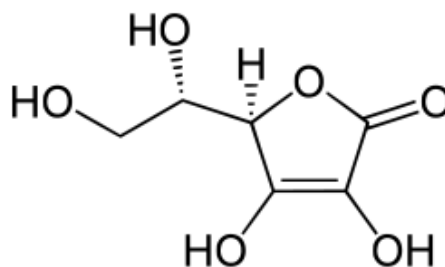
Dessa forma, este trabalho utilizou o suco concentrado de camu-camu, obtido por nanofiltração e rico em vitamina C, no desenvolvimento de sistemas de liberação controlada. A estabilidade físico-química do composto foi avaliada para identificar estratégias capazes de ampliar sua preservação e seu potencial de aplicação em alimentos funcionais, nutracêuticos e cosméticos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Vitamina C: Estrutura, Funções e Estabilidade

A vitamina C, também conhecida como ácido L-ascórbico, é um micronutriente essencial, hidrossolúvel e de baixo peso molecular, com massa molar de 176,13 g/mol (Langolis *et al.*, 2016), que desempenha diversas funções vitais na fisiologia humana. Sua estrutura, apresentada na Figura 1, corresponde a uma forma oxidada da glicose (C₆H₈O₆), sendo uma alfacetolactona constituída por seis átomos de carbono, que forma um anel lactônico de cinco membros e apresenta um grupo enediol bifuncional. Possui ainda um átomo de carbono assimétrico na posição 5, o que possibilita a existência de diferentes isômeros, sendo apenas a forma L-ascórbica biologicamente ativa (Jacob, 2003; Silva; Mejia, 2016).

Figura 1 - Fórmula estrutural do ácido L-ascórbico



Fonte: VANNUCCHI; ROCHA (2012).

O termo “ascórbico” tem origem no latim *scorbutus*, em referência à capacidade dessa vitamina de prevenir o escorbuto, uma doença carencial (Johnston, 2007). A maioria dos mamíferos sintetiza vitamina C no fígado a partir da glicose, por meio da enzima L-gulonolactona oxidase. Entretanto, humanos, primatas e algumas outras espécies não possuem essa enzima funcional, o que torna essencial a ingestão dietética de vitamina C (Bergmann, 2021).

As principais fontes alimentares de vitamina C incluem frutas e vegetais frescos, como acerola (941 mg/100 g), caju (219,3 mg/100 g), mamão (82,2 mg/100 g), goiaba (80,6 mg/100 g), morango (63,6 mg/100 g), laranja (53,7 mg/100 g) e brócolis (30 mg/100 g) (Universidade Estadual de Campinas, 2011). No organismo humano, a vitamina C é rigidamente regulada por mecanismos de absorção intestinal, acúmulo tecidual e reabsorção renal. Sua concentração plasmática atinge um limite de saturação com a ingestão oral, sendo o excesso eliminado pela urina (Advances in Nutrition, s.d.). Tecidos como o cérebro e as glândulas suprarrenais mantêm concentrações superiores a 1 mM, evidenciando a importância dessa vitamina para processos metabólicos essenciais (Silva *et al.*, 2022).

A vitamina C atua como cofator enzimático na hidroxilação da prolina e da lisina durante a síntese do colágeno, processo fundamental para a integridade dos tecidos conjuntivos. Também participa da biossíntese da carnitina e de neurotransmissores, como a norepinefrina, além de atuar

na mobilização e absorção do ferro (Schleicher *et al.*, 2009; Avelino, 2018). Desempenha ainda papel relevante no metabolismo do ácido fólico, dos aminoácidos, do colesterol e da glicose, bem como exerce potente função antioxidante, reduzindo espécies reativas de oxigênio (ROS) e regenerando outros antioxidantes, como o alfa-tocoferol, também conhecido como vitamina E (Padayatty *et al.*, 2003; Nwose *et al.*, 2008).

Embora a manifestação clássica da deficiência de vitamina C, o escorbuto, seja atualmente rara na maioria das regiões do mundo, investigações têm demonstrado uma associação significativa entre as concentrações séricas dessa vitamina e a prevenção ou o desenvolvimento de diversas enfermidades (Grosso *et al.*, 2013).

Evidências científicas apontam que a vitamina C pode contribuir para a modulação do perfil lipídico, a redução da rigidez arterial e a melhora da função endotelial, sustentando a hipótese de seu envolvimento nos processos fisiopatológicos relacionados às doenças cardiovasculares (Moser; Chun, 2016).

Adicionalmente, o consumo adequado de vitamina C tem sido objeto de estudos voltados à prevenção de diferentes condições clínicas, como acidentes vasculares cerebrais, distúrbios neurológicos, alterações do humor e neoplasias específicas, incluindo aquelas localizadas na cavidade oral, laringe, esôfago e estômago (Langolis *et al.*, 2016; Tveden-Nyborg; Lykkesfeldt, 2013; Wang *et al.*, 2013).

2.1.1 Estabilidade e Degradação

Apesar de suas múltiplas funções, a vitamina C é altamente instável, termolábil e suscetível à oxidação, especialmente quando se encontra em solução aquosa e é exposta ao oxigênio, à luz, ao calor, ao pH alcalino e a íons metálicos (Silva *et al.*, 2022). A oxidação do ácido ascórbico leva inicialmente à formação do ácido deidroascórbico e, posteriormente, à formação de produtos de degradação irreversíveis, como o ácido 2,3-diceto-L-gulônico, principalmente em temperaturas superiores a 25 °C e valores de pH acima de 7 (Shen *et al.*, 2021). A velocidade de degradação pode dobrar a cada aumento de 10 °C na temperatura, sendo que temperaturas entre 50 e 60 °C podem degradar mais de 50% do composto em menos de 30 minutos (Munyaka *et al.*, 2010).

Além disso, a fotodegradação induzida pela luz visível e pela radiação ultravioleta contribui significativamente para a instabilidade do composto. A presença de metais de transição, como Fe^{2+} e Cu^{2+} , acelera o processo oxidativo por meio de reações que favorecem a formação de radicais livres, os quais perpetuam os ciclos de oxidação (Shen *et al.*, 2021). Dessa forma, ambientes alcalinos, oxigênio dissolvido e metais com atividade catalítica constituem fatores que promovem a degradação acentuada do ácido ascórbico.

Em alimentos e bebidas, o controle do pH, preferencialmente abaixo de 4,5, e a utilização de agentes quelantes, como o EDTA, constituem estratégias empregadas para retardar essa

degradação (Agnihotri *et al.*, 2023). No contexto industrial, métodos convencionais de concentração e pasteurização podem expor a vitamina C a condições degradantes, especialmente durante o processamento de sucos de frutas, como o suco de abacaxi, ocasionando perdas superiores a 30%. O processamento por altas pressões e a ocorrência de reações de Maillard também podem contribuir para a redução do conteúdo de ácido ascórbico, dependendo das condições empregadas durante o processamento e o armazenamento (Abranches *et al.*, 2009; Bertin *et al.*, 2017).

2.1.2 Estratégias de Estabilização

Métodos de barreira física contra o oxigênio e a luz são essenciais para a preservação da vitamina C. O encapsulamento em estruturas nanométricas, denominado nanoencapsulação, é uma abordagem amplamente empregada, que consiste em incorporar ou revestir a vitamina C com matrizes poliméricas ou sistemas vesiculares, a fim de reduzir seu contato com o ambiente externo. Abbas *et al.* (2012) revisaram diversas técnicas de encapsulamento, como *spray drying*, *spray chilling*, leito fluidizado, lipossomas e extrusão, consideradas alternativas promissoras para a proteção do ácido ascórbico. Em estudos experimentais, Barra *et al.* (2019) prepararam micropartículas de vitamina C utilizando alginato de sódio e goma arábica por *spray drying*, obtendo eficiência de encapsulamento superior a 90% e elevada estabilidade térmica. Nessa formulação, a vitamina C permaneceu estável até aproximadamente 188 °C quando incorporada às micropartículas.

Outras formas de barreira física incluem a utilização de filmes constituídos por materiais cristalinos ou de revestimentos poliméricos aplicados aos alimentos, além de formulações lipossômicas utilizadas em produtos farmacêuticos, que protegem o ácido ascórbico da ação do oxigênio e da luz (Glíquem *et al.*, 2005). De forma complementar, biopolímeros como a goma xantana e a goma arábica têm sido explorados como matrizes para a encapsulação da vitamina C.

A goma xantana, especialmente quando combinada com proteínas como a lactoferrina, pode formar microcápsulas por coacervação complexa, atingindo eficiências de encapsulamento de até 83,19% e proporcionando proteção térmica durante pelo menos 30 dias de armazenamento em temperatura ambiente. Essas características podem viabilizar sua incorporação em alimentos processados, como pães e biscoitos (Cortines, 2019). A goma arábica, por sua vez, é frequentemente utilizada em combinação com a maltodextrina, permitindo a obtenção de partículas estáveis e ricas em vitamina C a partir de subprodutos da acerola. Esses sistemas podem apresentar boa retenção do composto bioativo durante o armazenamento e elevada bioacessibilidade em simulações gastrointestinais, inclusive quando incorporados a néctares (Rodrigues, 2017).

Essa tecnologia, associada ao emprego de lipossomas e polímeros encapsulantes,

constitui uma estratégia eficaz para prolongar a vida útil, preservar a estabilidade e maximizar a biodisponibilidade da vitamina C em matrizes alimentares e nutraceuticas (EMBRAPA, 2018).

2.2 Camu-Camu (*Myrciaria dubia*)

O camu-camu (*Myrciaria dubia*) (Figura 2) é uma espécie nativa da região amazônica, amplamente encontrada às margens de rios e igarapés. Seus frutos são pequenas bagas arredondadas, de coloração avermelhada quando maduras, altamente perecíveis e reconhecidas pelo elevado teor de vitamina C. Em termos quantitativos, o camu-camu pode apresentar concentrações de ácido ascórbico superiores a 6.000 mg/100 g de polpa fresca, o que o posiciona entre as fontes naturais mais ricas desse nutriente no mundo, superando frutas tradicionalmente reconhecidas por esse conteúdo, como a acerola e o kiwi (Yuyama, 2011; Aguiar *et al.*, 2015; Nascimento *et al.*, 2021). Além da vitamina C, o camu-camu constitui uma importante fonte de compostos fenólicos, antocianinas, flavonoides e ácidos orgânicos, os quais, em conjunto, conferem ao fruto elevada atividade antioxidante (Silva, 2022).

Figura 2 - Camu-Camu (*Myrciaria dubia*).



Fonte: Autor, 2024.

A composição fitoquímica do camu-camu está relacionada a diversos fatores, incluindo as condições ambientais de cultivo, o estágio de maturação e a forma de processamento. Durante o amadurecimento, ocorre uma redução natural do teor de vitamina C, acompanhada pelo aumento relativo dos teores de açúcares, o que modifica o perfil sensorial do fruto. Esse comportamento reforça a importância de realizar a colheita e o processamento no estágio adequado de maturação, a fim de preservar ao máximo seus compostos bioativos (Ribeiro, 2012). Do ponto de vista nutricional, além da vitamina C, o fruto também fornece quantidades relevantes de potássio, cálcio, ferro e fósforo, contribuindo para a ingestão de micronutrientes essenciais (Gonçalves, 2012).

O elevado teor de compostos antioxidantes confere ao camu-camu propriedades funcionais que vêm sendo investigadas em diferentes modelos experimentais. Sua atividade antioxidante tem sido avaliada principalmente por meio de ensaios *in vitro*, como DPPH, ABTS e

ORAC, nos quais os extratos do fruto demonstram elevada capacidade de neutralização de radicais livres (Prado, 2017; Nascimento *et al.*, 2021). Em estudos *in vivo*, há evidências de que a suplementação com extratos de camu-camu pode reduzir marcadores de estresse oxidativo, como o malondialdeído (MDA), além de promover a modulação de enzimas antioxidantes endógenas, como a superóxido dismutase (SOD) e a glutathione peroxidase (GPx) (Gonçalves, 2012). Essas propriedades tornam o camu-camu um candidato promissor para o desenvolvimento de alimentos funcionais e suplementos com atividade antioxidante.

A instabilidade da vitamina C presente no camu-camu, contudo, representa um dos principais entraves para sua aplicação industrial. A sensibilidade ao calor, ao oxigênio e à luz durante os processos de extração, concentração e armazenamento compromete a preservação desse nutriente, tornando necessária a adoção de tecnologias capazes de proteger e estabilizar os compostos bioativos do fruto. Nesse sentido, métodos como a nanofiltração e o nanoencapsulamento surgem como alternativas promissoras para contornar essas limitações, permitindo a obtenção de extratos mais concentrados e estáveis.

A aplicação industrial do camu-camu ainda é incipiente no Brasil, embora o fruto já seja utilizado em outros países amazônicos, como o Peru, na elaboração de suplementos, bebidas energéticas e cápsulas nutracêuticas (Nascimento *et al.*, 2021). A escassez de estudos voltados ao seu aproveitamento tecnológico, aliada à ausência de estratégias eficientes para conservar sua qualidade nutricional, limita sua inserção no mercado nacional de alimentos funcionais. Dessa forma, iniciativas de pesquisa que associem o conhecimento sobre a composição do camu-camu às tecnologias emergentes de processamento representam um avanço significativo, tanto do ponto de vista acadêmico quanto da inovação industrial.

A valorização do camu-camu como insumo tecnológico e funcional está diretamente relacionada ao desenvolvimento de formas eficientes de estabilização e proteção de seus principais compostos bioativos. A integração de técnicas como a nanofiltração, destinada à concentração seletiva de vitamina C e polifenóis, e o nanoencapsulamento, voltado à proteção contra a degradação e à liberação controlada, oferece um modelo inovador e sustentável de aproveitamento do fruto. Esse modelo atende às exigências dos consumidores por produtos naturais e funcionais e contribui para a valorização dos recursos amazônicos, promovendo o desenvolvimento regional por meio da bioeconomia e da sustentabilidade.

2.3 Nanofiltração Aplicada à Concentração de Compostos Bioativos

A nanofiltração (NF) é uma técnica de separação por membranas capaz de reter seletivamente moléculas com massa molar entre aproximadamente 200 e 1.000 Da, sendo adequada para o processamento de compostos hidrossolúveis, como a vitamina C (Ma *et al.*, 2020).

Diferentemente dos processos térmicos de concentração, a NF pode operar em temperaturas moderadas, geralmente entre 20 e 40 °C, favorecendo a preservação de compostos termossensíveis (Conidi *et al.*, 2020). A configuração em fluxo tangencial reduz a polarização por concentração e o acúmulo de componentes na superfície da membrana, contribuindo para a manutenção do fluxo e para o aumento de sua vida útil (Arriola *et al.*, 2014). A separação é impulsionada pela pressão transmembrana, normalmente situada entre 5 e 30 bar, sem a necessidade de exposição do produto a temperaturas elevadas (Ma *et al.*, 2020).

A operação com escoamento tangencial, também denominada *crossflow*, é preferencialmente utilizada no processamento de sucos tropicais por minimizar a formação da camada de polarização e o acúmulo de sólidos na superfície da membrana, resultando em maior estabilidade do fluxo ao longo do processo (Soares *et al.*, 2019; Amorim *et al.*, 2021). Nesse sistema, a alimentação escoia paralelamente à superfície da membrana, promovendo o arraste contínuo de parte dos materiais depositados e reduzindo a intensidade da incrustação, denominada *fouling*. Embora o modelo de resistências em série seja utilizado para representar as diferentes resistências ao transporte através da membrana, o escoamento tangencial contribui para limitar o acúmulo progressivo de depósitos e melhorar o desempenho da separação (Cho; Ahn, 2018).

A NF destaca-se em relação a outras tecnologias de separação por membranas por apresentar características intermediárias entre a ultrafiltração (UF) e a osmose reversa (OR). Essa técnica combina elevada capacidade de separação com menor demanda energética quando comparada à OR, especialmente na retenção de íons divalentes e moléculas orgânicas de baixa massa molar (Mohammad *et al.*, 2015; Zhou *et al.*, 2015; Tul Muntha *et al.*, 2017). Essas características tornam os processos de NF potencialmente mais sustentáveis e economicamente viáveis, permitindo sua aplicação em áreas como o tratamento de águas residuais, a dessalinização e a produção de água potável (Zhou *et al.*, 2015).

Do ponto de vista operacional, a NF requer pressões inferiores às empregadas na osmose reversa, o que pode reduzir os custos operacionais e o desgaste dos equipamentos (Mohammad *et al.*, 2015; Zhou *et al.*, 2015). Em processos de dessalinização, por exemplo, a utilização da NF pode contribuir para a redução do consumo de energia e dos problemas relacionados à formação de incrustações, proporcionando processos mais eficientes e acessíveis (Zhou *et al.*, 2015).

Outro aspecto relevante está relacionado à resistência química das membranas modernas de NF. Produzidas a partir de diferentes materiais poliméricos e compósitos, essas membranas podem apresentar maior resistência a agentes químicos e menor suscetibilidade à incrustação, dependendo de sua composição e das características da alimentação. Essas propriedades podem resultar em maior durabilidade e redução dos custos de manutenção (Bargeman, 2021; Zhang *et al.*, 2023). Além disso, os avanços nas técnicas de fabricação, como a incorporação de nanomateriais e o desenvolvimento de revestimentos específicos, possibilitam ajustar a

seletividade e a permeabilidade das membranas de acordo com a aplicação desejada, superando algumas limitações das tecnologias convencionais (Bandeali *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2022).

Estudos demonstram que a NF pode reter eficientemente compostos bioativos presentes em polpas e sucos de frutas. Membranas comerciais, como a NF270, com massa molar de corte aproximada entre 200 e 300 Da, podem apresentar elevada rejeição de compostos de maior massa molar, incluindo determinados polifenóis. Arriola *et al.* (2014), em ensaios realizados com suco de melancia, relataram taxas de recuperação de compostos fenólicos superiores a 90%, demonstrando a aplicabilidade da NF na preservação de constituintes bioativos. Estudos realizados com suco de laranja também demonstraram retenção de vitamina C de até 95%, com perdas inferiores a 5% no permeado (Ma *et al.*, 2020). Entretanto, o desempenho da separação depende de fatores como o tipo de membrana, o pH, a composição iônica, a massa molar dos solutos e o conteúdo de sólidos totais da alimentação (Conidi *et al.*, 2020).

A temperatura das correntes do processo deve ser controlada para evitar reações químicas indesejadas, especialmente durante o processamento de extratos concentrados em vitamina C. Temperaturas inferiores a 25 °C podem contribuir para minimizar a degradação de compostos termossensíveis (Conidi *et al.*, 2020). Além disso, procedimentos periódicos de limpeza são necessários para remover os materiais depositados e recuperar o desempenho da membrana. Echavarría *et al.* (2011) observaram que ciclos de limpeza adequadamente conduzidos podem restaurar até 90% do fluxo inicial. A vida útil da membrana depende das condições de operação, da frequência de limpeza, da qualidade da alimentação e da intensidade do processo de incrustação (Conidi *et al.*, 2020).

A aplicabilidade industrial da NF abrange a produção de bebidas funcionais e de insumos destinados a formulações farmacêuticas e cosméticas, uma vez que a tecnologia pode favorecer a preservação das características sensoriais, da coloração e do perfil nutricional dos produtos (Sarbatly *et al.*, 2023). Em indústrias de sucos, a integração da NF ao processo produtivo pode reduzir a demanda energética em comparação com a evaporação térmica convencional (Ganorkar *et al.*, 2012). No processamento de sucos ricos em vitamina C, a NF pode contribuir para a retenção de compostos antioxidantes, a manutenção do pH e a redução da carga microbiana, atuando como uma etapa física de separação durante a produção (Bhattacharjee *et al.*, 2017).

Em relação à escalabilidade, os sistemas comerciais de NF podem ser constituídos por módulos com diferentes áreas de membrana e capacidades de processamento, permitindo sua utilização em produções de médio e grande porte. A modularidade desses sistemas facilita a expansão da capacidade de processamento conforme a demanda industrial, mantendo os custos relacionados ao volume processado (Echavarría *et al.*, 2011). Além disso, a compatibilidade com sistemas automatizados de limpeza no próprio equipamento, denominados *clean-in-place* (CIP), reduz a necessidade de operações manuais e contribui para a manutenção das condições higiênic-

sanitárias do processo (Conidi *et al.*, 2020).

Por fim, os avanços no desenvolvimento de membranas de NF têm possibilitado a obtenção de materiais com maior durabilidade, resistência química e tolerância a solventes orgânicos, ampliando as possibilidades de processamento de extratos contendo compostos hidrossolúveis e lipofílicos (Alfredo *et al.*, 2018). As pesquisas continuam direcionadas à otimização dos materiais das membranas, ao desenvolvimento de revestimentos anti-incrustantes e ao aperfeiçoamento das condições operacionais, consolidando a NF como uma plataforma tecnológica versátil para as indústrias de alimentos funcionais e nutracêuticos.

2.4 Princípios do Nanoencapsulamento e Sistemas Nanoestruturados

O nanoencapsulamento é uma técnica que permite a incorporação de compostos bioativos em sistemas nanoestruturados, proporcionando proteção contra fatores ambientais adversos e possibilitando a liberação controlada dos ativos. Essa abordagem tem ganhado destaque nas indústrias farmacêutica, alimentícia e cosmética devido à sua capacidade de melhorar a estabilidade, a biodisponibilidade e a eficácia de substâncias sensíveis, como a vitamina C (Pateiro *et al.*, 2021; Fuentes *et al.*, 2021).

O processo de nanoencapsulamento envolve a incorporação de substâncias ativas em partículas com dimensões nanométricas, geralmente inferiores a 1.000 nm. Essas estruturas podem ser classificadas como nanocápsulas ou nanoesferas, dependendo de sua organização interna. Nas nanocápsulas, o composto bioativo encontra-se associado a um núcleo envolvido por uma membrana ou parede polimérica, enquanto, nas nanoesferas, o ativo permanece disperso ou adsorvido em uma matriz contínua. Em ambos os casos, o sistema proporciona proteção ao composto e pode controlar sua liberação no organismo ou em meios específicos (Pateiro *et al.*, 2021).

O nanoencapsulamento apresenta diversas vantagens em relação às formas convencionais de incorporação e administração de compostos bioativos, constituindo uma tecnologia promissora para diferentes aplicações. Entre seus principais benefícios, destaca-se a proteção contra a degradação provocada por fatores ambientais, como luz, oxigênio, temperatura e condições extremas de pH, aumentando a estabilidade e a vida útil de compostos termossensíveis ou suscetíveis à oxidação (Pateiro *et al.*, 2021; Romano *et al.*, 2024).

Além disso, essa técnica pode possibilitar a liberação controlada e sustentada dos ativos, prolongando seus efeitos, reduzindo oscilações acentuadas de concentração e favorecendo sua utilização em formulações de liberação prolongada (Subramani *et al.*, 2020). Outro aspecto relevante é o aumento potencial da biodisponibilidade, uma vez que o tamanho nanométrico das partículas pode favorecer a dispersão, a solubilidade e a absorção dos compostos por diferentes vias, como oral, cutânea e nasal, além de facilitar sua interação com membranas biológicas (Pateiro *et al.*, 2021; Lu *et al.*, 2021). A versatilidade dos sistemas nanoencapsulados também permite

aplicações como o mascaramento de sabores e odores, a proteção de nutrientes durante o processamento e o armazenamento e a manutenção da estabilidade sensorial dos alimentos.

Os sistemas nanoestruturados utilizados no nanoencapsulamento podem ser classificados em diferentes categorias, dependendo da natureza do material encapsulante e do método de preparação. Entre os principais sistemas, destacam-se:

- **Nanocápsulas:** sistemas do tipo reservatório, compostos por uma estrutura vesicular com um núcleo oleoso ou aquoso contendo o composto ativo, envolto por uma membrana polimérica. Essa configuração proporciona proteção eficaz contra a degradação ambiental e promove liberação sustentada. São especialmente úteis para compostos lipofílicos, mas também podem incorporar substâncias hidrossolúveis em sua matriz aquosa (Subramani *et al.*, 2020; Lu *et al.*, 2021).
- **Nanopartículas poliméricas:** diferentemente das nanocápsulas, são estruturas do tipo matriz, nas quais o composto bioativo está disperso ou adsorvido ao longo de toda a matriz polimérica sólida. Essa configuração favorece uma liberação controlada, principalmente por difusão ou degradação do polímero, sendo útil em aplicações que requerem liberação prolongada e estabilidade térmica (Subramani *et al.*, 2020; Lu *et al.*, 2021).
- **Lipossomas:** vesículas esféricas compostas por uma ou mais bicamadas lipídicas, geralmente formadas por fosfolipídios. São altamente versáteis e capazes de encapsular compostos hidrofílicos (em seu núcleo aquoso) e lipofílicos (nas bicamadas lipídicas). Devido à sua biocompatibilidade e capacidade de fusão com membranas celulares, os lipossomas são amplamente utilizados nas indústrias farmacêutica e cosmética (Subramani *et al.*, 2020; Lu *et al.*, 2021).
- **Nanoemulsões:** sistemas coloidais formados por duas fases imiscíveis (geralmente óleo e água), dispersas de forma estável na presença de tensoativos. As gotículas da fase dispersa possuem tamanhos nanométricos, geralmente entre 20 e 200 nm. As nanoemulsões são particularmente úteis para veicular compostos lipofílicos e são reconhecidas por sua alta estabilidade cinética, transparência e capacidade de liberação rápida (Lu *et al.*, 2021).
- **Micelas poliméricas:** agregados auto-organizados de copolímeros anfifílicos, que formam estruturas com um núcleo hidrofóbico e uma coroa hidrofílica. São ideais para solubilizar e transportar compostos pouco solúveis em água, sendo altamente eficazes em ambientes fisiológicos, com potencial para aumentar a penetração em tecidos e prolongar a circulação sistêmica (Lu *et al.*, 2021).
- **Nanogéis:** redes poliméricas tridimensionais com elevada capacidade de absorção de água. Devido à sua flexibilidade e responsividade a estímulos externos, como pH e temperatura, os nanogéis têm sido explorados para liberação controlada em condições fisiológicas específicas. Sua aplicação é comum em terapias localizadas e sistemas inteligentes de liberação de fármacos (Lu *et al.*, 2021).

Cada um desses sistemas apresenta características específicas que influenciam diretamente na estabilidade, liberação e biodisponibilidade dos compostos encapsulados. A escolha do sistema mais adequado depende das propriedades físico-químicas do composto bioativo e da aplicação pretendida.

2.5 Polímeros Biodegradáveis Utilizados em Sistemas Nanoestruturados

A utilização de polímeros biodegradáveis tem se consolidado como uma estratégia relevante no desenvolvimento de sistemas nanoestruturados destinados à proteção e à liberação controlada de compostos bioativos. Esses materiais podem ser degradados em produtos de menor massa molar, geralmente biocompatíveis e passíveis de metabolização ou eliminação, o que favorece sua aplicação nas áreas farmacêutica, alimentícia, cosmética e biomédica (Biswas *et al.*, 2025). A biocompatibilidade e a versatilidade funcional desses polímeros ampliam suas possibilidades de utilização na produção de nanossistemas, como nanocápsulas, nanopartículas, nanogéis e outros veículos de liberação direcionada.

Os polímeros biodegradáveis são macromoléculas de origem natural ou sintética capazes de sofrer degradação por processos biológicos, como a ação de enzimas e microrganismos, ou por mecanismos físico-químicos associados à presença de água, à temperatura e às variações de pH. Durante esse processo, as cadeias poliméricas são fragmentadas, originando monômeros, oligômeros ou outros produtos de menor massa molar, que podem ser metabolizados, absorvidos ou eliminados pelo organismo, dependendo da natureza do material utilizado (Kamaly *et al.*, 2016; Lu *et al.*, 2021). Essa característica é especialmente importante quando o sistema nanoestruturado é destinado à aplicação *in vivo*, pois pode reduzir o risco de acúmulo prolongado de resíduos poliméricos nos tecidos (Idrees *et al.*, 2020).

2.5.1 Polímeros de Origem Natural e Sintéticos Biodegradáveis

Os polímeros naturais são amplamente utilizados por serem obtidos de fontes renováveis e, em geral, apresentarem baixa toxicidade e boa interação com sistemas biológicos (Kamaly *et al.*, 2016). Entre os principais polímeros naturais empregados no nanoencapsulamento, destaca-se a quitosana, que apresenta carga positiva em meio ácido, favorecendo a formação de complexos com polímeros aniônicos e a interação com membranas celulares, além de conferir propriedades mucoadesivas e bioadesivas aos sistemas desenvolvidos (Biswas *et al.*, 2025). O alginato de sódio, por sua vez, forma géis na presença de íons divalentes, como o cálcio, permitindo a encapsulação de compostos hidrossolúveis por métodos relativamente simples. Outros materiais, como goma arábica, gelatina e pectina, também são empregados devido às suas propriedades estabilizantes, gelificantes e de proteção, de acordo com as características desejadas para cada formulação

(Abourehab *et al.*, 2022).

A goma arábica (GA) e a goma xantana (GX) são polímeros naturais empregados como agentes encapsulantes devido à biocompatibilidade, às propriedades estabilizantes e à capacidade de formar matrizes protetoras, favorecendo a preservação de compostos sensíveis, como a vitamina C, contra a oxidação e a degradação térmica (Zhao *et al.*, 2020; Ghosh; Outuki, 2016). A GA apresenta estrutura altamente ramificada, constituída principalmente por frações de arabinogalactanas associadas a proteínas, o que lhe confere elevada solubilidade em água, baixa viscosidade em concentrações moderadas e propriedades emulsificantes. Essas características favorecem a encapsulação, o mascaramento de sabores e a estabilização de sistemas contendo fases aquosa e oleosa (Al-Hamayda *et al.*, 2023; Moradi *et al.*, 2018).

A GX, por sua vez, forma soluções viscosas e apresenta estabilidade em diferentes condições de pH e temperatura, contribuindo para o aumento da viscosidade da fase contínua e para a estabilidade cinética dos sistemas dispersos (Akkarachaneyakorn *et al.*, 2015; Jia *et al.*, 2024). A formação de uma matriz mais viscosa também pode reduzir a mobilidade molecular e limitar o contato do composto encapsulado com agentes oxidantes. A associação entre GA e GX em sistemas de coacervação, emulsificação ou *spray drying* pode melhorar a integridade estrutural das partículas e favorecer a retenção dos compostos bioativos durante o armazenamento (Fernandes *et al.*, 2023; Hu *et al.*, 2022). Nesses sistemas, a GA pode atuar principalmente na estabilização interfacial, enquanto a GX contribui para o aumento da viscosidade e o fortalecimento da matriz polimérica por meio de interações intermoleculares, como as ligações de hidrogênio. Essas propriedades podem favorecer a proteção e a liberação controlada da vitamina C em meio aquoso (Sari *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2025).

Em sistemas emulsificados, a utilização conjunta dessas gomas pode reduzir a liberação inicial rápida do composto, fenômeno conhecido como *burst effect*, além de contribuir para a proteção do ativo contra variações de pH e exposição à radiação ultravioleta (Espinoza *et al.*, 2021; Norhayati *et al.*, 2019). Em aplicações alimentícias e cosméticas, a GA e a GX também podem favorecer a estabilidade da vitamina C durante etapas de processamento, como *spray drying* e homogeneização em alta pressão, bem como durante o armazenamento do produto (Al-Hamayda *et al.*, 2023; Cheng *et al.*, 2024). Além disso, esses polímeros apresentam histórico de utilização em formulações alimentícias, o que favorece seu emprego no desenvolvimento de sistemas encapsulantes em escala industrial (Zhao *et al.*, 2020). Dessa forma, a utilização isolada ou combinada de goma arábica e goma xantana constitui uma estratégia promissora para aumentar a estabilidade, a eficiência de encapsulamento e o controle da liberação da vitamina C em matrizes alimentares e cosméticas.

Os polímeros sintéticos biodegradáveis, por sua vez, apresentam como vantagem a possibilidade de maior controle sobre sua composição química, suas propriedades físico-químicas e sua cinética de degradação. Entre os materiais mais utilizados estão o poli(ácido láctico) (PLA),

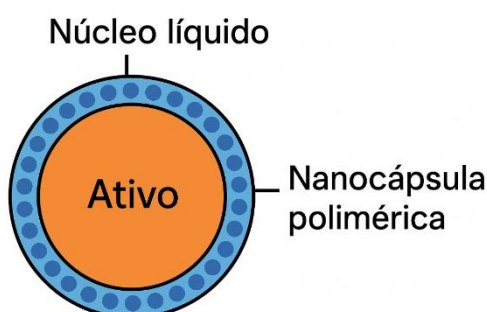
o poli(ácido glicólico) (PGA), o copolímero poli(ácido lático-co-ácido glicólico) (PLGA) e a poli(ϵ -caprolactona) (PCL) (Bhadran *et al.*, 2023). O PLA e o PLGA destacam-se pela processabilidade e pela ampla utilização em sistemas farmacêuticos, enquanto a PCL apresenta degradação mais lenta, sendo indicada para formulações destinadas à liberação prolongada de compostos ativos (Makadia *et al.*, 2011).

A escolha do polímero para a produção de sistemas nanoestruturados depende de diferentes fatores inter-relacionados. A natureza do composto bioativo, como sua hidrofiliicidade ou lipofiliicidade, influencia tanto a seleção do polímero quanto o método de encapsulamento empregado (Mora-Huertas *et al.*, 2010). As condições de estabilidade desejadas, incluindo resistência às variações de pH, à luz, ao oxigênio e à temperatura, também devem ser consideradas. Além disso, a via de administração, seja oral, dérmica ou injetável, requer propriedades específicas, como resistência ao ambiente gastrointestinal, mucoadesão ou capacidade de permeação. A biocompatibilidade, a biodegradabilidade e a segurança dos materiais constituem critérios fundamentais para aplicações *in vivo* (Mora-Huertas *et al.*, 2010; Ghezzi, 2021). Aspectos econômicos, viabilidade de produção em escala industrial, aceitação regulatória e impacto ambiental também devem ser avaliados. Em muitos casos, a associação de diferentes polímeros permite combinar propriedades complementares, favorecendo a obtenção de sistemas híbridos com maior estabilidade e liberação sustentada dos compostos encapsulados (Wang *et al.*, 2012).

2.6 Nanocápsulas Poliméricas: Características e Vantagens

As nanocápsulas poliméricas são sistemas coloidais vesiculares constituídos por uma membrana polimérica que envolve um núcleo, geralmente oleoso, no qual o composto bioativo pode estar dissolvido ou disperso, conforme representado na Figura 3 (Subramani *et al.*, 2020; Lu *et al.*, 2021).

Figura 3 - Nanocápsula polimérica.



Fonte – Autor, 2025.

Diferentemente das nanoesferas, nas quais o composto ativo pode estar dissolvido, disperso ou adsorvido em uma matriz polimérica contínua, as nanocápsulas apresentam organização do tipo reservatório. Nesse sistema, o ativo encontra-se dissolvido ou disperso em um núcleo, geralmente líquido ou oleoso, envolvido por uma parede polimérica que atua como barreira

protetora e reguladora da liberação (Lu *et al.*, 2021). Essa arquitetura confere às nanocápsulas características que favorecem sua aplicação nas áreas farmacêutica, cosmética e alimentícia, especialmente quando se busca proteger e controlar a liberação de compostos instáveis, como a vitamina C.

Do ponto de vista estrutural, as nanocápsulas poliméricas podem ser produzidas com polímeros naturais, sintéticos ou por combinações desses materiais. A composição da parede polimérica influencia diretamente o comportamento de liberação, a estabilidade coloidal, a taxa de degradação e a biocompatibilidade do sistema (Subramani *et al.*, 2020). A escolha do polímero está relacionada às propriedades físico-químicas do composto ativo, às características do meio de aplicação e à via de administração pretendida. Materiais como quitosana, alginato, poli(ácido láctico-co-ácido glicólico) (PLGA), poli(ϵ -caprolactona) (PCL) e poli(ácido láctico) (PLA) estão entre os mais utilizados devido às suas propriedades de biodegradabilidade e biocompatibilidade (Bhadran *et al.*, 2023; Biswas *et al.*, 2025).

Uma das principais vantagens das nanocápsulas poliméricas é sua capacidade de proteger compostos bioativos contra processos de degradação química e física. Substâncias como vitaminas, antioxidantes, enzimas e fármacos podem apresentar elevada instabilidade quando expostas a condições ambientais adversas, como oxigênio, luz, calor e variações de pH (Bańkosz, 2025). A estrutura vesicular das nanocápsulas pode reduzir o contato do ativo com esses agentes externos, retardando sua degradação prematura (Ataide *et al.*, 2023). Essa proteção é particularmente relevante para a vitamina C, cuja oxidação é favorecida em soluções aquosas, principalmente na presença de luz, oxigênio e traços de metais.

Além da proteção, as nanocápsulas possibilitam o controle da liberação do composto encapsulado. A taxa de liberação pode ser modulada por fatores como a espessura e a permeabilidade da parede polimérica, o tipo e a massa molar do polímero, o grau de reticulação, a presença de plastificantes e as condições do meio de liberação (Bańkosz, 2025). Em sistemas adequadamente formulados, podem ser obtidos perfis de liberação sustentada durante períodos prolongados, contribuindo para a manutenção da concentração do ativo, a redução da frequência de administração e o aumento de sua eficácia (González-Reza *et al.*, 2020). Essa característica também é vantajosa em produtos alimentícios e cosméticos funcionais, nos quais se busca uma liberação gradual do composto sem comprometer as propriedades sensoriais da formulação.

Outro benefício das nanocápsulas poliméricas é a possibilidade de modificação de sua superfície. Grupos químicos específicos, polímeros hidrofílicos ou ligantes biológicos podem ser incorporados à superfície das partículas, modificando sua interação com células, tecidos e barreiras biológicas (Subramani *et al.*, 2020). Essa estratégia tem sido investigada em sistemas de entrega direcionada de fármacos, especialmente em aplicações oncológicas, terapias gênicas e tratamentos anti-inflamatórios, nos quais a seletividade da liberação pode representar um diferencial terapêutico (Ataide *et al.*, 2023).

Estudos indicam que a encapsulação da vitamina C em sistemas poliméricos pode aumentar sua estabilidade, prolongar sua liberação e favorecer sua biodisponibilidade em comparação com o composto em sua forma livre (Zhang *et al.*, 2015). Além disso, a encapsulação pode reduzir o contato direto do ácido ascórbico com a mucosa gastrointestinal, contribuindo para o desenvolvimento de formulações orais potencialmente mais toleráveis (Bańkosz *et al.*, 2025). A utilização de polímeros mucoadesivos, como a quitosana, também pode aumentar o tempo de permanência das partículas na mucosa intestinal e favorecer a absorção do composto encapsulado (Baek *et al.*, 2021).

2.7 Liberação Controlada e seus Mecanismos

A liberação controlada de compostos bioativos constitui um conceito fundamental no desenvolvimento de sistemas nanoencapsulados. A modificação das características estruturais e físico-químicas desses sistemas permite regular a velocidade de liberação da substância encapsulada, proporcionando uma disponibilização gradual do ativo e, consequentemente, uma ação mais prolongada.

Os mecanismos envolvidos na liberação controlada podem ser descritos por meio de modelos matemáticos que relacionam a quantidade de composto liberado ao tempo. Esses modelos contribuem para a compreensão dos fenômenos de difusão, dissolução, erosão e degradação da matriz polimérica, permitindo avaliar o comportamento do sistema e selecionar formulações mais adequadas para cada aplicação.

A produção de nanopartículas poliméricas pode envolver a combinação de polímeros naturais ou sintéticos, tensoativos, compostos bioativos, solventes orgânicos e fases oleosas, de acordo com o método utilizado e com as características do ativo. Esses componentes devem formar sistemas capazes de proteger o composto encapsulado e modular sua liberação (Pulingam *et al.*, 2022). A escolha do polímero deve considerar suas propriedades físico-químicas, biocompatibilidade, biodegradabilidade e segurança dos produtos resultantes de sua degradação, com o objetivo de reduzir possíveis impactos toxicológicos e ambientais (Samir *et al.*, 2022).

Nanoprecipitação ou deslocamento de solvente: nesse método, uma fase orgânica contendo o polímero, o composto bioativo e, dependendo da formulação, óleo e tensoativo lipofílico é adicionada a uma fase aquosa contendo um surfactante, sob agitação. A rápida difusão do solvente orgânico para a fase aquosa promove a deposição interfacial do polímero e a formação espontânea das partículas. Parâmetros como a velocidade de adição da fase orgânica, a proporção entre as fases, a concentração dos componentes e a intensidade de agitação influenciam o tamanho médio e o índice de polidispersidade das partículas (Fessi *et al.*, 1989; Mora-Huertas *et al.*, 2010).

Emulsificação–difusão: essa técnica envolve inicialmente a formação de uma emulsão entre uma fase orgânica parcialmente miscível em água e uma fase aquosa. Posteriormente, a emulsão é diluída com água, promovendo a difusão do solvente orgânico e a precipitação do

polímero. Por fim, o solvente é removido e as partículas formadas são estabilizadas. Durante o processo, as gotículas da emulsão funcionam como estruturas precursoras para a formação das nanocápsulas (Mora-Huertas *et al.*, 2010; Grillo *et al.*, 2012; Pulingam *et al.*, 2022).

Emulsificação dupla: esse método é particularmente utilizado para a encapsulação de compostos hidrossolúveis. Inicialmente, forma-se uma emulsão água em óleo (A/O), na qual a fase aquosa contendo o ativo é dispersa em uma fase orgânica contendo o polímero e um tensoativo lipofílico. Em seguida, essa emulsão primária é dispersa em uma segunda fase aquosa contendo um tensoativo hidrofílico, originando uma emulsão água em óleo em água (A/O/A). Técnicas de homogeneização ou ultrassonicação podem ser empregadas para reduzir e uniformizar o tamanho das gotículas, influenciando a estabilidade e o diâmetro das partículas produzidas (Mora-Huertas *et al.*, 2010; Pulingam *et al.*, 2022; De *et al.*, 2024).

Coacervação por emulsão: o processo inicia-se com a formação de uma emulsão, geralmente do tipo óleo em água, seguida pela indução da coacervação por alterações de pH, temperatura, força iônica ou adição de um agente dessolvante. Essas modificações promovem a separação de uma fase rica em polímero e sua deposição ao redor das gotículas da emulsão. Posteriormente, pode ser realizada uma etapa de reticulação para aumentar a resistência mecânica e a estabilidade das partículas (Mora-Huertas *et al.*, 2010; Pulingam *et al.*, 2022).

Revestimento polimérico (*polymer coating*): consiste no contato de partículas previamente formadas com uma solução polimérica, permitindo a adsorção ou deposição de uma camada adicional sobre sua superfície. Esse revestimento pode modificar propriedades como carga superficial, estabilidade coloidal, mucoadesão, interação com membranas biológicas e perfil de liberação do ativo (Zhang *et al.*, 2011; Mora-Huertas *et al.*, 2010; Pulingam *et al.*, 2022).

Deposição camada por camada (*layer-by-layer*): baseia-se na adsorção sequencial de polieletrólitos com cargas opostas sobre a superfície das partículas. Cada etapa de deposição é normalmente seguida por uma etapa de lavagem, permitindo a formação de múltiplas camadas com espessura e composição controladas. Essa técnica possibilita ajustar a estabilidade, a permeabilidade da parede e o perfil de liberação do composto encapsulado (Mora-Huertas *et al.*, 2010; Pulingam *et al.*, 2022).

Entre os métodos utilizados para a produção de sistemas nanoestruturados, a emulsificação associada à homogeneização em alta pressão destaca-se pela capacidade de reduzir o tamanho das gotículas e produzir dispersões com maior uniformidade. Nessa técnica, uma emulsão primária, formada pelas fases oleosa e aquosa e estabilizada por emulsificantes, é forçada a atravessar uma válvula ou abertura estreita sob elevada pressão. A passagem pelo equipamento gera forças intensas de cisalhamento, turbulência e cavitação, promovendo a ruptura das gotículas maiores e a formação de estruturas com dimensões nanométricas (Fangueiro *et al.*, 2012).

O desempenho da homogeneização em alta pressão depende de fatores como pressão aplicada, número de ciclos, temperatura, viscosidade das fases e concentração dos emulsificantes.

Quando esses parâmetros são adequadamente controlados, podem ser obtidos sistemas com menor índice de polidispersidade, elevada eficiência de encapsulamento e maior estabilidade físico-química (Ferjaoui *et al.*, 2020).

No contexto deste trabalho, a homogeneização em alta pressão foi empregada para a obtenção das formulações nanoestruturadas contendo vitamina C proveniente do suco de camu-camu. A aplicação dessa técnica teve como finalidade reduzir o tamanho das partículas, melhorar a homogeneidade da dispersão e favorecer a estabilidade do composto bioativo encapsulado.

2.8 Estabilidade das Formulações Nanoencapsuladas

A estabilidade das formulações nanoencapsuladas constitui um fator fundamental para garantir a eficácia, a segurança e a qualidade de sistemas nanoestruturados empregados nas áreas farmacêutica, cosmética, alimentícia e biomédica. Essa estabilidade está relacionada à manutenção das propriedades físico-químicas das nanocápsulas ao longo do tempo, incluindo o tamanho médio das partículas, o índice de polidispersidade, a carga superficial, a morfologia e a integridade do composto bioativo encapsulado. A instabilidade do sistema pode favorecer fenômenos como agregação, sedimentação, separação de fases e liberação prematura do ativo, comprometendo sua biodisponibilidade e seu desempenho funcional (Deng *et al.*, 2020; Caritá *et al.*, 2020).

Diversos fatores podem influenciar a estabilidade das formulações. O pH do meio, por exemplo, pode modificar o grau de ionização dos polímeros e dos tensoativos, alterar a carga superficial das partículas e afetar a solubilidade dos componentes, favorecendo a agregação ou a liberação do composto encapsulado. A temperatura também exerce influência significativa, uma vez que suas variações podem modificar a viscosidade da fase contínua, a mobilidade molecular e as propriedades estruturais dos materiais utilizados, provocando alterações no tamanho e na distribuição das partículas (Tallian *et al.*, 2018; Froelich *et al.*, 2023).

A oxidação representa outro fator relevante, especialmente em formulações contendo substâncias sensíveis, como vitaminas e compostos antioxidantes. Esse processo pode ser minimizado por meio da redução do contato com o oxigênio, da utilização de embalagens adequadas, do emprego de atmosferas inertes ou da incorporação de agentes antioxidantes à formulação (Baierle *et al.*, 2012; Davis *et al.*, 2016). De forma semelhante, a exposição à luz, principalmente à radiação ultravioleta, pode desencadear reações fotoquímicas capazes de degradar o composto bioativo e alterar os componentes do sistema nanoestruturado (Caritá *et al.*, 2020).

Além disso, o tipo e a concentração de tensoativos, polímeros e demais adjuvantes empregados na formulação influenciam diretamente a estabilidade coloidal das nanocápsulas. Quantidades insuficientes de estabilizantes podem favorecer a agregação das partículas, enquanto concentrações excessivas podem alterar a viscosidade, a carga superficial e a interação entre os componentes do sistema (Deng *et al.*, 2020; Taheri; Jafari, 2019). Dessa forma, o desenvolvimento

de formulações nanoencapsuladas deve considerar conjuntamente as características dos materiais, as condições de processamento e os parâmetros de armazenamento, a fim de preservar as propriedades físico-químicas e assegurar o desempenho funcional do sistema ao longo do tempo (Comunian *et al.*, 2022; Froelich *et al.*, 2023).

2.8.1 Métodos de Avaliação da Estabilidade das Nanocápsulas

A avaliação da estabilidade das nanocápsulas é essencial para assegurar sua eficácia e segurança ao longo do tempo. Entre os principais métodos utilizados, destacam-se a análise do tamanho e da distribuição das partículas por DLS (*Dynamic Light Scattering* – Dispersão de Luz Dinâmica), que detecta aglomerações e alterações dimensionais, e a medição do zeta potencial, que indica a estabilidade eletrostática do sistema. Abdel-Rashid *et al.*, (2022) aplicaram a técnica de DLS para caracterizar o tamanho, a polidispersidade e o potencial zeta de nanocápsulas poliméricas e lipídicas contendo miconazol. A DLS evidenciou distribuição homogênea e boa estabilidade coloidal, com tamanhos adequados para aplicação tópica. Esses dados foram fundamentais para associar as propriedades físico-químicas à eficácia na liberação e permeação do ativo.

Técnicas como a espectroscopia no infravermelho (FTIR) permitem identificar possíveis degradações químicas ao observar mudanças nas interações entre o polímero e o ativo encapsulado. Tallian *et al.* (2021) utilizaram FTIR para investigar alterações na estrutura secundária de nanocápsulas formadas por albumina e fibroína da seda. A análise revelou um aumento de folhas β , indicando maior reticulação e estabilidade, o que foi fundamental para explicar o mecanismo de liberação controlada em resposta ao pH. A FTIR permitiu, assim, relacionar a composição estrutural ao desempenho funcional das nanocápsulas.

Além disso, a espectroscopia na região do ultravioleta e do visível (UV-Vis) é amplamente empregada para monitorar a estabilidade de compostos sensíveis à luz, como a vitamina C, permitindo a detecção de alterações estruturais e degradações ao longo do tempo. Brito D. *et al.*, (2016) analisaram a estabilidade térmica e em suspensão aquosa de vitaminas nanoencapsuladas à base de quitosana, utilizando espectroscopia UV-Vis para monitorar a degradação das vitaminas C, B9 e B12 sob diferentes condições de armazenamento. Os resultados indicaram que a encapsulação proporcionou maior estabilidade às vitaminas, especialmente à vitamina C.

A combinação desses métodos possibilita uma caracterização abrangente da estabilidade físico-química das nanocápsulas, aspecto especialmente relevante em sistemas de liberação controlada contendo compostos sensíveis, como a vitamina C. Dessa forma, a escolha criteriosa das estratégias de formulação deve ser acompanhada por análises consistentes de estabilidade, a fim de garantir a funcionalidade e o desempenho do sistema nanoestruturado ao longo do tempo.

3 PROBLEMATIZAÇÃO E HIPÓTESES

A vitamina C é um composto bioativo essencial à saúde humana, amplamente reconhecido por seu papel antioxidante, imunomodulador e como cofator em diversas reações metabólicas. No entanto, sua instabilidade frente a condições ambientais adversas — como luz, oxigênio, calor e pH elevado — limita sua aplicação em formulações alimentícias, cosméticas e farmacêuticas. Essa limitação torna-se ainda mais desafiadora quando se busca utilizar fontes naturais ricas nesse composto, como o camu-camu, que, apesar de conter elevadas concentrações de vitamina C, é extremamente perecível e suscetível à degradação do ácido ascórbico durante o processamento e o armazenamento.

Diante desse cenário, torna-se necessário o desenvolvimento de estratégias que não apenas promovam a concentração da vitamina C presente no camu-camu, mas também assegurem sua estabilidade ao longo da cadeia produtiva. Nesse contexto, a nanofiltração desponta como uma alternativa promissora aos métodos térmicos convencionais, permitindo a concentração seletiva da vitamina C sem comprometer sua integridade funcional. Ainda assim, mesmo após esse processo, o composto permanece vulnerável à degradação causada por fatores ambientais.

Para superar esse desafio, as tecnologias de nanoencapsulamento assumem um papel estratégico, ao oferecerem uma barreira física eficaz contra agentes oxidativos e possibilitarem a liberação controlada da vitamina C em condições específicas. A integração dessas abordagens oferece um caminho viável para maximizar a preservação do ácido ascórbico, ampliando seu potencial de aplicação em produtos funcionais, nutracêuticos e cosméticos.

3.1 Hipóteses

H₀: A concentração de vitamina C por nanofiltração, a partir do suco de camu-camu, resulta em um extrato com **maior teor** de ácido ascórbico em comparação ao suco *in natura*, preservando os compostos bioativos mesmo após o processamento.

H₁: A nanoencapsulação da vitamina C concentrada, utilizando emulsões estabilizadas com óleo de castanha-do-brasil e Tween 80, é capaz de proteger o composto da degradação oxidativa e permitir sua liberação controlada em condições simuladas de digestão, promovendo maior estabilidade e biodisponibilidade.

H₂: O sistema de nanoencapsulamento obtido a partir de emulsões processadas por homogeneização de alta pressão promove a redução no tamanho das partículas e melhora a eficiência de encapsulamento da vitamina C, aumentando sua proteção contra fatores ambientais (luz, oxigênio, pH e temperatura).

H₃: A combinação das tecnologias de nanofiltração e nanoencapsulamento representa uma

abordagem sinérgica, capaz de aumentar significativamente a vida útil da vitamina C em formulações líquidas, mesmo sob condições de armazenamento prolongado.

4 OBJETIVOS

4.1.1 Objetivo Geral

- Desenvolver e caracterizar sistemas de nanoencapsulamento contendo vitamina C obtida de suco de camu-camu previamente concentrado por nanofiltração, avaliando sua estabilidade e o perfil de liberação controlada, com vistas à aplicação em alimentos funcionais, suplementos nutricionais e formulações farmacêuticas.

4.1.2 Objetivos Específicos

- Utilizar polpa de camu-camu previamente extraída e aplicar o processo de nanofiltração para a concentração da vitamina C presente.
- Desenvolver sistemas de nanoencapsulamento adequados para a incorporação da vitamina C concentrada.
- Caracterizar físico-quimicamente os sistemas nanoencapsulados, avaliando parâmetros como tamanho de partícula, potencial zeta, espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), microscopia eletrônica de Transmissão (MET) e eficiência de encapsulamento por espectrofotometria UV-Vis.
- Avaliar a fotoestabilidade da vitamina C nanoencapsulada
- Propor possíveis aplicações dos sistemas nanoencapsulados desenvolvidos em produtos alimentícios funcionais, suplementos nutricionais e formulações farmacêuticas

5 METODOLOGIA

5.1 Recebimento e Pré-tratamento da polpa

A polpa de camu-camu (*Myrciaria dubia*) utilizada neste estudo foi adquirida de fornecedores locais devidamente registrados e inspecionados, provenientes do município de São Sebastião do Uatumã, no estado do Amazonas. A polpa foi recebida no laboratório já processada, acondicionada em embalagens plásticas, lacradas e armazenada em condição congelada (-18 °C).

Figura 4 - Polpa de camu-camu a -80 °C.



Fonte – Autor, 2025

No laboratório, as embalagens foram inspecionadas visualmente quanto à integridade e ausência de sinais de descongelamento ou contaminação física. Em seguida, foram então armazenadas em ultrafreezer a -80 °C, garantindo a preservação das características físico-químicas e do teor de vitamina C até o momento do uso.

Antes das etapas subsequentes, as porções necessárias de polpa foram descongeladas sob temperatura controlada (16 °C) por aproximadamente 12 horas, a fim de evitar degradação térmica e perdas nutricionais, especialmente da vitamina C. A polpa descongelada foi homogeneizada para garantir a uniformidade da amostra e, posteriormente, filtrado em tecido fino para a remoção de partículas maiores e, em seguida, centrifugado a 5500 rpm por 5 minutos, resultando em um fluido homogêneo e com reduzida carga de sólidos em suspensão, adequado ao processamento por membranas.

5.2 Nanofiltração

A operação de nanofiltração foi conduzida em um Sistema de Fluxo Tangencial (SFT), marca ANHUI HOLVES ENGINEERING TECHNOLOGY CO., LTD, modelo Multi SM-1812 (Figura 5), equipado com uma membrana polimérica de nanofiltração com peso molecular de corte de 150 Daltons. Foram realizados o controle dos parâmetros operacionais previamente estabelecidos — como pressão, temperatura e rotação da bomba —, bem como os procedimentos de sanitização e armazenamento das membranas.

Figura 5 - Sistema de fluxo tangencial em operação.



Fonte – Autor, 2025.

Foram avaliadas três combinações operacionais de pressão e rotação, mantendo-se a temperatura em 30 °C: 8 bar e 600 rpm, 11 bar e 800 rpm, e 14 bar e 400 rpm. Como pressão e rotação variaram simultaneamente, cada ensaio foi tratado como uma condição operacional, sem atribuição isolada do efeito a apenas um desses parâmetros.

Tabela 1 - Condições operacionais aplicadas na nanofiltração do suco de camu-camu.

Processo	Temperatura (°C)	Pressão (bar)	Rotação (rpm)
Processo 1	30	8	600
Processo 2	30	11	800
Processo 3	30	14	400

Fonte – Autor, 2025.

5.3 Determinação da Vitamina C

A quantificação da vitamina C foi realizada utilizando o método titulométrico/colorimétrico (Figura 6), baseado na reação de redução do sal sódico 2,6-diclorofenol indofenol pela vitamina C, conforme metodologia recomendada pelo Instituto Adolfo Lutz (2008) e pela Association of Official Analytical Chemists (AOAC International, 2006). Foram preparadas três soluções:

- Solução ácida: composta por 40 mL de ácido acético e 15 g de ácido metafosfórico diluídos em 450 mL de água destilada;
- Solução padrão de ácido ascórbico: preparada com 100 mg de ácido ascórbico diluídos em 100 mL da solução ácida;

- Solução indicadora (Tillmans): preparada com 50 mg do corante sal sódico 2,6-diclorofenol indofenol e bicarbonato de sódio, diluídos em 200 mL de água destilada.

Todas as soluções foram filtradas antes do uso.

Figura 6 - Determinação de Tillmans realizada em triplicata.



Fonte – Autor, 2025.

O teor de vitamina C foi calculado utilizando a Equação 1:

$$\text{Teor AA (mg/100mL)} = \frac{(Vt - Vb) \times F \times 100}{VA} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde,

Vt corresponde ao volume da solução indicadora consumido na titulação de amostra;

Vb ao volume da solução indicadora consumido na titulação do branco;

F é o fator de titulação (concentração da solução indicadora);

VA, o volume de amostra analisado.

5.4 Desenvolvimento das nanopartículas poliméricas

A preparação das formulações poliméricas considerou goma xantana e goma arábica como agentes encapsulantes, além dos respectivos controles vazios. O procedimento detalhado a seguir corresponde à formulação de goma xantana, preparada segundo Pinheiro *et al.* (2021). Inicialmente, a fase aquosa foi obtida pela dissolução de 0,5% (m/v) de goma xantana em água destilada, sob agitação magnética constante até completa dissolução. Em seguida, adicionou-se 1% (m/v) de Tween 80 à solução aquosa, sob agitação moderada, como tensoativo para estabilização da emulsão.

Paralelamente, preparou-se a fase oleosa, contendo o composto lipofílico de interesse — neste caso, óleo de castanha-do-pará (*Bertholletia excelsa*) — em concentração adequada. A fase aquosa foi então adicionada lentamente à fase oleosa sob agitação vigorosa, formando uma pré-

emulsão, conforme a figura 7.

Figura 7 - Preparação das nanocápsulas poliméricas.



Fonte – Autor, 2025.

Essa pré-emulsão foi submetida ao homogeneizador de alta pressão (figura 8) (modelo Nano DeBEE Gen II, marca Bee International Aplon Company), realizando-se três ciclos de homogeneização a uma pressão de 15.000 psi (1034,21 bar), conforme protocolo estabelecido em estudos anteriores. Durante o processo, a temperatura foi mantida abaixo de 15 °C, com o objetivo de evitar a degradação térmica dos compostos ativos.

Posteriormente, foi avaliado o pH da formulação, que apresentou valor de 3,35, sendo então conservada em geladeira a (5 ± 2) °C.

Também foram avaliadas formulações com goma arábica, nas versões vazia e contendo extrato de camu-camu. Assim, os quatro grupos experimentais foram: xantana vazia, xantana com extrato, goma arábica vazia e goma arábica com extrato.

Figura 8 - Homogeneização da pré-emulsão em alta pressão.



Fonte – Autor, 2025.

5.5 Caracterização das nanocapsulas

5.5.1 Tamanho, Índice de Polidispersão (PDI) e potencial zeta (ζ)

A análise das formulações poliméricas foi realizada por espalhamento dinâmico de luz (DLS, do inglês dynamic light scattering), utilizando o equipamento HORIBA SZ-100. A técnica permitiu determinar o diâmetro hidrodinâmico médio e a distribuição de tamanho das partículas dispersas, além de fornecer informações sobre a estabilidade coloidal do sistema.

Para garantir a exatidão das leituras, as amostras foram previamente diluídas em água destilada, a fim de evitar efeitos de espalhamento múltiplo da luz. A diluição foi ajustada conforme a faixa de contagem de fótons recomendada pelo fabricante do equipamento.

As análises foram conduzidas em temperatura controlada de 25 °C, utilizando cubetas de quartzo compatíveis com o aparelho. Cada amostra foi medida três vezes, com o objetivo de assegurar a consistência e a confiabilidade dos resultados. O processamento dos dados foi realizado por meio do software proprietário do equipamento, que aplicou a equação de Stokes-Einstein para calcular o tamanho médio das partículas com base em seu movimento browniano.

Além do tamanho médio, foi avaliado o índice de polidispersão (PDI), com a finalidade de verificar a uniformidade da distribuição de tamanho das nanocápsulas. Valores de PDI inferiores a 0,3 foram interpretados como indicativos de sistemas monodispersos, condição desejável em formulações farmacêuticas e cosméticas, por sugerir maior estabilidade da suspensão.

A técnica de DLS, aplicada com o analisador HORIBA SZ-100, demonstrou-se uma abordagem eficiente e confiável para a caracterização físico-química das nanocápsulas, configurando-se como um recurso fundamental para o desenvolvimento e aprimoramento de sistemas de liberação controlada de compostos bioativos.

5.5.2 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Foram avaliados os perfis espectroscópicos do suco de camu-camu nanofiltrado, da formulação de goma xantana vazia e da formulação de goma xantana contendo extrato de camu-camu. A técnica foi empregada para identificar bandas características dos constituintes e investigar possíveis interações entre os compostos do extrato e a matriz polimérica.

Os espectros de infravermelho foram obtidos em um espectrofotômetro de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), marca Agilent Technologies, modelo Cary 630 FTIR®, operando no modo de Reflectância Total Atenuada (ATR). As análises foram realizadas na faixa espectral de 4000 a 400 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} e 32 varreduras acumuladas por espectro. Antes de cada análise, foi obtido o espectro de fundo, que foi automaticamente subtraído dos espectros das amostras pelo software do equipamento.

A interpretação dos espectros baseou-se nas bandas características dos componentes das

amostras. Alterações de intensidade, formato ou posição foram tratadas como indícios de possíveis interações e de sobreposição de contribuições espectrais. O FTIR foi utilizado para caracterização química e não como prova isolada de encapsulamento ou da localização do extrato nas partículas.

5.5.3 Eficiência de Encapsulação (EE) por UV-Vis

A eficiência aparente de encapsulação (EE%) do extrato de camu-camu nas formulações poliméricas foi determinada por espectrofotometria UV-Vis em espectrofotômetro Shimadzu UV-1800. Inicialmente, realizou-se uma varredura espectral para identificar o comprimento de onda de máxima absorção do extrato, definido em 240 nm. Em seguida, construiu-se a curva analítica com soluções do próprio extrato de camu-camu em concentrações conhecidas, preparadas a partir de uma solução estoque. As soluções foram analisadas em triplicata, e os valores médios de absorbância foram relacionados à concentração por regressão linear.

Para a determinação da eficiência de encapsulação, as formulações nanoencapsuladas foram submetidas à centrifugação a 15.000 rpm por 30 minutos, a 4 °C, promovendo a separação da fração livre do extrato de camu-camu da fração associada às nanocápsulas. Após a centrifugação, o sobrenadante foi cuidadosamente coletado e analisado por espectrofotometria UV-Vis a 240 nm. A concentração equivalente de extrato de camu-camu livre presente no sobrenadante foi calculada a partir da curva analítica do próprio extrato, conforme a Equação 2.

$$\text{Concentração do ativo livre} = \frac{A_{240} + 0,0018}{0,0357} \quad (\text{Equação 2})$$

A concentração de extrato de camu-camu associada às nanocápsulas foi determinada pela diferença entre a concentração total de extrato utilizada na formulação e a concentração de extrato livre quantificada no sobrenadante. A eficiência de encapsulação (EE%) foi calculada conforme a Equação 3:

$$\text{EE aparente (\%)} = \frac{C_{\text{inicial}} - C_{\text{livre}}}{C_{\text{inicial}}} \times 100 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde,

C_inicial representa a concentração total de extrato empregada na formulação.

C_livre refere-se à concentração equivalente de extrato livre determinada no sobrenadante após a centrifugação.

Essa abordagem indireta foi adotada para estimar a fração do extrato associada ao sistema após a separação da fração livre, conforme a metodologia de Sur et al. (2019), adaptada para este estudo. O resultado foi tratado como eficiência aparente de encapsulamento.

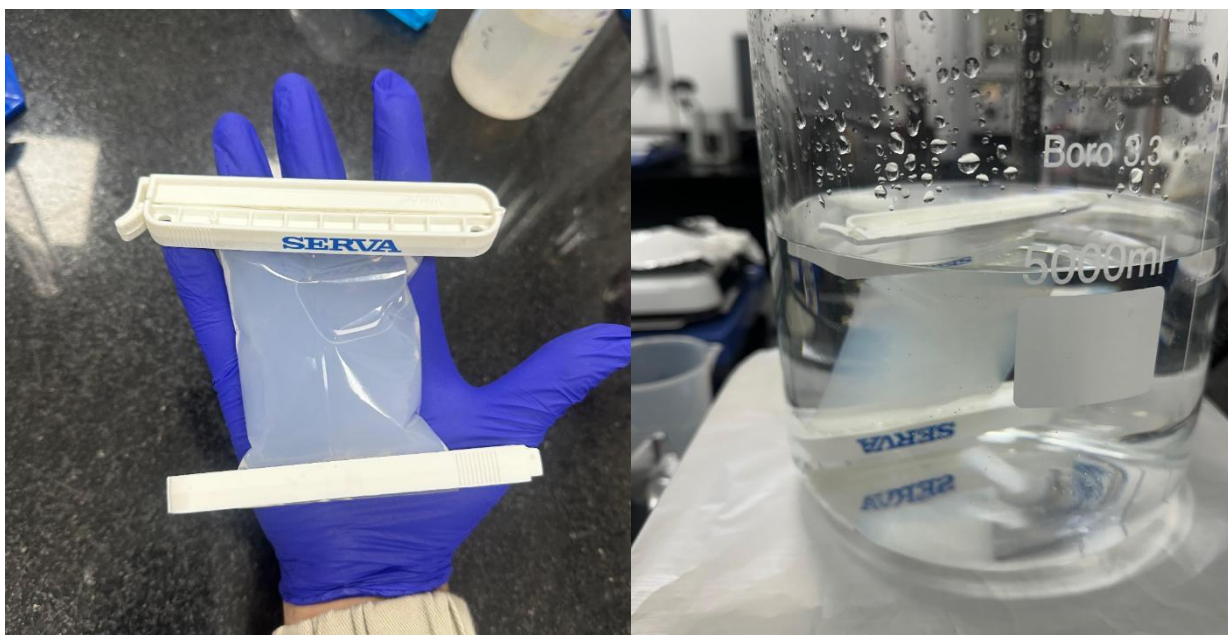
5.5.4 Ensaio de Liberação Controlada

O ensaio de liberação controlada foi realizado pelo método de difusão em membrana de diálise, conforme ilustrado na Figura 9, utilizando uma membrana com massa molar de corte entre 12.000 e 16.000 Da, previamente hidratada em água destilada. Para a realização do ensaio, uma alíquota de 5 mL da suspensão contendo as nanocápsulas foi transferida para o interior da membrana de diálise. Após o fechamento, a membrana foi imersa em 95 mL de água destilada, mantida a 25 °C sob agitação constante.

O meio receptor, constituído por água destilada, teve seu pH ajustado para 5,0 por meio da adição de ácido cítrico. A escolha desse valor foi baseada na possibilidade de aplicação de sistemas nanoencapsulados contendo compostos bioativos de origem vegetal em formulações cosméticas e alimentícias. Em formulações cosméticas, o pH 5,0 encontra-se próximo ao pH fisiológico da pele humana, contribuindo para a manutenção da estabilidade dos compostos bioativos e permitindo a simulação de condições relacionadas à aplicação tópica. Além disso, esse valor de pH também é compatível com diversos sistemas alimentícios levemente ácidos, possibilitando uma avaliação preliminar do comportamento de liberação do extrato de camu-camu em condições que podem ser encontradas em potenciais aplicações alimentares. Dessa forma, a utilização de pH 5,0 permitiu avaliar a liberação do extrato em uma condição intermediária e representativa para diferentes áreas de aplicação.

Alíquotas de 2 mL do meio receptor foram coletadas nos tempos de 15, 30 e 45 minutos; 1, 2, 3, 4, 5, 6, 24, 48, 72 e 96 horas. Após cada coleta, o volume retirado foi repostado com igual volume de meio receptor fresco, previamente ajustado para as mesmas condições experimentais, de modo a manter o volume total do sistema constante.

Figura 9 - Ensaio de liberação controlada da nanocápsula de xantana carregada com extrato de camu-camu.



Fonte – Autor, 2026.

As amostras coletadas foram analisadas em espectrofotômetro UV-Vis no comprimento de onda de máxima absorção previamente determinado para o extrato de camu-camu. As concentrações liberadas ao longo do tempo foram determinadas por meio da curva analítica obtida a partir do próprio extrato, permitindo a construção dos perfis de liberação cumulativa e a avaliação do comportamento de liberação controlada das nanocápsulas desenvolvidas.

Os resultados foram expressos como concentração equivalente de extrato de camu-camu liberado no meio receptor, uma vez que a curva de calibração utilizada foi construída com o extrato vegetal e não com ácido ascórbico isolado.

O protocolo experimental foi adaptado com base em Wang et al. (2019) e Costa (2022), especialmente quanto ao uso de membrana de diálise, ao volume do meio receptor, ao ajuste para pH 5,0, à reposição das alíquotas coletadas e ao acompanhamento por até 96 horas.

5.5.5 Ensaio de fotoestabilidade

A fotoestabilidade das formulações nanoencapsuladas contendo extrato de camu-camu foi avaliada em câmara de fotoestabilidade Ethiktechnology, modelo 424/SGD, com o objetivo de verificar a influência da exposição à luz visível e à radiação ultravioleta sobre a estabilidade da vitamina C presente nas amostras.

Os ensaios foram realizados separadamente, considerando duas condições independentes de exposição. No primeiro ensaio, as amostras foram submetidas à radiação ultravioleta, com intensidade de $6,8 \text{ W/m}^2$, até atingir dose acumulada de 200 Wh/m^2 . No segundo ensaio, as amostras foram expostas à luz visível até atingir fluxo luminoso acumulado de 1200 K Lux.h . Durante os ensaios, a temperatura interna da câmara foi mantida próxima à temperatura ambiente,

com registro aproximado de 25,7 °C.

As amostras foram acondicionadas em recipientes apropriados e posicionadas no interior da câmara de forma a permitir exposição uniforme à radiação, conforme ilustrado na Figura 10. Após cada condição de exposição, as formulações foram avaliadas quanto a possíveis alterações físico-químicas, considerando o aspecto visual, a coloração e o teor de vitamina C remanescente.

Figura 10 - Câmara de fotoestabilidade utilizada nos ensaios de fotoestabilidade.



Fonte – Autor, 2026.

A resposta analítica após os ensaios de exposição foi determinada por espectrofotometria UV-Vis a 240 nm, utilizando a curva previamente estabelecida com o extrato de camu-camu. Os resultados das amostras expostas foram comparados aos respectivos controles mantidos ao abrigo da luz para avaliar o efeito da fotoexposição e a capacidade protetora das formulações.

5.5.6 Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET)

Para a caracterização morfológica das nanocápsulas desenvolvidas, foi empregada a técnica de Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET), devido à sua capacidade de possibilitar a observação de estruturas em escala nanométrica. As análises foram realizadas no Centro Multiusuário para Análise de Fenômenos Biomédicos (CMABio – ESA/UEA), em microscópio eletrônico de transmissão MET (JEOL, JEM-1400FLASH, Japão), operando a 80 kV.

As amostras foram preparadas sem ultramicrotomia. As micrografias foram interpretadas qualitativamente quanto à forma, à dispersão e à presença de agregados; não foram obtidos diâmetros a partir das imagens. Os tamanhos apresentados foram determinados por DLS.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Nanofiltração e Determinação da Vitamina C

Após as etapas de pré-tratamento — homogeneização, filtração em tecido fino e centrifugação —, o suco obtido a partir da polpa do camu-camu foi submetido à determinação do teor de vitamina C por meio do teste de Tillmans, realizado em triplicatas para cada amostra de entrada de cada processo. Paralelamente, também foram realizadas medições do pH inicial e final com o objetivo de avaliar as possíveis alterações químicas promovidas pelas diferentes condições operacionais aplicadas durante o processo de nanofiltração.

O processo de concentração foi conduzido em um sistema de fluxo tangencial (SFT), equipado com uma membrana polimérica de nanofiltração, com peso molecular de corte de 150 Daltons, adequada para retenção de compostos de baixo peso molecular, como o ácido ascórbico. Após a etapa de nanofiltração, foram realizados novamente os testes de Tillmans, também em triplicatas, para cada amostra obtida, nas condições de saída dos processos.

Os resultados dessas análises estão organizados na Tabela 2, que apresenta os teores de vitamina C antes e após a nanofiltração, bem como os valores de pH e as respectivas variações percentuais associadas às diferentes condições operacionais aplicadas.

A Tabela 2 resume os principais dados obtidos:

Tabela 2 - Comparação entre o suco pré-tratado e o nanofiltrado nas condições avaliadas.

Condição operacional	Teor de vitamina C – suco pré-tratado (mg/100 mL)	Teor médio de vitamina C – nanofiltrado (mg/100 mL)	Variação (%)	pH inicial	pH final
8 bar / 600 rpm	991,56 ± 2,24	1026,94 ± 0,95	3,57	2,1	2,1
11 bar / 800 rpm	1128,00 ± 1,35	1668,57 ± 1,75	47,92	2,3	2,0
14 bar / 400 rpm	1088,75 ± 5,73	1809,38 ± 2,24	66,19	2,3	2,1

Fonte – Autor, 2025

Na condição de 8 bar e 600 rpm, o teor médio aumentou de 991,56 para 1026,94 mg/100 mL, correspondente a 3,57%. Esse resultado descreve o desempenho da combinação operacional avaliada e não permite atribuir o efeito exclusivamente à pressão.

Na condição de 11 bar e 800 rpm, o teor médio aumentou de 1128,00 para 1668,57 mg/100 mL, correspondente a 47,92%. Como pressão e rotação foram modificadas em conjunto, os dados não isolam a contribuição de cada parâmetro. Também não foram realizadas medições específicas de incrustação da membrana que permitissem atribuir o resultado à redução de fouling.

Entre as condições avaliadas, a combinação de 14 bar e 400 rpm apresentou o maior aumento relativo no teor de vitamina C, de 1088,75 para 1809,38 mg/100 mL, correspondente a

66,19%. O pH permaneceu em 2,1 na condição de 8 bar e 600 rpm e apresentou pequenas reduções nas demais condições. Portanto, os resultados permitem comparar as combinações operacionais empregadas, mas não isolar o efeito da pressão ou da rotação.

Esse comportamento é consistente com os achados de Ah-Hen *et al.* (2017), que demonstraram que, ao elevar a TMP de 20 para 40 bar na nanofiltração de suco de cranberry, o tempo necessário para atingir um fator de concentração foi reduzido de mais de 240 minutos para menos de 120 minutos, mantendo uma alta retenção de antocianinas, chegando a mais de 90% de concentração. De maneira similar, Acosta *et al.* (2017) relataram que, ao aplicar pressões transmembrana de até 3 Mpa (30 bar) na nanofiltração de suco de amora-preta, obtiveram retenções superiores a 94% para antocianinas e 100% para elagitaninos.

Esses achados estão alinhados com o estudo de Conidi *et al.* (2020), que revisaram operações por membranas aplicadas à indústria de sucos. Os autores destacaram a combinação de ultrafiltração (UF) e osmose reversa (RO) como alternativas ao uso de calor na concentração de compostos bioativos. Em experimentos com suco de laranja submetido à RO a 60 bar, foi observado um aumento no teor de vitamina C de 29,3 mg/100 g para 101,1 mg/100 g, demonstrando a eficiência da técnica. Entretanto, a RO opera sob pressões elevadas (15–80 bar), resultando em maior consumo energético. A nanofiltração, por outro lado, opera em pressões mais baixas (5–35 bar), o que reduz significativamente o consumo energético e, ao mesmo tempo, preserva melhor as características nutricionais e sensoriais dos sucos.

O estudo de Dushkova *et al.* (2022) reforça esse cenário ao demonstrar que a UF aumentou a concentração de ácidos fenólicos totais em 15–20% em suco de maçã, sem alterar significativamente o perfil dos compostos individuais. Além disso, foi observada uma elevação na capacidade antioxidante, conforme medido pelos ensaios FRAP e DPPH. Já Toker *et al.* (2014), ao estudarem o suco de laranja sanguínea, observaram que o teor de vitamina C no permeado tendia a reduzir à medida que aumentava o grau de concentração, o que indica que a escolha dos parâmetros operacionais e do tipo de membrana é determinante para preservar a estabilidade do composto.

Nas condições avaliadas, a nanofiltração aumentou o teor de vitamina C no nanofiltrado, com maior valor na combinação de 14 bar e 400 rpm, mantendo a operação a 30 °C. Esses resultados sustentam o uso da técnica para concentração de compostos termossensíveis, mas não permitem concluir superioridade em relação à ultrafiltração ou à osmose reversa, que não foram comparadas experimentalmente neste estudo.

6.2 Tamanho de Partícula, Índice de Polidispersão (PDI) e potencial zeta (ζ)

As análises por Espalhamento Dinâmico de Luz (DLS) foram empregadas para

caracterizar o diâmetro hidrodinâmico médio e o índice de polidispersão (PDI) do sistema nanoencapsulado formulado com vitamina C extraída do suco concentrado de camu-camu. Para essa etapa, foi utilizado o suco obtido na condição de melhor desempenho na nanofiltração, correspondente ao processo conduzido a 14 bar e 400 rpm, que apresentou o maior teor de vitamina C (1809,38 mg/100 mL), garantindo uma matéria-prima altamente concentrada e bioativa para a nanoencapsulação. Os resultados são apresentados na Tabela 3

Tabela 3 - Tamanho de Partícula, Potencial Zeta e Polidispersividade (PDI) das nanocápsulas de Xantana e Arábica obtidas pelo método de homogeneização de alta pressão.

Nanossistemas	Diâmetro médio (nm)	Potencial Zeta (mV)	PDI	pH
Arábica Vazia	145,7 ± 4,27	-20,8 ± 2,31	0,209 ± 0,07	3,45
Arábica com extrato	146,5 ± 3,85	-18,4 ± 0,22	0,324 ± 0,02	3,57
Xantana com extrato	136,6 ± 1,13	-39,6 ± 4,56	0,212 ± 0,02	3,39
Xantana Vazia	149 ± 0,98	-47,8 ± 4,56	0,199 ± 0,03	3,75

Fonte – Autor, 2026

Conforme apresentado na Tabela 3, as formulações apresentaram diâmetros hidrodinâmicos médios entre 136,6 ± 1,13 nm e 149,0 ± 0,98 nm, situados na faixa submicrométrica. A faixa convencional de nanoescala é aproximadamente de 1 a 100 nm; materiais maiores podem ser considerados no contexto da nanotecnologia quando apresentam propriedades dependentes da dimensão, mas o valor do diâmetro, isoladamente, não estabelece essa classificação (FDA, 2014).

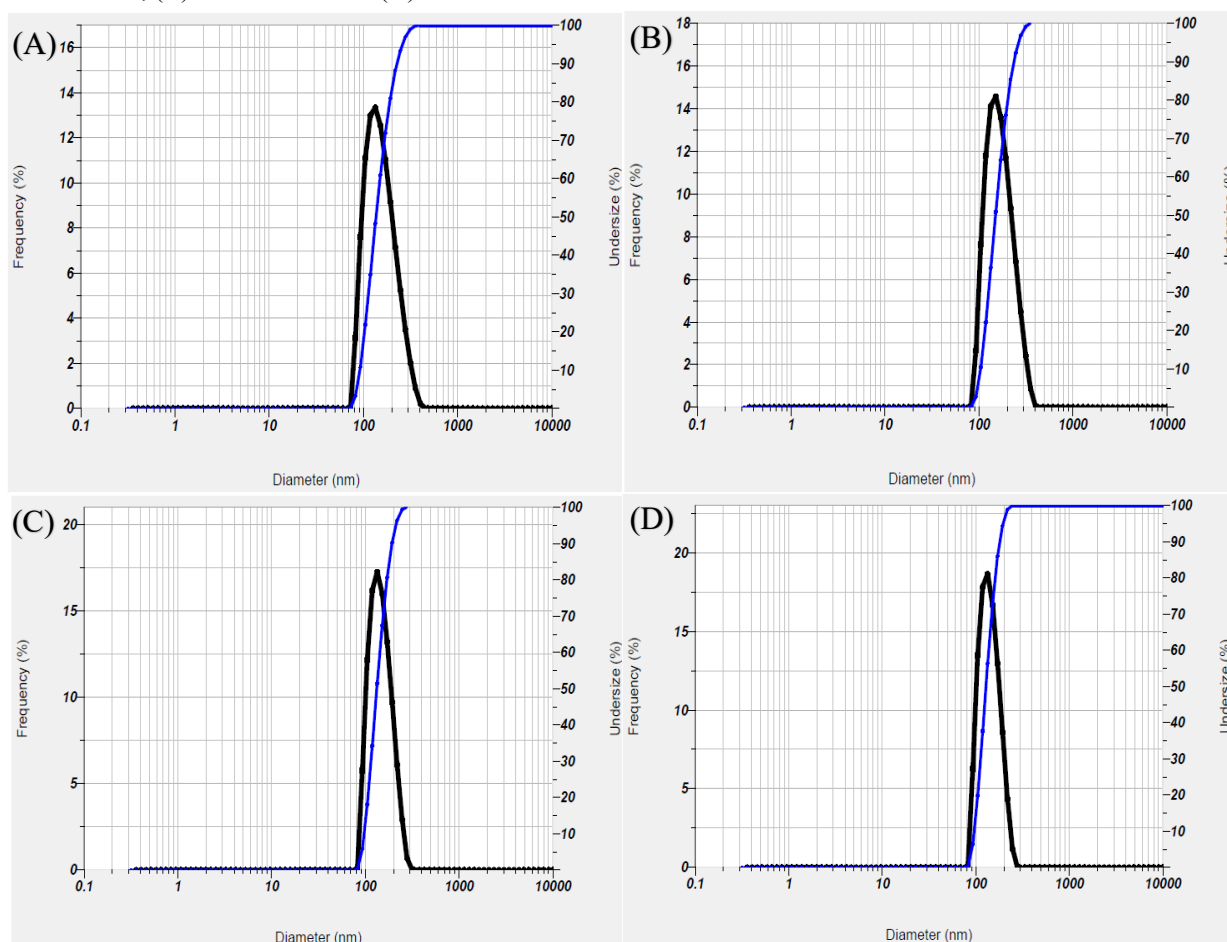
Para as formulações à base de goma arábica, a nanocápsula vazia apresentou diâmetro médio de 145,7 ± 4,27 nm, enquanto a formulação contendo extrato de camu-camu apresentou 146,5 ± 3,85 nm. Essa diferença discreta sugere que a incorporação do extrato não promoveu aumento expressivo no tamanho hidrodinâmico das partículas. Esse comportamento pode indicar boa compatibilidade entre o extrato, a fase oleosa, o surfactante e a matriz polimérica formada pela goma arábica.

Em relação às formulações contendo xantana, observou-se comportamento distinto. A nanocápsula vazia apresentou diâmetro médio de 149,0 ± 0,98 nm, enquanto a formulação carregada com extrato de camu-camu apresentou menor diâmetro, de 136,6 ± 1,13 nm. Essa redução pode estar associada a um rearranjo estrutural do sistema após a incorporação do extrato, favorecendo maior compactação da partícula. No entanto, é importante destacar que o tamanho médio, isoladamente, não confirma o encapsulamento do ativo, sendo necessário interpretá-lo em conjunto com o potencial zeta, PDI, eficiência de encapsulação e demais técnicas de caracterização.

Os diâmetros obtidos neste estudo são compatíveis com diferentes sistemas nanoestruturados descritos na literatura. Jang e Lee (2008), por exemplo, desenvolveram nanopartículas de quitosana contendo ácido ascórbico com tamanho mínimo de aproximadamente 170 nm. Já Othman et al. (2020) obtiveram nanopartículas de quitosana carregadas com ácido ascórbico e timoquinona com tamanho médio de $141,5 \pm 7,8$ nm e PDI de $0,207 \pm 0,013$, valores bastante próximos aos observados para a nanocápsula de xantana contendo camu-camu neste trabalho. Além disso, Mustafa et al. (2025), ao avaliarem nanoemulsões/nanoemulgéis contendo xantana, relataram tamanhos entre 131 e 223 nm, faixa semelhante à obtida nas formulações desenvolvidas neste estudo.

A distribuição de tamanho das partículas está apresentada na Figura 11, permitindo observar o comportamento das formulações vazias e carregadas em função do polímero utilizado.

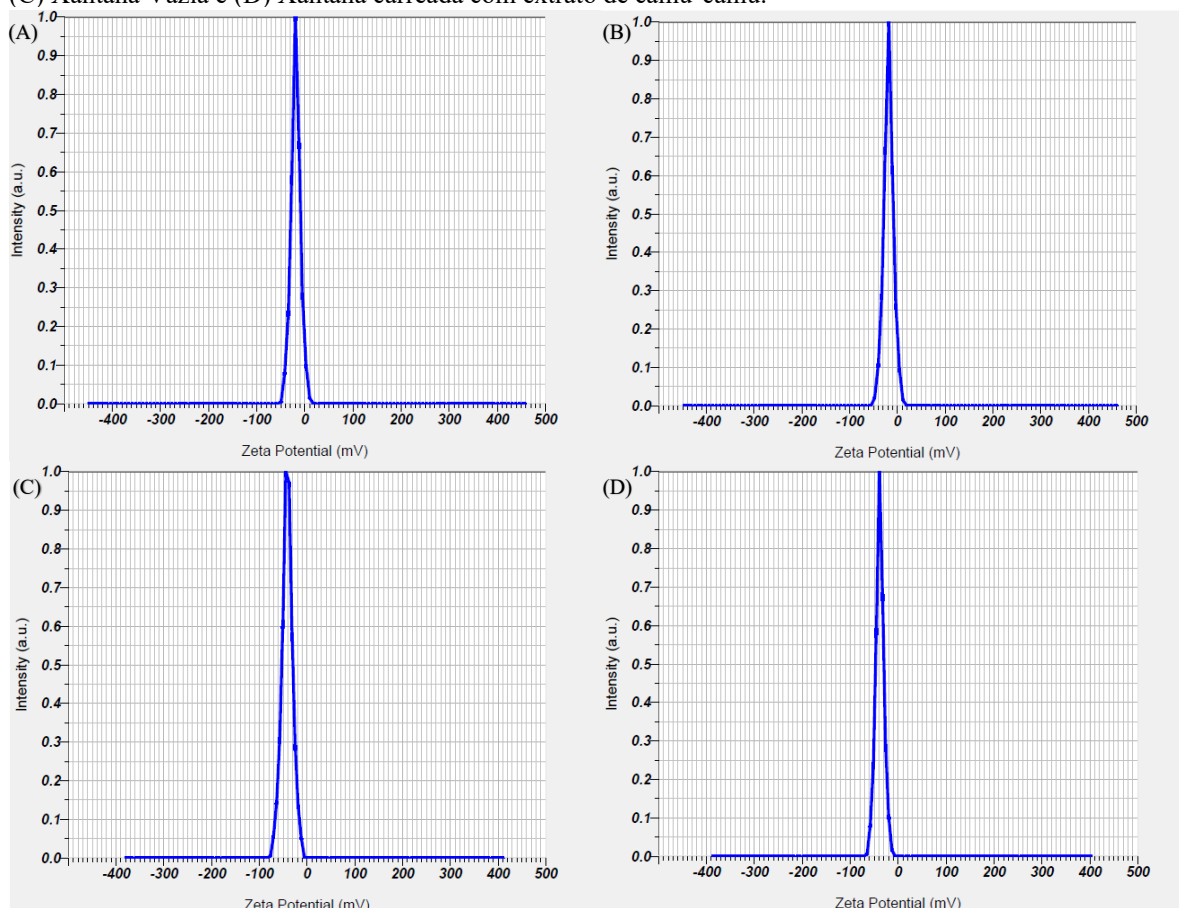
Figura 11 - Gráficos dos diâmetros das nanocápsulas de (A) Arábica Vazia, (B) Arábica carregada com extrato de camu-camu, (C) Xantana Vazia e (D) Xantana carregada com extrato de camu-camu.



Fonte – Autor, 2026

O potencial zeta dos nanossistemas também foi avaliado, uma vez que esse parâmetro fornece informações sobre a carga superficial das partículas e sua possível contribuição para a estabilidade coloidal. Os valores obtidos estão apresentados na Figura 12.

Figura 12 - Gráficos de potencial zeta de (A) Arábica Vazia, (B) Arábica carregada com extrato de camu-camu, (C) Xantana Vazia e (D) Xantana carregada com extrato de camu-camu.



Fonte – Autor, 2025

Todas as formulações apresentaram potencial zeta negativo, com valores entre $-18,4 \pm 0,22$ mV e $-47,8 \pm 4,56$ mV. As formulações contendo goma arábica apresentaram valores menos negativos, sendo $-20,8 \pm 2,31$ mV para a arábica vazia e $-18,4 \pm 0,22$ mV para a arábica contendo extrato. Esses resultados sugerem estabilidade eletrostática moderada, especialmente quando comparados às formulações contendo xantana.

Após a análise gráfica do potencial zeta, observa-se que as formulações de xantana apresentaram os valores mais negativos, com $-47,8 \pm 4,56$ mV para a xantana vazia e $-39,6 \pm 4,56$ mV para a xantana contendo extrato de camu-camu. Esses valores indicam maior repulsão eletrostática entre as partículas, o que pode reduzir a tendência de agregação e favorecer a estabilidade da dispersão. A redução da magnitude do potencial zeta após a incorporação do extrato, observada tanto na arábica quanto na xantana, pode estar relacionada à presença de compostos bioativos do camu-camu na interface das partículas, modificando parcialmente a carga superficial do sistema.

Esse comportamento também foi observado por Jang e Lee (2008), que relataram diminuição do potencial zeta em nanopartículas de quitosana após o aumento da concentração de ácido ascórbico. De forma semelhante, Othman et al. (2020) observaram que nanopartículas contendo ácido ascórbico apresentaram alterações em tamanho, PDI e potencial zeta após a incorporação do ativo. Entretanto, diferentemente dos sistemas à base de quitosana, que

geralmente apresentam carga positiva, as nanocápsulas deste estudo apresentaram carga negativa, o que está de acordo com a natureza aniônica dos polímeros utilizados, especialmente a xantana.

Quando comparadas aos dados de Mustafa et al. (2025), que relataram potencial zeta entre $-27,3$ e $-47,3$ mV para sistemas contendo xantana, as formulações de xantana desenvolvidas neste trabalho apresentaram comportamento bastante semelhante. Esse resultado reforça que a xantana contribuiu de forma relevante para a estabilização coloidal das nanocápsulas, principalmente em razão da maior magnitude da carga superficial negativa. No caso da goma arábica, os valores obtidos também se encontram dentro da faixa relatada por Moradi e Anarjan (2018), que desenvolveram nanocápsulas estabilizadas com goma arábica com potenciais zeta entre $-13,5$ e $-47,8$ mV.

Por fim, o índice de polidispersão demonstrou diferenças importantes entre as formulações. Os valores de PDI variaram de $0,199 \pm 0,03$ a $0,324 \pm 0,02$. As formulações contendo xantana apresentaram os menores valores, sendo $0,199 \pm 0,03$ para a xantana vazia e $0,212 \pm 0,02$ para a xantana contendo extrato. Esses resultados indicam distribuição de tamanho mais estreita e maior homogeneidade das partículas.

A formulação de arábica vazia apresentou PDI de $0,209 \pm 0,07$, também indicando boa uniformidade. No entanto, a arábica contendo extrato apresentou PDI de $0,324 \pm 0,02$, valor superior ao das demais formulações. Esse aumento sugere que a incorporação do extrato de camu-camu na matriz de goma arábica pode ter favorecido maior heterogeneidade na distribuição de tamanho, possivelmente devido a interações entre os compostos do extrato e os componentes da formulação.

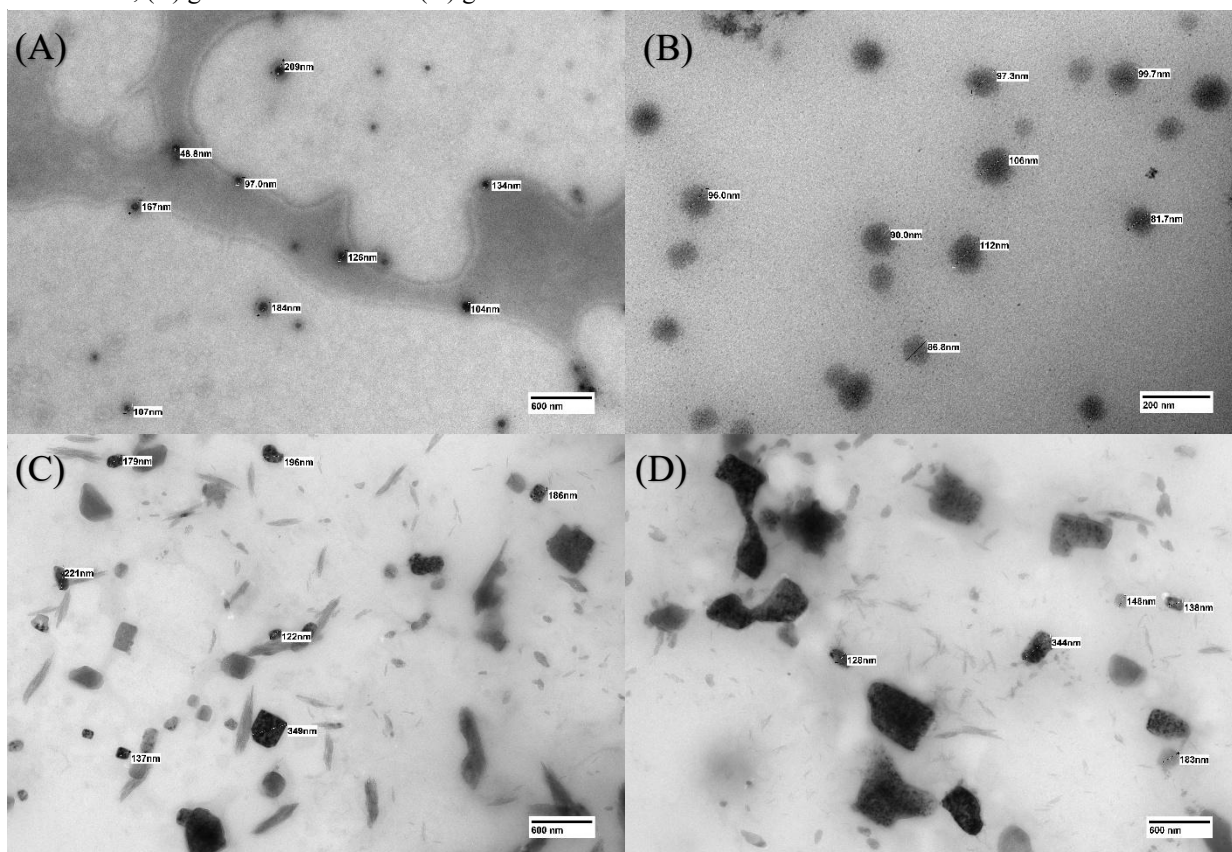
Comparando com a literatura, o PDI da xantana contendo camu-camu foi próximo ao observado por Othman et al. (2018), que obtiveram PDI de $0,207 \pm 0,013$ em nanopartículas contendo ácido ascórbico. Além disso, os valores encontrados para as formulações de xantana também foram próximos aos relatados por Mustafa et al. (2025), que observaram PDI entre 0,23 e 0,33 em sistemas contendo xantana. Já o PDI da arábica contendo extrato, embora mais elevado, ainda se aproxima de valores relatados em outros sistemas contendo ácido ascórbico, como o de Othman et al. (2020), que apresentou PDI de $0,348 \pm 0,043$.

Dessa forma, considerando conjuntamente o tamanho médio, o potencial zeta e o PDI, a formulação de xantana contendo extrato de camu-camu apresentou o melhor conjunto de características físico-químicas, com menor diâmetro médio, distribuição de tamanho mais homogênea e potencial zeta mais negativo. Esses resultados sugerem que a xantana foi mais eficiente que a goma arábica na estabilização das nanocápsulas contendo extrato de camu-camu, mostrando-se uma alternativa promissora para sistemas nanoencapsulados voltados à proteção e liberação controlada de vitamina C.

6.3 Análise Morfológica e Estrutural das Nanopartículas

As micrografias obtidas por Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET) permitiram comparar qualitativamente a morfologia e a dispersão das quatro formulações (Figura 13). As formulações à base de xantana apresentaram partículas com contornos mais definidos e distribuição visualmente mais homogênea, enquanto as formulações com goma arábica exibiram maior heterogeneidade morfológica e mais regiões agregadas.

Figura 13 - Micrografias obtidas por MET das nanocápsulas de (A) xantana vazia, (B) xantana contendo extrato de camu-camu, (C) goma arábica vazia e (D) goma arábica contendo extrato de camu-camu.



Fonte – Autor, 2026

Na formulação de xantana vazia (Figura 13A), observaram-se estruturas distribuídas ao longo do campo, com regiões de maior concentração de material, possivelmente relacionadas à matriz polimérica ou à deposição da amostra. O diâmetro hidrodinâmico médio de 149,0 nm e o PDI de 0,199 citados para essa formulação foram obtidos por DLS, e não por medição das micrografias.

A formulação de xantana contendo extrato de camu-camu (Figura 13B) apresentou partículas predominantemente arredondadas, com melhor definição morfológica e menor presença visual de agregados. Por DLS, essa formulação apresentou diâmetro hidrodinâmico médio de 136,6 nm e PDI de 0,212, caracterizando uma dispersão submicrométrica com distribuição relativamente homogênea. A comparação com Li *et al.* (2025) é qualitativa, pois os autores avaliaram lipossomas de composição distinta.

Nas formulações com goma arábica, observou-se maior variação morfológica. A formulação vazia (Figura 13C) apresentou estruturas menos regulares e regiões de possível agregação. O diâmetro hidrodinâmico médio de 145,7 nm e o PDI de 0,209 foram determinados por DLS. Estudos com goma arábica mostram que a organização desses sistemas depende da composição e das proporções entre os componentes (Tan *et al.*, 2016; Rajabi *et al.*, 2019).

A formulação de goma arábica contendo extrato de camu-camu (Figura 13D) apresentou maior heterogeneidade morfológica, estruturas irregulares e agregados. Por DLS, essa amostra apresentou diâmetro hidrodinâmico médio de 146,5 nm e PDI de 0,324, indicando distribuição de tamanho mais ampla que a das demais formulações. A possível influência das interações entre o extrato e a matriz constitui uma hipótese interpretativa, não demonstrada diretamente pela micrografia.

A utilização de matrizes poliméricas para encapsulação de compostos ricos em vitamina C também foi relatada por Carneiro *et al.* (2020), que desenvolveram nanocápsulas a partir de subproduto de acerola utilizando goma arábica e maltodextrina como materiais de parede. Os autores observaram partículas em escala nanométrica e destacaram a importância da matriz encapsulante na proteção de compostos bioativos. Embora o sistema estudado seja diferente do presente trabalho, a acerola, assim como o camu-camu, constitui uma matriz vegetal rica em vitamina C, o que torna essa comparação pertinente para discutir a nanoencapsulação de bioativos hidrossolúveis e sensíveis à degradação.

De forma complementar, Baek *et al.* (2021) avaliaram nanocápsulas de vitamina C produzidas com quitosana modificada e nanocristais de celulose, observando partículas esféricas, elevada eficiência de encapsulação e liberação sustentada ao longo do tempo. Esses resultados reforçam a importância da nanoencapsulação como estratégia para proteção e controle da liberação de vitamina C, composto reconhecidamente sensível a fatores como luz, oxigênio, temperatura e pH.

A presença de agregados em algumas micrografias não deve ser interpretada, isoladamente, como indicativo de instabilidade do sistema, uma vez que a análise por MET é realizada em condição diferente daquela empregada no DLS. Enquanto a MET possibilita a visualização direta das partículas, geralmente após secagem da amostra, o DLS determina o diâmetro hidrodinâmico das partículas em suspensão, considerando também a camada de solvatação e as interações com o meio dispersante. Assim, diferenças entre os tamanhos observados nas micrografias e os valores determinados por DLS podem ocorrer em razão dos distintos princípios de medição e das condições de análise empregadas por cada técnica, conforme discutido por Filippov *et al.* (2023).

A MET permitiu descrever a morfologia observada após o preparo das amostras, enquanto o DLS forneceu informações sobre o diâmetro hidrodinâmico e a distribuição de tamanho das

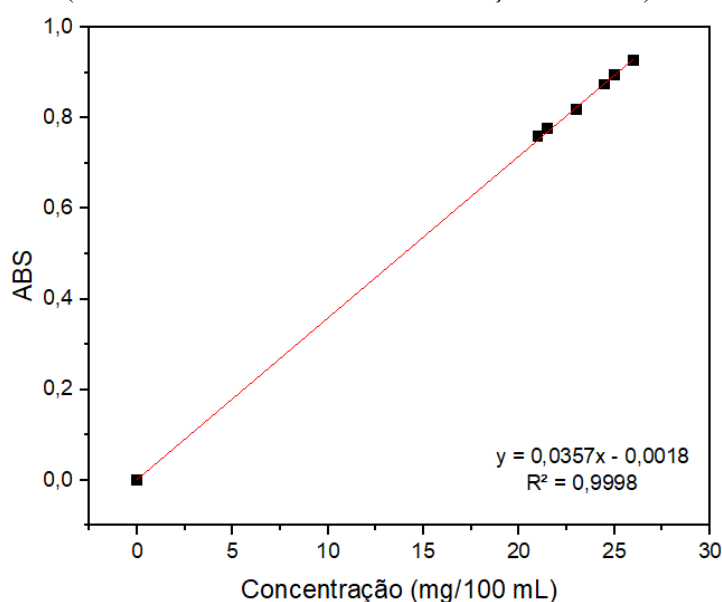
partículas em suspensão. Em conjunto, as técnicas evidenciaram diferenças entre as formulações avaliadas, embora não permitam confirmar, isoladamente, a localização do extrato no interior das partículas. Entre os sistemas analisados, a formulação de xantana contendo extrato de camu-camu apresentou contornos mais definidos e distribuição visualmente mais homogênea, enquanto a formulação correspondente de goma arábica demonstrou maior tendência à heterogeneidade, comportamento compatível com o maior valor de PDI observado para esse sistema. Esses resultados indicam que a formulação à base de xantana apresentou partículas com maior regularidade morfológica e melhor homogeneidade de distribuição, características relevantes para o desenvolvimento de sistemas nanoestruturados destinados à proteção e à liberação controlada de compostos bioativos.

6.4 Análise de fotoestabilidade

A fotoestabilidade das formulações nanoencapsuladas contendo extrato de camu-camu foi avaliada após exposição à luz branca e à radiação ultravioleta, com o objetivo de verificar a capacidade das matrizes poliméricas em proteger a vitamina C frente à fotoexposição. Após os ensaios, as amostras foram analisadas por espectrofotometria UV-Vis

A 240 nm, foi construída a curva analítica com soluções do extrato de camu-camu em diferentes concentrações, conforme apresentado na Figura 14. A regressão linear forneceu a equação $y = 0,0357x - 0,0018$ e $R^2 = 0,9998$. Essa relação foi utilizada sem alterar os valores numéricos reportados para os ensaios subsequentes.

Figura 14 - Curva analítica do extrato de camu-camu (absorbância a 240 nm versus concentração do extrato).



Fonte – Autor, 2026

Os resultados médios foram expressos em mg/100 mL e comparados com os respectivos

controles mantidos ao abrigo da luz, permitindo calcular o percentual de vitamina C remanescente e a degradação aparente. Os dados obtidos para o ensaio sob luz branca estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Teor médio de vitamina C após exposição à luz branca.

Amostra	Controle/Inicial (mg/100 mL)	Após luz branca (mg/100 mL)	Vitamina C remanescente (%)	Degradação (%)	pH inicial	pH final
Xantana com extrato	691,15 ± 10,18	665,71 ± 9,54	96,34	3,66	3,21	3,29
Goma arábica com extrato	828,08 ± 8,87	722,02 ± 5,76	87,20	12,80	3,11	3,23
Extrato de camu-camu livre	1614,43 ± 8,69	1270,56 ± 9,01	78,70	21,30	2,04	2,78

Fonte – Autor, 2026.

No ensaio sob luz branca, observou-se que a formulação contendo xantana apresentou maior estabilidade entre as amostras avaliadas, com redução do teor de vitamina C de $691,15 \pm 10,18$ para $665,71 \pm 9,54$ mg/100 mL. Esse resultado correspondeu a 96,34% de vitamina C remanescente e degradação de apenas 3,66%, indicando elevada capacidade de proteção da matriz de xantana frente à exposição à luz visível.

A formulação contendo goma arábica também apresentou comportamento satisfatório, com redução de $828,08 \pm 8,87$ para $722,02 \pm 5,76$ mg/100 mL, mantendo 87,20% da vitamina C inicial e apresentando degradação de 12,80%. Embora esse resultado indique efeito protetor da goma arábica, a retenção foi inferior à observada para a xantana, sugerindo que a matriz de xantana apresentou maior eficiência na preservação da vitamina C sob luz branca.

O extrato de camu-camu livre apresentou a maior perda entre as amostras avaliadas nessa condição, com redução de $1614,43 \pm 8,69$ para $1270,56 \pm 9,01$ mg/100 mL. A vitamina C remanescente foi de 78,70%, com degradação de 21,30%. Esse comportamento indica que, na ausência de uma matriz encapsulante, a vitamina C ficou mais suscetível aos processos degradativos associados à exposição luminosa.

A maior retenção observada nas formulações nanoencapsuladas está de acordo com estudos que demonstram que sistemas encapsulados podem atuar como barreiras físicas e químicas, reduzindo a exposição direta do ácido ascórbico à luz, ao oxigênio e a outros fatores responsáveis por sua degradação. Ho et al. (2023), por exemplo, observaram maior fotoestabilidade da vitamina C quando incorporada em sistema lipossomal estruturado, em comparação à vitamina C livre. Embora o sistema avaliado por esses autores seja diferente do presente estudo, os resultados reforçam que a organização da matriz carreadora exerce papel importante na proteção do ácido ascórbico.

A atuação da goma arábica como material de parede também é relatada na literatura. Silva

et al. (2013), ao avaliarem pó de camu-camu obtido por spray drying, observaram que a goma arábica favoreceu maior retenção de vitamina C em comparação à maltodextrina, evidenciando sua capacidade de proteger compostos bioativos. No presente estudo, entretanto, apesar da goma arábica ter reduzido a degradação em relação ao extrato livre, a xantana apresentou desempenho superior sob luz branca.

A variação de pH após a exposição à luz branca foi discreta nas formulações nanoencapsuladas, passando de 3,21 para 3,29 na xantana e de 3,11 para 3,23 na goma arábica. Esses valores indicam manutenção de uma condição ácida, favorável à estabilidade do ácido ascórbico. O extrato livre, por sua vez, apresentou aumento de pH de 2,04 para 2,78. Apesar de permanecer em faixa ácida, sua maior degradação sugere que o pH isoladamente não foi suficiente para proteger a vitamina C, reforçando a importância da matriz nanoencapsulante.

Os resultados obtidos após exposição à radiação ultravioleta estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Teor de vitamina C após exposição à radiação ultravioleta.

Amostra	Controle/Inicial (mg/100 mL)	Após radiação ultravioleta (mg/100 mL)	Vitamina C remanescente (%)	Degrada- ção (%)	pH inicial	pH final
Xantana com extrato	613,62 ± 4,52	574,04 ± 6,37	93,55	6,45	3,28	3,34
Goma arábica com extrato	724,15 ± 5,01	274,40 ± 7,66	37,90	62,10	3,07	3,41
Extrato de camu-camu livre	1540,87 ± 4,18	86,24 ± 6,18	5,60	94,40	2,01	3,91

Fonte – Autor, 2026.

Sob radiação ultravioleta, a formulação contendo xantana novamente apresentou o melhor desempenho, com redução do teor de vitamina C de 613,62 ± 4,52 para 574,04 ± 6,37 mg/100 mL. Esse resultado correspondeu a 93,55% de vitamina C remanescente e degradação de apenas 6,45%, demonstrando elevada capacidade de proteção mesmo em condição mais agressiva de fotoexposição.

A formulação contendo goma arábica apresentou menor estabilidade sob radiação UV, com redução de 724,15 ± 5,01 para 274,40 ± 7,66 mg/100 mL. A vitamina C remanescente foi de 37,90%, com degradação de 62,10%. Esse comportamento indica que, embora a goma arábica tenha apresentado proteção satisfatória sob luz branca, sua eficiência foi reduzida frente à radiação ultravioleta. Ainda assim, quando comparada ao extrato livre, a formulação com goma arábica demonstrou efeito protetor parcial.

O extrato de camu-camu livre apresentou a maior degradação sob UV, com redução estimada de 1540,87 ± 4,18 para 86,24 ± 6,18 mg/100 mL. A vitamina C remanescente foi de apenas 5,60%, com degradação de 94,40%. Esse resultado evidencia a elevada sensibilidade da vitamina C livre à radiação ultravioleta, especialmente quando não está protegida por uma matriz encapsulante.

Esse comportamento está de acordo com Santiago et al. (2023), que avaliaram a fotoestabilidade da vitamina C em produtos de frutas e observaram intensa degradação do ácido L-ascórbico após exposição à radiação UV. De forma semelhante, Golonka et al. (2022) também relataram elevada sensibilidade do ácido ascórbico à iluminação em matrizes poliméricas, demonstrando que a estabilidade da vitamina C depende diretamente da composição e da estrutura do sistema em que está incorporada.

A maior estabilidade observada para a formulação com xantana pode estar relacionada à capacidade desse polímero de formar uma matriz mais viscosa e estruturada, dificultando a difusão do oxigênio e reduzindo a exposição direta da vitamina C à radiação. Esse resultado também pode ser relacionado ao estudo de Li et al. (2025), no qual o revestimento de lipossomas de ácido ascórbico com goma xantana aumentou a eficiência de encapsulação e melhorou a estabilidade do sistema. Assim, os dados obtidos no presente estudo sugerem que a xantana favoreceu a formação de um ambiente mais protetor para a vitamina C do extrato de camu-camu.

A variação de pH também foi mais evidente após a exposição à radiação UV. Na formulação com goma arábica, houve aumento do pH de 3,07 para 3,41, enquanto no extrato livre a alteração foi mais acentuada, passando de 2,01 para 3,91. Ahmad et al. (2011) demonstraram que a fotodegradação do ácido ascórbico pode ser influenciada pelo pH, pela concentração do ativo, pela viscosidade do meio e pelas características da formulação. Assim, a alteração de pH observada no extrato livre pode estar relacionada às modificações químicas ocorridas durante a exposição à radiação UV, embora análises complementares sejam necessárias para estabelecer essa relação diretamente.

Comparando as duas condições de exposição, observa-se que a radiação UV promoveu degradação mais intensa da vitamina C, principalmente no extrato livre e na formulação contendo goma arábica. A formulação com xantana, entretanto, manteve elevada retenção tanto sob luz branca quanto sob radiação ultravioleta, com 96,34% e 93,55% de vitamina C remanescente, respectivamente. Esses resultados indicam que a nanoencapsulação foi eficiente para melhorar a fotoestabilidade da vitamina C presente no extrato de camu-camu, sendo a matriz de xantana a mais promissora entre as formulações avaliadas.

Considerando o conjunto dos resultados obtidos até essa etapa, a formulação de goma xantana contendo extrato de camu-camu apresentou o melhor desempenho global entre os sistemas avaliados, reunindo características favoráveis de tamanho, distribuição das partículas, estabilidade coloidal, morfologia e proteção da vitamina C nos ensaios de fotoestabilidade. Além disso, devido ao tempo disponível para a conclusão das análises, foi necessário priorizar uma das formulações para a continuidade do estudo. Assim, com base no desempenho observado, a formulação de goma xantana foi selecionada para as etapas posteriores, incluindo a caracterização por FTIR, a determinação da eficiência aparente de encapsulamento e o ensaio de liberação controlada.

6.5 Análise FTIR

A caracterização por FTIR comparou o extrato de camu-camu, a formulação de xantana vazia e a formulação de xantana contendo extrato, conforme a Figura 15. As principais bandas e suas atribuições estão apresentadas na Tabela 6.

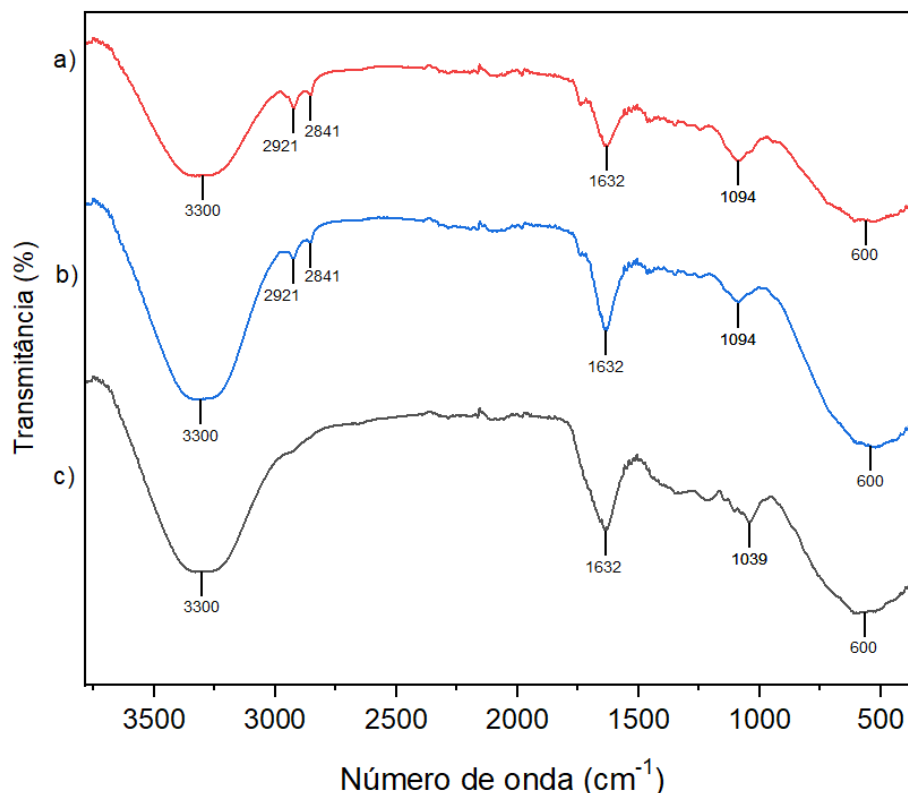
As diferenças de intensidade, formato e posição das bandas foram examinadas como possíveis indícios de interação ou sobreposição entre os constituintes do extrato e a matriz de xantana. A análise contribuiu para a caracterização química das formulações, mas não foi utilizada como comprovação direta de encapsulamento.

Tabela 6 - Principais grupos químicos encontrados nos espectros de FTIR do extrato de camu-camu, nanocápsulas carregadas com extrato de camu-camu e nanocápsulas vazias.

Espectros FTIR	Número de ondas (cm ⁻¹)	Atribuição
Nanocápsulas Vazias	3200-3400	Estiramento O–H — xantana e água adsorvida
	2921	Estiramento C–H assimétrico — óleo/Tween 80
	2841	Estiramento C–H simétrico — óleo/Tween 80
	1632	Estiramento COO ⁻ — xantana e água adsorvida
	1094	Estiramento C–O–C/C–O — matriz de xantana
	600	Deformações C–O, C–C e C–H
Nanopartículas de xantana carregadas com extrato de Camu-Camu	3200-3400	Estiramento O–H — xantana, água e compostos do extrato
	2921	Estiramento C–H assimétrico — óleo/Tween 80
	2841	Estiramento C–H simétrico — óleo/Tween 80
	1632	Estiramento C=O/COO ⁻ — xantana e compostos do extrato
	1094	Estiramento C–O–C/C–O — matriz de xantana
	~600	Deformações C–O, C–C e C–H
Extrato de Camu-camu	3200–3400	Estiramento O–H — água, vitamina C, açúcares e fenólicos
	1632	Estiramento C=O/COO ⁻ — ácidos orgânicos e vitamina
	1039	Estiramento C–O — açúcares, vitamina C e ácidos orgânicos
	~600	Estiramento C–O — açúcares, vitamina C e ácidos orgânicos

Fonte – Autor, 2026

Figura 15 - Espectros de FTIR das amostras: (a) nanocápsulas de xantana vazias; (b) nanocápsulas de xantana carregadas com extrato de camu-camu; e (c) extrato de camu-camu livre.



Fonte – Autor, 2026

O espectro da nanocápsula de xantana vazia apresentou bandas em aproximadamente 2921 e 2841 cm^{-1} , as quais também foram observadas no espectro da nanocápsula de xantana contendo extrato de camu-camu. Essas bandas são atribuídas aos modos vibracionais de estiramento C–H assimétrico e simétrico de grupos CH_2 e CH_3 , respectivamente. De acordo com Matwiczuk *et al.* (2019), bandas próximas de 2922 e 2852 cm^{-1} são características de vibrações C–H de grupos alifáticos presentes em triglicerídeos. Além disso, Carter *et al.* (2023) também relataram bandas em 2923 e 2864 cm^{-1} no Tween 80, relacionadas às absorções de CH_2 e CH_3 . Dessa forma, a presença dessas bandas nas nanocápsulas pode estar relacionada principalmente à fase oleosa e ao surfactante utilizados na formulação. No espectro do extrato de camu-camu livre, essas bandas não foram evidentes, indicando que essa região está mais associada aos constituintes da nanocápsula do que ao extrato.

Ao analisar a região entre 3200 e 3400 cm^{-1} , observou-se uma banda larga em todos os espectros. Essa banda é atribuída ao estiramento de grupos hidroxila (O–H), podendo estar relacionada à água adsorvida, aos grupos hidroxila da goma xantana e aos compostos hidroxilados do extrato de camu-camu, como vitamina C, açúcares e compostos fenólicos. Yuan *et al.* (2022) observaram, para a goma xantana, uma banda larga entre 3200 e 3500 cm^{-1} associada ao estiramento O–H. Além disso, García-Chacón *et al.* (2023) destacam que o camu-camu apresenta compostos bioativos importantes, como vitamina C, compostos fenólicos e carotenoides. Portanto, essa banda não deve ser considerada exclusiva do extrato de camu-camu, uma vez que também foi

observada na nanocápsula de xantana vazia.

Na região próxima de 1632 cm^{-1} , foi observada banda nos espectros do extrato de camu-camu e das nanocápsulas. Essa banda pode estar associada à sobreposição de vibrações de grupos carbonila (C=O), carboxilatos (COO^-) e deformação angular da água adsorvida. Para a goma xantana, Yuan *et al.* (2022) relataram bandas próximas de 1600 cm^{-1} associadas a vibrações assimétricas de grupos carboxílicos. No caso do extrato de camu-camu, essa região pode receber contribuição dos ácidos orgânicos e da vitamina C, uma vez que o ácido ascórbico apresenta grupos hidroxila e carbonila em sua estrutura, conforme discutido por Panicker, Varghese e Philip (2006). Assim, alterações de intensidade ou de formato nessa banda, quando comparados os espectros da nanocápsula vazia e da nanocápsula contendo camu-camu, são compatíveis com a contribuição dos compostos do extrato e com a sobreposição de bandas da matriz polimérica.

Outra região relevante foi observada entre 1200 e 900 cm^{-1} . No extrato de camu-camu, destacou-se a banda em aproximadamente 1039 cm^{-1} , atribuída ao estiramento de ligações C-O , relacionadas a açúcares, ácido ascórbico e ácidos orgânicos. Nas nanocápsulas de xantana, foi observada banda em torno de 1094 cm^{-1} , atribuída aos estiramentos C-O-C e C-O característicos da matriz polissacarídica. Yuan *et al.* (2022) relataram bandas em 1050 e 1022 cm^{-1} associadas às vibrações C-O e C-O-C de ligações glicosídicas da goma xantana. Dessa forma, na nanocápsula contendo camu-camu, a alteração observada nessa região pode ser atribuída à sobreposição entre as bandas da xantana e dos compostos presentes no extrato.

A região próxima de 600 cm^{-1} também foi observada nos espectros, sendo atribuída a vibrações de baixa frequência e deformações de ligações C-O , C-C e C-H . No entanto, por se tratar de uma região pouco específica, essa banda foi considerada apenas complementar na interpretação dos espectros, não sendo utilizada isoladamente como indicativo da presença do extrato.

De modo geral, os espectros evidenciaram bandas características dos componentes das formulações. As diferenças observadas nas regiões de 1632 cm^{-1} e $1094\text{-}1039\text{ cm}^{-1}$ são compatíveis com possíveis interações entre os constituintes e com a sobreposição de suas contribuições espectrais. Esses resultados auxiliam na caracterização química, mas não permitem, isoladamente, comprovar o encapsulamento ou localizar os compostos do extrato no interior das partículas.

6.6 Eficiência de Encapsulamento

Após a caracterização por espalhamento dinâmico de luz (DLS) e Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET), determinou-se a eficiência aparente de encapsulamento da formulação de goma xantana contendo extrato de camu-camu. Para essa etapa, utilizou-se a curva analítica do extrato apresentada na Figura 14, cuja regressão linear originou a Equação 2. A equação foi empregada para estimar a concentração equivalente de extrato livre no sobrenadante e calcular a

fração associada ao sistema.

$$\text{Concentração do ativo livre} = \frac{A_{240} + 0,0018}{0,0357} \quad (\text{Equação 2})$$

A elevada eficiência observada pode estar relacionada à composição do sistema polimérico e às interações entre os grupos funcionais da matriz encapsulante e os constituintes do extrato de camu-camu. A presença de grupos hidroxila, carboxila e carbonila nas estruturas poliméricas pode favorecer interações por ligações de hidrogênio e forças eletrostáticas com a vitamina C e outros compostos presentes no extrato, contribuindo para maior retenção do bioativo no interior ou na interface das partículas. Esse comportamento também é coerente com os resultados obtidos por DLS e MEV, que indicaram a formação de partículas em escala nanométrica, com distribuição relativamente homogênea e morfologia compatível com sistemas nanoencapsulados.

Resultados semelhantes foram relatados por Guena (2019), que avaliou a encapsulação de vitamina C por emulsificação dupla seguida de coacervação complexa, utilizando goma xantana associada à lactoferrina ou à gelatina tipo A como material de parede. A autora obteve eficiências de encapsulação de $83,19 \pm 0,37\%$ para o sistema xantana/lactoferrina e $73,60 \pm 0,71\%$ para o sistema xantana/gelatina, demonstrando o potencial da goma xantana na formação de matrizes protetoras para o ácido ascórbico. Comparativamente, a eficiência obtida neste estudo foi superior aos valores relatados pela autora, o que pode estar associado às diferenças no método de preparo, na composição da matriz polimérica, na proporção entre ativo e material encapsulante e na própria natureza do extrato de camu-camu utilizado.

De forma complementar, Li et al. (2025) observaram que o revestimento de lipossomas contendo ácido ascórbico com goma xantana aumentou a eficiência de encapsulação de 29,7% para 76,2%, além de melhorar a estabilidade do sistema em condições simuladas do trato gastrointestinal. Esse resultado reforça a importância da xantana como agente estabilizante, uma vez que sua presença pode reduzir a mobilidade da estrutura carreadora e dificultar a difusão do ácido ascórbico para o meio externo. Embora o sistema utilizado por esses autores seja lipossomal, e não uma nanocápsula polimérica semelhante à deste estudo, os dados demonstram que a incorporação da xantana favorece a retenção da vitamina C em sistemas nanoestruturados.

Cheng et al. (2024), ao desenvolverem nanofibras de pullulan/goma xantana carregadas com vitamina C, também relataram alta eficiência de encapsulação, com valores de 85,71%, 88,23% e 94,48%, dependendo da concentração de vitamina C incorporada. Esses resultados se aproximam do valor obtido neste trabalho e indicam que sistemas baseados em polissacarídeos contendo goma xantana podem apresentar elevada afinidade pela vitamina C, especialmente pela possibilidade de formação de interações intermoleculares entre os grupos hidroxila dos polímeros

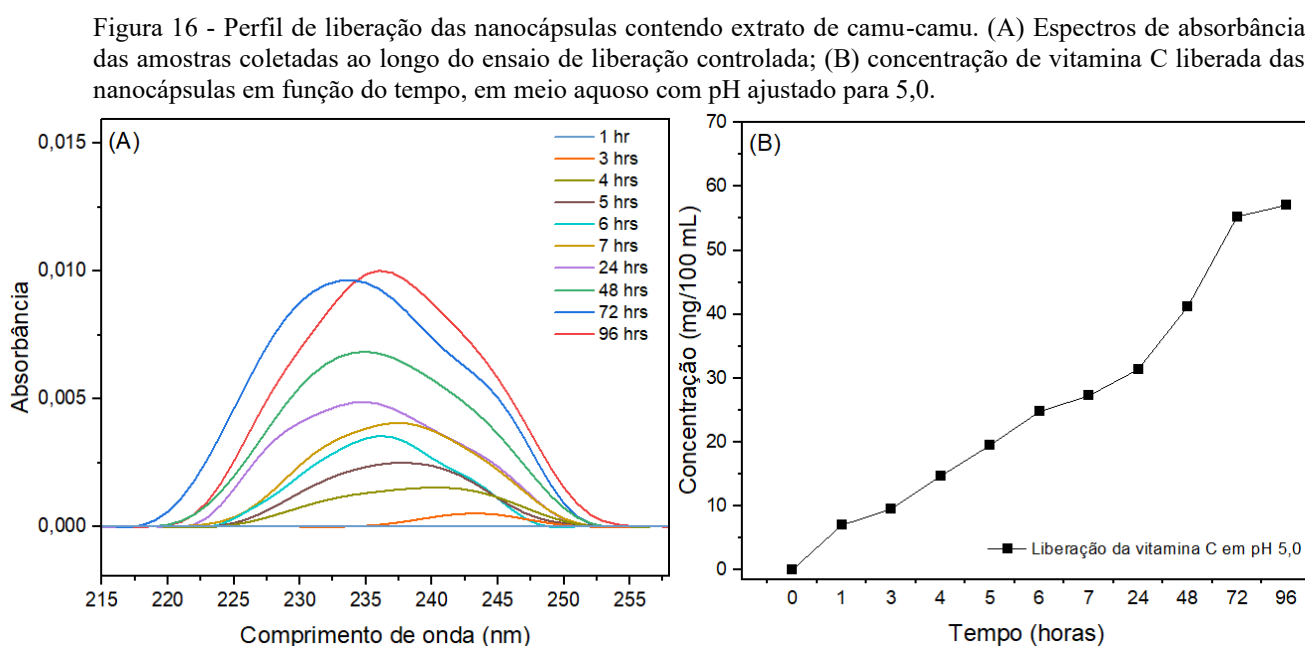
e os grupos funcionais do ácido ascórbico.

Assim, a eficiência de encapsulamento aparente de $92 \pm 5\%$ obtida neste estudo pode ser considerada elevada e compatível com os melhores resultados descritos na literatura para sistemas contendo goma xantana e vitamina C. Esse desempenho reforça o potencial das nanocápsulas desenvolvidas como sistemas de proteção da vitamina C proveniente do camu-camu, contribuindo para maior estabilidade do composto bioativo e para a modulação do seu perfil de liberação em meio aquoso.

6.7 Ensaio de Liberação controlada

O ensaio de liberação controlada foi conduzido em meio aquoso tamponado a pH 5,0, condição selecionada por representar uma faixa levemente ácida, compatível com aplicações tópicas. O objetivo dessa avaliação foi investigar o comportamento de liberação da vitamina C proveniente do extrato de camu-camu nanoencapsulado, verificando a capacidade da matriz de goma xantana em reter o composto bioativo e disponibilizá-lo gradualmente ao longo do tempo.

Os perfis de liberação das nanocápsulas de goma xantana contendo extrato de camu-camu estão apresentados na Figura 16. Na Figura 16A são mostrados os espectros de absorvância obtidos na região do ultravioleta para as amostras coletadas ao longo do ensaio, enquanto a Figura 16B apresenta a concentração de vitamina C liberada em função do tempo, determinada a partir da curva analítica previamente construída para o ácido ascórbico.



Fonte – Autor, 2026

O ensaio de liberação controlada foi conduzido em meio aquoso tamponado a pH 5,0, condição selecionada por representar uma faixa levemente ácida, compatível com aplicações tópicas. O objetivo dessa avaliação foi investigar o comportamento de liberação da vitamina C

proveniente do extrato de camu-camu nanoencapsulado, verificando a capacidade da matriz de goma xantana em reter o composto bioativo e disponibilizá-lo gradualmente ao longo do tempo.

O acompanhamento do ensaio foi iniciado nos primeiros 15 minutos, com coletas realizadas em intervalos de 15 minutos até completar 1 hora de análise. Entretanto, nesses tempos iniciais não foi observada liberação expressiva da vitamina C para o meio receptor, sendo os sinais analíticos muito reduzidos ou próximos ao limite de detecção do método. Por esse motivo, optou-se por apresentar e discutir os resultados a partir de 3 horas de ensaio, momento em que a liberação passou a ser mais evidente e permitiu melhor acompanhamento do comportamento da nanoformulação ao longo do tempo.

De modo geral, observou-se um perfil de liberação lento e progressivo durante as 96 horas de avaliação. Nas primeiras horas do ensaio, as concentrações de vitamina C detectadas no meio receptor foram reduzidas, indicando ausência de liberação inicial intensa, também conhecida como efeito “burst”. Esse comportamento sugere que a vitamina C não se encontrava predominantemente adsorvida na superfície das partículas, mas sim retida no interior ou associada à matriz polimérica da nanoformulação. Com o decorrer do tempo, houve aumento gradual da concentração liberada, alcançando 57,08 mg/100 mL após 96 horas.

Considerando o teor inicial de vitamina C determinado para a nanoformulação, correspondente a 613,62 mg/100 mL, a liberação acumulada ao final do ensaio representou aproximadamente 9,30% do conteúdo total. Esse resultado indica que a maior parte da vitamina C permaneceu retida na estrutura das nanocápsulas durante o período avaliado. Dessa forma, o sistema desenvolvido apresentou comportamento compatível com uma matriz de liberação prolongada, capaz de reduzir a difusão imediata do ativo para o meio externo.

A eficiência de encapsulamento estimada em $92 \pm 5\%$ reforça a elevada capacidade de incorporação do extrato de camu-camu pelas nanocápsulas de goma xantana. A associação entre alta eficiência de encapsulamento e baixa liberação acumulada sugere que a matriz polimérica contribuiu para a proteção e retenção da vitamina C. Esse comportamento pode estar relacionado à formação de uma rede hidratada de xantana, capaz de dificultar a difusão do ácido ascórbico para o meio receptor. Além disso, possíveis interações por ligações de hidrogênio e forças não covalentes entre os grupos hidroxila da xantana e os compostos presentes no extrato podem ter contribuído para a menor mobilidade do ativo.

Resultados semelhantes foram descritos por Figueiredo et al. (2020), ao avaliarem a liberação controlada de compostos bioativos de extratos de camu-camu microencapsulados com biopolímeros prebióticos. Os autores observaram que a liberação do ácido ascórbico e das antocianinas foi influenciada pelo tipo de material encapsulante e pela temperatura, sendo descrita pelo modelo de Korsmeyer-Peppas, com mecanismo predominantemente associado à difusão Fickiana. Embora o sistema utilizado pelos autores tenha sido obtido por spray drying e não por nanoencapsulação em goma xantana, o estudo confirma que a matriz polimérica exerce papel

determinante na retenção e na liberação gradual dos compostos bioativos do camu-camu.

O comportamento observado também está de acordo com o estudo de Baek et al. (2021), que desenvolveram nanocápsulas de vitamina C utilizando quitosana modificada e nanocristais de celulose. Nesse trabalho, os autores obtiveram eficiência de encapsulamento de $90,3 \pm 0,42\%$ e liberação sustentada ao longo de 14 dias, sendo que um dos sistemas avaliados liberou cerca de 10% da vitamina C nesse período. Esse resultado é particularmente relevante para a presente pesquisa, pois se aproxima da liberação acumulada de 9,30% observada em 96 horas, indicando que sistemas nanoestruturados com matrizes poliméricas podem promover forte retenção da vitamina C e liberação prolongada.

A influência da xantana na proteção de vitamina C também foi evidenciada por Li et al. (2025), que avaliaram lipossomas contendo ácido ascórbico revestidos com goma xantana. Os autores observaram aumento da eficiência de encapsulamento após o revestimento com xantana, além de maior estabilidade do sistema. Esse comportamento foi atribuído à presença da xantana na superfície das partículas e à formação de interações não covalentes, como ligações de hidrogênio e forças eletrostáticas. Esses resultados reforçam a hipótese de que a goma xantana atua como barreira difusional e contribui para reduzir a perda ou liberação imediata do ácido ascórbico.

Comparativamente, Luís et al. (2021) avaliaram nanopartículas poliméricas contendo ácido ascórbico e observaram que a encapsulação retardou a liberação do composto em relação à forma livre. No sistema de PCL, por exemplo, foi relatada liberação de aproximadamente 42% do ácido ascórbico após 480 minutos, com mecanismo descrito pelo modelo de Korsmeyer-Peppas e difusão através da matriz polimérica. Em comparação com esse estudo, as nanocápsulas de xantana contendo extrato de camu-camu apresentaram liberação ainda mais lenta, o que pode estar associado à composição da matriz, ao pH do meio, à natureza hidrofílica da xantana e à possível interação entre a vitamina C e os demais constituintes do extrato.

A liberação gradual observada pode ser considerada vantajosa para aplicações que demandem proteção prolongada da vitamina C, uma vez que reduz a exposição imediata do composto ao meio externo e pode minimizar processos de degradação associados à sua elevada sensibilidade à luz, ao oxigênio, à temperatura e às variações de pH. Além disso, a manutenção de concentrações reduzidas e contínuas do ativo ao longo do tempo pode contribuir para prolongar sua disponibilidade após a aplicação.

Entretanto, deve-se considerar que o ensaio foi realizado em sistema simplificado, composto por meio aquoso tamponado. Assim, fatores presentes em sistemas biológicos reais, como enzimas, proteínas, lipídios, sais e componentes da superfície cutânea, não foram reproduzidos experimentalmente. Esses constituintes podem influenciar a hidratação da matriz, a difusão do ativo, a estabilidade do ácido ascórbico e a degradação da estrutura polimérica. Dessa forma, estudos adicionais utilizando modelos mais complexos, como membranas sintéticas, pele

artificial ou ensaios *ex vivo*, poderão fornecer informações complementares sobre o comportamento das nanocápsulas em condições mais próximas da aplicação final.

De modo geral, os resultados obtidos demonstram que as nanocápsulas de goma xantana contendo extrato de camu-camu apresentaram elevada eficiência de encapsulamento e perfil de liberação prolongada da vitamina C. A baixa liberação acumulada após 96 horas evidencia a capacidade da matriz polimérica em reter e proteger o composto bioativo, indicando o potencial do sistema nanoencapsulado como estratégia para aumentar a estabilidade e controlar a disponibilização de vitamina C proveniente de uma fonte natural amazônica.

7. APLICAÇÕES POTENCIAIS DOS SISTEMAS NANOENCAPSULADOS

A caracterização dos sistemas nanoencapsulados desenvolvidos neste estudo permitiu identificar propriedades relevantes para sua possível utilização em diferentes matrizes. Os resultados de eficiência de encapsulamento, fotoestabilidade e liberação controlada mostraram associação aparente do extrato às formulações e diferenças de estabilidade e liberação nas condições avaliadas. Com base nesses achados, podem ser consideradas aplicações futuras em alimentos funcionais, suplementos nutricionais e formulações farmacêuticas, embora o uso efetivo dos sistemas ainda dependa de estudos adicionais de estabilidade, segurança e desempenho.

No âmbito alimentício, uma das principais perspectivas consiste na utilização das nanocápsulas como sistemas de incorporação de vitamina C em produtos funcionais. O camu-camu apresenta reconhecido interesse nutricional em razão de seu elevado teor de ácido ascórbico e da presença de outros compostos bioativos, constituindo matéria-prima relevante para o desenvolvimento de ingredientes funcionais de origem amazônica (García-Chacón *et al.*, 2023). Entretanto, a vitamina C é suscetível à degradação durante o processamento e o armazenamento, especialmente quando exposta ao oxigênio, à luz, à temperatura elevada e a condições inadequadas de pH (Herbig; Renard, 2017; Maurya *et al.*, 2023). Nesse contexto, a encapsulação pode atuar como estratégia de proteção, reduzindo o contato direto do composto com fatores degradantes.

As suspensões nanoencapsuladas poderiam ser avaliadas em bebidas à base de frutas, sucos, néctares, bebidas lácteas, iogurtes, preparações em gel e sobremesas refrigeradas. A utilização em produtos submetidos a condições térmicas brandas seria inicialmente mais adequada, visto que a resistência das nanocápsulas desenvolvidas ao aquecimento ainda não foi determinada. Estudos com sistemas lipossomais demonstraram que a encapsulação pode aumentar a estabilidade do ácido ascórbico em sistemas-modelo e matrizes alimentícias (Wechtersbach *et al.*, 2012). Também foi observada maior retenção de vitamina C microencapsulada em produtos submetidos ao forneamento, em comparação à forma livre, embora o desempenho dependa do método empregado e das condições de processamento (Alvim *et al.*, 2016).

A aplicação em alimentos deverá considerar possíveis alterações na viscosidade, textura, coloração, acidez, aroma e sabor. Desse modo, estudos futuros deverão estabelecer a concentração

adequada das suspensões em cada matriz e avaliar a compatibilidade entre os ingredientes, a estabilidade físico-química e microbiológica, a vida de prateleira e a aceitação sensorial. A escolha da embalagem também deverá considerar a necessidade de barreira à luz e ao oxigênio, em razão da sensibilidade do ácido ascórbico a esses fatores.

Outra possibilidade corresponde ao desenvolvimento de suplementos nutricionais contendo vitamina C proveniente do camu-camu. As suspensões poderiam ser avaliadas em apresentações líquidas, como gotas, soluções concentradas, ampolas bebíveis ou bebidas do tipo *shot*. Sistemas constituídos por polissacarídeos contendo goma xantana já foram investigados para o transporte de vitamina C em filmes orais de rápida dissolução, indicando a viabilidade tecnológica desse tipo de matriz para aplicações nutricionais (Cheng *et al.*, 2024).

As suspensões também poderiam ser convertidas em produtos secos por liofilização ou secagem por aspersão, possibilitando sua incorporação em cápsulas, sachês, comprimidos ou pós para reconstituição. Essa alternativa requer a avaliação da retenção da vitamina C, da manutenção da estrutura das partículas e da capacidade de redispersão do pó. Em formulações lipossomais, a secagem por aspersão permitiu a obtenção de vitamina C em pó sem comprometimento significativo das características do carreador, embora esses resultados não possam ser diretamente transferidos para sistemas poliméricos distintos (Žmuda *et al.*, 2024).

No campo farmacêutico, os sistemas desenvolvidos poderiam ser investigados como veículos para formulações orais. A associação do composto à matriz encapsulante e o comportamento observado no ensaio de liberação indicam a possibilidade de retardar sua passagem para o meio externo. Nanocápsulas baseadas em quitosana e nanocristais de celulose foram capazes de proteger e controlar a liberação da vitamina C, enquanto o revestimento de lipossomas com goma xantana aumentou a retenção do ácido ascórbico em condições gastrointestinais simuladas (Baek *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2025). Contudo, os resultados deste estudo não permitem afirmar que houve aumento da absorção ou da biodisponibilidade da vitamina C, sendo necessários ensaios de digestão gastrointestinal simulada, bioacessibilidade, permeação intestinal e avaliações *in vivo*.

Outra perspectiva futura consiste na incorporação das nanocápsulas em formulações tópicas, como géis, cremes e emulsões. A vitamina C participa da proteção antioxidante da pele e da síntese de colágeno, justificando seu interesse em produtos dermatológicos e cosméticos (Pullar *et al.*, 2017). Entretanto, sua aplicação tópica apresenta limitações relacionadas à estabilidade e à penetração cutânea. Portanto, a utilização dos sistemas desenvolvidos nessa categoria de produto exigiria estudos de compatibilidade com a base farmacêutica, estabilidade da formulação, liberação do composto, permeação e retenção cutânea, citotoxicidade e potencial irritante (Stamford, 2012).

De modo geral, os sistemas nanoencapsulados desenvolvidos apresentam potencial para ampliar a utilização tecnológica do camu-camu como fonte natural de vitamina C. As perspectivas

incluem produtos alimentícios funcionais, suplementos nutricionais líquidos ou secos e formulações farmacêuticas de uso oral ou tópico. Antes de sua aplicação comercial, serão necessários estudos de estabilidade prolongada, resistência ao processamento, segurança, digestão gastrointestinal, biodisponibilidade e avaliação sensorial. Essas análises permitirão definir as condições mais adequadas de aplicação e confirmar a viabilidade tecnológica dos sistemas nanoencapsulados.

8 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstraram que o suco de camu-camu apresentou elevado potencial como fonte natural de vitamina C, confirmando a relevância dessa matriz amazônica para o desenvolvimento de sistemas tecnológicos voltados à proteção de compostos bioativos sensíveis;

Entre as condições de nanofiltração avaliadas, a combinação de 14 bar e 400 rpm apresentou teor médio de 1809,38 mg/100 mL e aumento de 66,19% em relação ao suco pré-tratado. Como pressão e rotação variaram simultaneamente, o resultado caracteriza a combinação operacional e não o efeito isolado de um parâmetro.

As formulações produzidas por homogeneização de alta pressão apresentaram diâmetros hidrodinâmicos médios entre 136,6 e 149,0 nm, situados na faixa submicrométrica. O tamanho foi interpretado em conjunto com PDI, potencial zeta e morfologia.

A formulação contendo goma xantana e extrato de camu-camu apresentou o melhor desempenho entre os sistemas avaliados, com menor tamanho médio de partícula, PDI de 0,212 e potencial zeta de -39,6 mV. Esses resultados indicam maior homogeneidade, melhor estabilidade coloidal e menor tendência à agregação quando comparados à formulação contendo goma arábica;

A MET permitiu comparar a morfologia das formulações e mostrou partículas mais arredondadas e visualmente mais dispersas na formulação de xantana com extrato. O DLS forneceu o diâmetro hidrodinâmico e a distribuição de tamanho. O FTIR mostrou bandas características dos componentes e alterações compatíveis com possíveis interações ou sobreposição espectral, mas não comprovou isoladamente o encapsulamento nem a localização do extrato nas partículas.

A eficiência aparente de encapsulamento da formulação de xantana foi estimada em $92 \pm 5\%$. Pelo método indireto utilizado, o valor indica baixa resposta analítica na fração livre após a centrifugação e sustenta a associação aparente do extrato ao sistema.

Os ensaios de fotoestabilidade demonstraram que a nanoencapsulação foi eficiente na proteção da vitamina C, principalmente quando utilizada a goma xantana como matriz encapsulante. Sob luz branca, a formulação de xantana manteve 96,34% da vitamina C inicial, enquanto sob radiação ultravioleta manteve 93,55%. Esses resultados foram superiores aos observados para a goma arábica e para o extrato livre, evidenciando a maior capacidade protetora da xantana frente à fotodegradação;

No ensaio de liberação controlada demonstrou que as nanocápsulas de xantana contendo extrato de camu-camu apresentaram liberação lenta e progressiva em meio tamponado a pH 5,0. A liberação acumulada ao final de 96 horas foi de 57,08 mg/100 mL, correspondente a aproximadamente 9,30% do teor inicial presente na nanoformulação, indicando que a maior parte da vitamina C permaneceu retida na matriz polimérica durante o período avaliado;

De modo geral, a combinação de nanofiltração e formulações poliméricas apresentou potencial para concentrar e proteger a vitamina C do camu-camu. Entre os sistemas avaliados, a formulação com goma xantana reuniu menor diâmetro hidrodinâmico, PDI de 0,212, potencial zeta de -39,6 mV e maior retenção aparente nos ensaios realizados.

Assim, o sistema desenvolvido apresenta potencial para aplicação em produtos funcionais, nutracêuticos e cosméticos que demandem maior estabilidade e disponibilização gradual de vitamina C. Recomenda-se, entretanto, que estudos futuros sejam realizados em sistemas mais complexos, como membranas sintéticas, pele artificial, ensaios ex vivo ou matrizes alimentares reais, a fim de avaliar o comportamento das nanocápsulas em condições mais próximas da aplicação final.

9 REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

ALVIM, Izabela Dutra *et al.* Comparison between the spray drying and spray chilling microparticles contain ascorbic acid in a baked product application. *LWT – Food Science and Technology*, v. 65, p. 689–694, 2016. DOI: 10.1016/j.lwt.2015.08.049.

ABBAS, S.; DA WEI, C.; HAYAT, K.; ZHANG, X. Ascorbic acid: Microencapsulation techniques and trends—A review. *Food Reviews International*, v. 28, n. 4, p. 343–374, 2012.

ABDEL-RASHID, R. S. *et al.* Polymeric versus lipid nanocapsules for miconazole nitrate enhanced topical delivery: in vitro and ex vivo evaluation. *Drug Delivery*, v. 29, n. 1, p. 294–304, 17 jan. 2022.

ABOUREHAB, M. A. S. *et al.* Alginate as a Promising Biopolymer in Drug Delivery and Wound Healing: A Review of the State-of-the-Art. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 23, n. 16, p. 9035, 12 ago. 2022.

ABRANCHES, M.; DELLA LUCIA, C. M.; SARTORI, M.; SANT'ANA, H. Perdas de vitaminas em leite e produtos lácteos e possíveis medidas de controle. *Alimentos e Nutrição*, v. 19, 2009.

ACOSTA, Ó. *et al.* Concentration of Polyphenolic Compounds in Blackberry (*Rubus Adenotrichos* Schltdl.) Juice by Nanofiltration. *Journal of food process engineering*, v. 40, n. 1, 2017.

AGNIHOTRI, S. A.; PANPALIA, G. M. Optimization of disodium edetate and few potent antioxidants requirement for the stabilization of vitamin C in solution. *Indian Journal of Pharmaceutical Sciences*, v. 66, n. 1, p. 56, 2023.

AGUIAR, J. P. L.; SOUZA, F. C. A. Camu-camu (*Myrciaria dubia* HBK): processamento de iogurte, formulação e avaliação sensorial. *ResearchGate*, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/274304110_Camu-Camu_Myrciaria_dubia_HBK_Yogurt_Processing_Formulation_and_Sensory_Assessment. Acesso em: 3 maio 2025.

AH-HEN, K. *et al.* Anthocyanin Retention of Cranberry (*Vaccinium macrocarpon*) Juice Subjected to Different Nanofiltration Conditions. *Journal of Chemistry*, v. 2017, p. 1–7, 2017.

AHMAD, I. *et al.* Photostability and interaction of ascorbic acid in cream formulations. *AAPS PharmSciTech*, v. 12, n. 3, p. 917–923, 2011. DOI: 10.1208/s12249-011-9659-1.

AKKARACHANEYAKORN, S.; TINRAT, S. Effects of types and amounts of stabilizers on physical and sensory characteristics of cloudy ready-to-drink mulberry fruit juice. *Food Science & Nutrition*, v. 3, n. 3, p. 213–220, 26 fev. 2015.

ALFREDO, C.; CARMELA, C.; ENRICO, D. Membrane-based operations and integrated membrane systems in fruit juice processing. In: *Membrane Engineering*. p. 255–288, 17 dez. 2018.

AL-HAMAYDA, A. et al. Advances in microencapsulation techniques using Arabic gum: A comprehensive review. *Industrial Crops and Products*, v. 205, p. 117556, 1 dez. 2023.

AMORIM, M. T. S. P. et al. Recent trends and challenges on membrane processes applied to functional compounds recovery and concentration from fruit juices. *Membranes*, v. 11, n. 5, p. 345, 2021.

ARRIOLA, N. A. et al. Potential of nanofiltration for the concentration of bioactive compounds from watermelon juice. *International Journal of Food Science & Technology*, v. 49, n. 9, p. 2052–2060, 3 mar. 2014.

ATAIDE, J. A. et al. Co-encapsulation of drugs for topical application—A review. *Molecules*, v. 28, n. 3, p. 1449, 2 fev. 2023.

AVELINO, D.D. . universidade federal do triângulo mineiro dewelyn dias avelino níveis séricos de vitamina c em adultos com diferentes graus de estado nutricional, segundo o método da avaliação global subjetiva uberaba 2018. [s.l.: s.n.], 2018.

BAEK, Jiyoo *et al.* Encapsulation and controlled release of vitamin C in modified cellulose nanocrystal/chitosan nanocapsules. *Current Research in Food Science*, v. 4, p. 215–223, 2021. DOI: 10.1016/j.crfs.2021.03.010.

BAIERLE, M. et al. Quantificação sérica de vitamina C por CLAE-UV e estudo de estabilidade. *Química Nova*, São Paulo, v. 35, n. 2, p. 370–374, 2012. DOI: 10.1590/S0100-40422012000200030.

BANDEHALI S., et al. A planned review on designing of high-performance nanocomposite nanofiltration membranes for pollutants removal from water. v. 101, p. 78–125, 1 set. 2021.

BAŃKOSZ, M. Physicochemical characterization and kinetics study of polymer carriers with vitamin C for controlled release applications. *Materials*, v. 17, n. 22, p. 5502, 12 nov. 2024.

BARGEMAN, G. Recent developments in the preparation of improved nanofiltration membranes for extreme pH conditions. *Separation and Purification Technology*, v. 279, p. 119725, dez. 2021.

BARRA, P. A. et al. Spray-drying performance and thermal stability of L-ascorbic acid microencapsulated with sodium alginate and gum arabic. *Molecules*, v. 24, n. 16, p. 2872, 2019.

BERGMANN, A. R. Benefícios do consumo de frutas fontes de vitamina C para o fortalecimento do sistema imunológico, associado ao COVID-19: uma revisão de literatura. *Revista Thema*, v. 20, p. 102–111, 2021. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/352533509>. Acesso em: 2 maio 2025.

BERTIN, R. L.; SCHULZ, M.; AMANTE, E. R. Estabilidade de vitaminas no processamento de alimentos: uma revisão. *Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos*, v. 34, n. 2, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5380/cep.v34i2.53177>

BEZERRA, F. M. et al. Controlled release of microencapsulated citronella essential oil on cotton and polyester matrices. *Cellulose*, v. 23, n. 2, p. 1459–1470, 2016.

BHADRAN, A. et al. Recent advances in polycaprolactones for anticancer drug delivery. *Pharmaceutics*, v. 15, n. 7, p. 1977, 19 jul. 2023.

BHATTACHARJEE, C.; SAXENA, V. K.; DUTTA, S. Fruit juice processing using membrane technology: a review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, v. 43, p. 136–153, out. 2017.

BISWAS, R. et al. Chitosan and its derivatives as nanocarriers for drug delivery. *Molecules*, v. 30, n. 6, p. 1297, 13 mar. 2025.

BRITO, D. et al. Analysis of thermal and aqueous suspension stabilities of chitosan-based nanoencapsulated vitamins. *Química Nova*, v. 39, n. 9, p. 1094–1099, 2016.

CARITÁ, A. C. et al. Vitamin C: One compound, several uses. Advances for delivery, efficiency and stability. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, v. 24, p. 102117, 2020. DOI: 10.1016/j.nano.2019.102117

CARTER, Joseph L. et al. Processing optimization of PEDOT and PEDOT/Tween 80 films. *Polymer Journal*, v. 55, p. 253–260, 2023. DOI: 10.1038/s41428-022-00740-x.

CASTRO-MUÑOZ, R. Nanofiltration-assisted concentration processes of phenolic fractions and carotenoids from natural food matrices. *Separations*, v. 11, n. 2, p. 64, 19 fev. 2024.

CHENG, En et al. Development of vitamin C-loaded electrospun nanofibers of mixture of polysaccharides of pullulan/xanthan gum for fast dissolving oral film applications. *Materials*, v. 17, n. 4, art. 861, 2024. DOI: 10.3390/ma17040861.

CHO, B. O.; AHN, J. Y. Cross-flow filtration technique for effective membrane performance: a comprehensive review. *Journal of Membrane Science and Research*, v. 4, n. 1, p. 1–11, 2018.

COMUNIAN, T. A. et al. Protection and controlled release of vitamin C by different micro/nanocarriers. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 62, n. 12, p. 3301–3322, 2022. DOI: 10.1080/10408398.2020.1865258.

CONIDI, C.; CASTRO-MUÑOZ, R.; CASSANO, A. Membrane-based operations in the fruit juice processing industry: a review. *Beverages*, v. 6, n. 1, p. 18, 16 mar. 2020.

CORTINES, A. Encapsulação da vitamina C por coacervação complexa empregando goma xantana e proteína como material de parede. *UFRRJ*, 2019. Disponível em: <https://www.ufrj.br>. Acesso em: 4 maio 2025. (*Link exato não fornecido — recomendo incluir o URL completo se possível.*)

DAVIS, J. L. et al. Liposomal-encapsulated ascorbic acid: influence on vitamin C

bioavailability and capacity to protect against ischemia–reperfusion injury. *Nutrition and Metabolic Insights*, v. 9, p. 25–30, 2016. DOI: 10.4137/NMI.S39764.

DE OLIVEIRA, L. M. et al. Evaluation of the nanoscale surface applied to biodegradable nanoparticles containing *Allium sativum* essential oil. *Materials Letters*, v. 275, p. 128111, 2020.

DE, A. et al. Synthesis of polymeric nanoparticles by double emulsion and pH-driven: encapsulation of antibiotics and natural products for combating *Escherichia coli* infections. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 108, n. 1, 31 maio 2024.

DENG, S. et al. Polymeric nanocapsules as nanotechnological alternative for drug delivery system: current status, challenges and opportunities. *Nanomaterials*, v. 10, n. 5, p. 847, 2020. DOI: 10.3390/nano10050847.

DUSHKOVA M. et al. Concentration of Polyphenolic Antioxidants in Apple Juice and Extract Using Ultrafiltration. *Membranes*, v. 12, n. 11, p. 1032–1032, 23 out. 2022.

ECHAVARRÍA, A. P. et al. Fruit juice processing and membrane technology application. *Food Engineering Reviews*, v. 3, n. 3–4, p. 136–158, 1 dez. 2011.

EMBRAPA. Obtenção e estabilização por nanoencapsulamento de vitamina C. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1087123/1/46oresumodeSDC2804.pdf>. Acesso em: 2 maio 2025.

ESPINOZA, S. et al. Protective capacity of gum Arabic, maltodextrin, different starches, and fibers on the bioactive compounds and antioxidant activity of an orange puree (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) against freeze-drying and in vitro digestion. *Food Chemistry*, v. 357, p. 129724, set. 2021.

FANGUEIRO, J. F. et al. Desenvolvimento, produção e caracterização de nanocristais de fármacos pouco solúveis. *Química Nova*, v. 35, n. 9, p. 1848–1853, 2012.

FERJAOUI, Z. et al. Layer-by-layer self-assembly of polyelectrolytes on superparamagnetic nanoparticle surfaces. *ACS Omega*, v. 5, n. 10, p. 4770–4777, 3 mar. 2020.

FERNANDES, J. et al. Yeast cells-xanthan gum coacervation for hydrosoluble bioactive encapsulation. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 253, p. 127148–127148, 11 out. 2023.

FESSI, H. et al. Nanocapsule formation by interfacial polymer deposition following solvent displacement. *International Journal of Pharmaceutics*, v. 55, n. 1, p. R1–R4, out. 1989.

FIGUEIREDO A., J. et al. Stability of camu-camu encapsulated with different prebiotic biopolymers. *Journal of the science of food and agriculture*, v. 100, n. 8, p. 3471–3480, jun. 2020.

FIGUEIREDO, Jayne de Abreu et al. Encapsulation of camu-camu extracts using prebiotic biopolymers: controlled release of bioactive compounds and effect on their physicochemical and thermal properties. *Food Research International*, v. 137, art. 109563, 2020.

DOI: 10.1016/j.foodres.2020.109563.

FDA. Considering Whether an FDA-Regulated Product Involves the Application of Nanotechnology: Guidance for Industry. Silver Spring: U.S. Food and Drug Administration, 2014.

FILIPPOV, S. K. et al. Dynamic light scattering and transmission electron microscopy in drug delivery: a roadmap for correct characterization of nanoparticles and interpretation of results. *Materials Horizons*, v. 10, n. 12, p. 5354–5370, 2023. DOI: 10.1039/D3MH00717K.

FROELICH, A. et al. Natural gums in drug-loaded micro- and nanogels. *Pharmaceutics*, Basel, v. 15, n. 3, p. 759, 2023. DOI: 10.3390/pharmaceutics15030759.

FUENTES, A. J. C.; CHAVEZ-SANTOSCOY, R. A. Nanotechnology as a key to enhance the benefits and improve the bioavailability of flavonoids in the food industry. *Foods*, v. 10, n. 11, p. 2701, 1 nov. 2021.

GANORKAR, P. M.; NANDANE, A. S.; TAPRE, A. R. Reverse osmosis for fruit juice concentration – a review. *ResearchGate*, v. 1, n. 1, 4 maio 2012.

GARCÍA-CHACÓN, Juliana María et al. Camu camu (*Myrciaria dubia* (Kunth) McVaugh): an Amazonian fruit with biofunctional properties—a review. *ACS Omega*, v. 8, n. 6, p. 5169–5183, 2023. DOI: 10.1021/acsomega.2c07245.

GHEZZI, M. Polymeric micelles in drug delivery: an insight of the techniques for their characterization and assessment in biorelevant conditions. *Journal of Controlled Release*, v. 332, p. 312–336, 10 abr. 2021.

GLIGUEM, H.; BIRLOUEZ-ARAGON, I. Effects of sterilization, packaging, and storage on vitamin C degradation, protein denaturation, and glycation in fortified milks. *Journal of Dairy Science*, v. 88, n. 3, p. 891–899, 2005.

GOLONKA, Iwona et al. *Assessment of the Influence of the Selected Range of Visible Light Radiation on the Durability of the Gel with Ascorbic Acid and Its Derivative*. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 23, n. 15, art. 8759, 2022. DOI: 10.3390/ijms23158759.

GONÇALVES, A. E. S. S. Compostos bioativos do camu-camu (*Myrciaria dubia* McVaugh): caracterização e atividade biológica. 2012. Tese (Doutorado em Ciências dos Alimentos) – Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/9/9131/tde-08032013-165045/pt-br.php>. Acesso em: 3 maio 2025.

GONZÁLEZ-REZA, R. M. et al. Influence of stabilizing and encapsulating polymers on antioxidant capacity, stability, and kinetic release of thyme essential oil nanocapsules. *Foods*, v. 9, n. 12, p. 1884–1884, 17 dez. 2020.

GRILLO, R. et al. Controlled release system for ametryn using polymer microspheres: preparation, characterization and release kinetics in water. *Journal of Hazardous Materials*, v. 186, n. 2–3, p. 1645–1651, 2011.

GROSSO, G. et al. Effects of vitamin C on health: a review of evidence. *Frontiers in Bioscience*, v. 18, p. 1017–1029, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/a/4SST3bRPjcbnQX3f9xTxnkb/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 3 maio 2025.

GUENA, Aline Cortines de Almeida. Encapsulação da vitamina C por coacervação complexa empregando goma xantana e proteína como material de parede. 2019. 83 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2019.

HERBIG, Anna-Lena; RENARD, Catherine M. G. C. Factors that impact the stability of vitamin C at intermediate temperatures in a food matrix. *Food Chemistry*, v. 220, p. 444–451, 2017. DOI: 10.1016/j.foodchem.2016.10.012.

HO, Myoung Jin; PARK, Dong Woo; KANG, Myung Joo. *Design of Novel Tricaprylin-Incorporated Multi-Layered Liposomal System for Skin Delivery of Ascorbic Acid with Improved Chemical Stability*. *Pharmaceuticals*, v. 16, n. 1, art. 121, 2023. DOI: 10.3390/ph16010121.

HU, S. et al. Fabrication and spray-drying microencapsulation of vitamin C-loaded W1/O/W2 emulsions: Influence of gel polymers in the internal water phase on encapsulation efficiency, reconstituted stability, and controlled release properties. *LWT*, v. 170, p. 114113, 21 out. 2022.

IDREES, H. et al. A review of biodegradable natural polymer-based nanoparticles for drug delivery applications. *Nanomaterials*, v. 10, n. 10, p. 1970, 5 out. 2020.

ISKANDAR, B. et al. Herbal nanoemulsions in cosmetic science: A comprehensive review of design, preparation, formulation, and characterization. *Journal of Food and Drug Analysis*, v. 32, n. 4, p. 428–458, 14 dez. 2024.

INOUE, T. et al. Tropical fruit camu-camu (*Myrciaria dubia*) has anti-oxidative and anti-inflammatory properties. *Journal of Cardiology*, v. 52, n. 2, p. 127–132, 2008. DOI: 10.1016/j.jjcc.2008.06.004.

JACOB, R. A. In: SHILS, M. E.; OLSON, J. A.; SHIKE, M.; ROSS, A. C. *Tratado de nutrição moderna na saúde e na doença*. São Paulo: Manole, 2003.

JANG, K.-I.; LEE, H. G. Stability of Chitosan Nanoparticles for l-Ascorbic Acid during Heat Treatment in Aqueous Solution. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 56, n. 6, p. 1936–1941, 20 fev. 2008.

JIA, R.-Q. et al. Viscosity reduction of xanthan gum through free radical mechanisms mediated by ascorbic acid. *LWT*, v. 203, p. 116377–116377, 20 jun. 2024.

JOHNSTON, C. S.; BOWLING, D. L. Ascorbic acid. In: *Handbook of vitamins*. 4. ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2007. p. 489–520.

KAMALY, N. et al. Degradable controlled-release polymers and polymeric nanoparticles: mechanisms of controlling drug release. *Chemical Reviews*, v. 116, n. 4, p. 2602–

2663, 8 fev. 2016.

LANGOLIS, K.; COOPER, M.; COLAPINTO, C. K. Vitamin C status of Canadian adults: findings from the 2012/2013 Canadian Health Measures Survey. *Health Reports*, v. 27, n. 5, p. 3–10, 2016.

LI, Zemin *et al.* Improved ability of liposomes to encapsulate ascorbic acid via coating with xanthan gum. *International Journal of Food Science and Technology*, v. 60, n. 1, art. vvae078, 2025. DOI: 10.1093/ijfood/vvae078.

LU, H. et al. A review on polymer and lipid-based nanocarriers and its application to nano-pharmaceutical and food-based systems. *Frontiers in Nutrition*, v. 8, 1 dez. 2021.

LUIS, Angélica I. S. et al. Ecotoxicity evaluation of polymeric nanoparticles loaded with ascorbic acid for fish nutrition in aquaculture. *Journal of Nanobiotechnology*, v. 19, art. 163, 2021. DOI: 10.1186/s12951-021-00910-8.

MA, Z. et al. A comprehensive review on the recent advances in membrane-based processes for fruit juice concentration. *Food and Bioproducts Processing*, v. 145, p. 42–66, 1 maio 2024.

MAKADIA, H. K.; SIEGEL, S. J. Poly lactic-co-glycolic acid (PLGA) as biodegradable controlled drug delivery carrier. *Polymers*, v. 3, n. 3, p. 1377–1397, 26 ago. 2011.

MATWIJCZUK, Arkadiusz et al. Use of FTIR spectroscopy and chemometrics with respect to storage conditions of Moldavian dragonhead oil. *Sustainability*, v. 11, n. 22, art. 6414, 2019. DOI: 10.3390/su11226414.

MAURYA, Vaibhav Kumar *et al.* Vitamin C fortification: need and recent trends in encapsulation technologies. *Frontiers in Nutrition*, v. 10, art. 1229243, 2023. DOI: 10.3389/fnut.2023.1229243.

MOHAMMAD, A. W. et al. Nanofiltration membranes review: Recent advances and future prospects. *Desalination*, v. 356, p. 226–254, jan. 2015.

MORADI, S.; ANARJAN, N. Preparation and characterization of α -tocopherol nanocapsules based on gum Arabic-stabilized nanoemulsions. *Food Science and Biotechnology*, v. 28, n. 2, p. 413–421, 8 out. 2018.

MORA-HUERTAS, C. E.; FESSI, H.; ELAISSARI, A. Polymer-based nanocapsules for drug delivery. *International Journal of Pharmaceutics*, v. 385, n. 1-2, p. 113–142, jan. 2010.

MOSER, M. A.; CHUN, O. K. Vitamin C and heart health: a review based on findings from epidemiologic studies. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 12, n. 8, p. 1–9, 2016.

MUNYAKA, A. W. et al. Thermal stability of L-ascorbic acid and ascorbic acid oxidase in broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*). *Journal of Food Science*, v. 75, n. 4, p. C336–C340, maio 2010. DOI: 10.1111/j.1750-3841.2010.01573.x.

MUSTAFA, H. M. et al. Effect of gelatin/xanthan gum ratios on jackfruit leaf extract

nanoemulsion gel stability and properties. *BioResources*, v. 20, n. 1, p. 2056–2070, 16 jan. 2025.

NASCIMENTO, O. V. do; SILVA, E. L. Camu-camu (*Myrciaria dubia* (HBK) McVaugh), pequena fruta amazônica rica em vitamina C e suplemento para imunidade. *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, [S. l.], v. 6, p. e27810615877, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i6.15877. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/15877>. Acesso em: 3 maio 2025.

NORHAYATI, H. et al. Effects of pasteurization and different concentrations of xanthan gum on honey beverage. *Food Research*, v. 3, n. 4, p. 325–332, 10 fev. 2019.

NWOSE, E. U. et al. Vitamin C as antioxidant and its role in oxidative stress-related diseases. *Journal of Applied Biosciences*, v. 2, p. 1–10, 2008.

OTHMAN, Nurhanisah; MD. JAMIL, Siti Nurul Ain; MASARUDIN, Mas Jaffri; ABDULLAH, Luqman Chuah; DAIK, Rusli; SARMAN, Nor Syazwani. L-ascorbic acid and thymoquinone dual-loaded palmitoyl-chitosan nanoparticles: improved preparation method, encapsulation and release efficiency. *Processes*, v. 8, n. 9, art. 1040, 2020. DOI: 10.3390/pr8091040

OUTUKI, P. M. et al. Development of arabic and xanthan gum microparticles loaded with an extract of *Eschweilera nana* Miers leaves with antioxidant capacity. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 499, p. 103–112, 1 jun. 2016.

PADAYATTY, S. J. et al. Vitamin C as an antioxidant: evaluation of its role in disease prevention. *Journal of the American College of Nutrition*, v. 22, n. 1, p. 18–35, 2003.

PANICKER, C. Yohannan et al. FT-IR, FT-Raman and SERS spectra of vitamin C. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, v. 65, n. 3–4, p. 802–804, 2006. DOI: 10.1016/j.saa.2005.12.044.

PATEIRO, M. et al. Nanoencapsulation of promising bioactive compounds to improve their absorption, stability, functionality and the appearance of the final food products. *Molecules*, v. 26, n. 6, p. 1547, 11 mar. 2021.

PÉREZ A., K. M. et al. Insight Into Nanoliposomes as Smart Nanocarriers for Greening the Twenty-First Century Biomedical Settings. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, v. 8, 15 dez. 2020.

PINHEIRO, A. Encapsulação de subproduto industrial de acerola em matriz composta de goma arábica e maltodextrina para aplicação em alimentos: desenvolvimento, caracterização e estabilidade. 2017. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/22999>.

PINHEIRO, H. N.; COSTA, E. F.; ABREU, F. O. M. S. Síntese e caracterização de nanoemulsões poliméricas de goma xantana e goma arábica encapsulantes de óleo essencial de *Eucalyptus citriodora* L. *Ambiente: Gestão e Desenvolvimento*, v. 1, n. 1, 2021. DOI: 10.24979/ambiente.v1i1.929.

PRADO, Carolina Kato. Avaliação da composição físico-química, capacidades redutora e antioxidante do camu-camu (*Myrciaria dubia* (H. B. K.) McVaugh) e dos seus efeitos metabólicos em indivíduos com síndrome metabólica. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência de Alimentos) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2017. Disponível em: <https://repositorio.uel.br/handle/123456789/9873>.

PULINGAM, T. et al. Explorando várias técnicas para a síntese química e biológica de nanopartículas poliméricas. *Nanomaterials*, v. 12, n. 3, p. 576, 8 fev. 2022.

PULLAR, Juliet M. et al. The roles of vitamin C in skin health. *Nutrients*, v. 9, n. 8, art. 866, 2017. DOI: 10.3390/nu9080866.

RAJABI, Hamid; JAFARI, Seid Mahdi; RAJABZADEH, Ghadir; SARFARAZI, Messiah; SEDAGHATI, Samineh. Chitosan-gum Arabic complex nanocarriers for encapsulation of saffron bioactive components. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 578, art. 123644, 2019. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2019.123644.

RAVIDRAN, R.D. et al. Prevalence and risk factors for vitamin C deficiency in north and south India: a two center population based study in people aged 60 years and over. *Plos One*.v.6,n.12, p. 1-7, 2011.

RIBEIRO, P. F. A. Compostos bioativos de camu-camu (*Myrciaria dubia*) em função do ambiente de cultivo e do estágio de maturação. 2012. 138 f. Tese (Doutorado em Ciência de Alimentos) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012. Disponível em: <http://locus.ufv.br/handle/123456789/465>. Acesso em: 3 maio 2025.

ROMANO, E. et al. Enhanced stability of oral vitamin C delivery: a novel large-scale method for liposomes production and encapsulation through dynamic high-pressure microfluidization. *Nanomaterials*, v. 14, n. 6, p. 516–516, 14 mar. 2024.

ROMERO-CANO, M. S.; VINCENT, B. Controlled release of 4-nitroanisole from poly (lactic acid) nanoparticles. *Journal of Controlled Release*, v. 82, p. 127–135, 2002.

SAIRAM, M. et al. Encapsulation efficiency and controlled release characteristics of crosslinked polyacrylamide particles. *International Journal of Pharmaceutics*, v. 320, n. 1–2, p. 131–136, 2006.

SAMIR, A. et al. Recent advances in biodegradable polymers for sustainable applications. *npj Materials Degradation*, v. 6, n. 1, 19 ago. 2022.

SANTIAGO, F. et al. Photostability of vitamin C in industrialized fruit juices and isomers determination by HPLC-DAD. *Journal of Chromatography Open*, v. 4, p. 100103–100103, 1 nov. 2023. DOI: 10.1016/j.jcoa.2023.100103.

SARBATLY, R. et al. Recent developments of membrane technology in the clarification and concentration of fruit juices. *Food Engineering Reviews*, v. 15, n. 3, p. 420–437, 10 jun. 2023.

SARI, H. M. et al. The use of natural gums to produce nano-based hydrogels and films

for topical application. *International Journal of Pharmaceutics*, v. 626, p. 122166, 15 out. 2022.

SCHAFFAZICK, S. R. et al. Caracterização e estabilidade físico-química de sistemas poliméricos nanoparticulados para administração de fármacos. *Química Nova*, v. 26, n. 5, p. 726–737, out. 2003.

SCHLEICHER, R. L. et al. Serum vitamin C and the prevalence of vitamin C deficiency in the United States: 2003–2004 NHANES. *American Journal of Clinical Nutrition*, v. 90, n. 5, p. 1252–1263, 2009.

SHEN, J. et al. Ascorbate oxidation by iron, copper and reactive oxygen species: review, model development, and derivation of key rate constants. *Scientific Reports*, v. 11, p. 7417, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86477-8>.

SILVA, C. M. et al. Vitamina C para aumento da imunidade: efeitos benéficos e efeitos adversos. *Revista JRG de Estudos Acadêmicos*, São Paulo, v. 5, n. 11, p. 561–571, 2022. DOI: 10.5281/zenodo.7415317. Disponível em: <https://revistajrg.com/index.php/jrg/article/view/463>. Acesso em: 3 maio 2025.

SILVA, G. S. et al. Avaliação da relação entre a cor e degradação da vitamina C em suco de laranja. *ResearchGate*, 2022. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/362785072>. Acesso em: 2 maio 2025.

SILVA, N. K. et al. Influence of shell material on vitamin C content, total phenolic compounds, sorption isotherms and particle size of spray-dried camu-camu juice. *Fruits*, v. 68, n. 3, p. 175–183, 18 abr. 2013.

SILVA, N. K. Microencapsulamento de polpa de camu-camu (*Myrciaria dubia*) utilizando goma arábica e maltodextrina como agentes encapsulantes. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciência de Alimentos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/17567/1/NKSilva_compressed.pdf. Acesso em: 3 maio 2025.

SILVA, R. A.; MEJIA, J. A. Revisão integrativa: benefícios da vitamina C para a prevenção do envelhecimento cutâneo. *Revista Fisioterapia em Movimento*, v. 29, n. 1, p. 123–130, 2016. Disponível em: <https://revistafit.com.br/revisao-integrativa-beneficios-da-vitamina-c-para-a-prevencao-do-envelhecimento-cutaneo/>. Acesso em: 2 maio 2025.

SINGH, A. et al. Advances in controlled release pesticide formulations: prospects to safer integrated pest management and sustainable agriculture. *Journal of Hazardous Materials*, v. 385, p. 121525, 2020.

SOARES, C. M. F. et al. Use of nanofiltration membranes for the concentration of bioactive compounds from tropical fruits. *Separation and Purification Technology*, v. 217, p. 118–125, 2019.

STAMFORD, Nicholas P. J. Stability, transdermal penetration, and cutaneous effects of

ascorbic acid and its derivatives. *Journal of Cosmetic Dermatology*, v. 11, n. 4, p. 310–317, 2012. DOI: 10.1111/jocd.12006.

SUBRAMANI, T.; GANAPATHYSWAMY, H. An overview of liposomal nano-encapsulation techniques and its applications in food and nutraceutical. *Journal of Food Science and Technology*, v. 57, n. 10, 20 mar. 2020.

SUR, S. et al. Utilização da técnica de espectroscopia ultravioleta visível (UV-Vis) para determinação da eficiência de encapsulamento em nanopartículas poliméricas. 2019. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019. Disponível em: https://tede.ufam.edu.br/bitstream/tede/7611/4/Disserta%C3%A7%C3%A3o_%C3%8DtaloCosta_PPGCEM.pdf. Acesso em: 4 maio 2025.

TAHERI, A.; JAFARI, S. M. Gum-based nanocarriers for the protection and delivery of food bioactive compounds. *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 269, p. 277–295, 2019. DOI: 10.1016/j.cis.2019.04.009.

TALLIAN, C. et al. Structural insights into pH-responsive drug release of self-assembling human serum albumin–silk fibroin nanocapsules. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, v. 133, p. 176–187, 2018. DOI: 10.1016/j.ejpb.2018.10.002.

TAN, Chen; XIE, Jiehong; ZHANG, Xiaoming; CAI, Jibao; XIA, Shuqin. Polysaccharide-based nanoparticles by chitosan and gum arabic polyelectrolyte complexation as carriers for curcumin. *Food Hydrocolloids*, v. 57, p. 236–245, 2016. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2016.01.021.

TOKER, R. et al. Effect of Ultrafiltration and Concentration Processes on the Physical and Chemical Composition of Blood Orange Juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 38, n. 3, p. 1321–1329, 14 mar. 2013.]

TUL MUNTHA, S.; KAUSAR, A.; SIDDIQ, M. Advances in Polymeric Nanofiltration Membrane: A Review. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, v. 56, n. 8, p. 841–856, 20 mar. 2017.

TVEDEN-NYBORG, P.; LYKKESFELDT, J. Does vitamin C deficiency increase lifestyle-associated vascular disease progression? Evidence based on experimental and clinical studies. *Antioxidants and Redox Signaling*, v. 19, n. 17, p. 2084–2104, 2013.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS. Núcleo de Estudos e Pesquisas em Alimentação. *Tabela de composição dos alimentos – TACO*. 4. ed. rev. e amp. Campinas: UNICAMP, 2011. Disponível em: http://www.cfn.org.br/wpcontent/uploads/2017/03/taco_4_edicao_ampliada_e_revisada.pdf. Acesso em: 4 dez. 2025.

VANNUCCHI, H.; ROCHA, M. M. *Ácido ascórbico (vitamina C)*. São Paulo: ILSI do Brasil, 2012. (Série de Publicações ILSI Brasil: Funções Plenamente Reconhecidas de Nutrientes,

21). Disponível em: <http://ilsa.org/brasil/wp-content/uploads/sites/9/2016/05/21-Vitamina-C.pdf>. Acesso em: 4 dez. 2017.

WANG, K. et al. Tailored design of nanofiltration membranes for water treatment based on synthesis–property–performance relationships. *Chemical Society Reviews*, v. 51, n. 2, p. 672–719, 1 jan. 2022.

WANG, X.-Q.; ZHANG, Q. pH-sensitive polymeric nanoparticles to improve oral bioavailability of peptide/protein drugs and poorly water-soluble drugs. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, v. 82, n. 2, p. 219–229, out. 2012.

WANG, Y. et al. Effects of vitamin C and vitamin D administration on mood and distress in acutely hospitalized patients. *American Journal of Clinical Nutrition*, v. 98, n. 3, p. 705–711, 2013.

WECHTERSBAACH, Luka et al. Liposomal stabilization of ascorbic acid in model systems and in food matrices. *LWT – Food Science and Technology*, v. 45, n. 1, p. 43–49, 2012. DOI: 10.1016/j.lwt.2011.07.025.

YIN, X. et al. Chemical Stability of Ascorbic Acid Integrated into Commercial Products: A Review on Bioactivity and Delivery Technology. *Antioxidants*, v. 11, n. 1, p. 153, 13 jan. 2022.

YUAN, Shuai et al. Evidence from thermal aging indicating that the synergistic effect of glyoxal and sodium sulfite improved the thermal stability of conformational modified xanthan gum. *Polymers*, v. 14, n. 2, art. 243, 2022. DOI: 10.3390/polym14020243.

YUYAMA, K. A cultura do camu-camu no Brasil. *Fruticultura*, v. 33, p. 1–11, 2011.

YUYAMA, K. et al. Camu-camu: um fruto fantástico como fonte de vitamina C. *Acta Amazônica*, v. 32, n. 1, p. 169–174, 2002. Disponível em: <https://acta.inpa.gov.br/fasciculos/32-1/PDF/v32n1a20.pdf>. Acesso em: 4 maio 2025.

ZHANG, F. et al. Polymer-coated nanoparticles: a universal tool for biolabelling experiments. *Small*, v. 7, n. 22, p. 3113–3127, 19 set. 2011.

ZHANG, S.-N. et al. The stability and controlled release of L-ascorbic acid encapsulated in poly(ethyl-2-cyanoacrylate) nanocapsules prepared by interfacial polymerization of water-in-oil microemulsions. *Journal of Cosmetic Science*, v. 66, n. 4, p. 247–259, 1 jul. 2015.

ZHANG, Z. et al. A review on polyester and polyester-amide thin film composite nanofiltration membranes: Synthesis, characteristics and applications. *Science of The Total Environment*, v. 858, p. 159922–159922, 1 fev. 2023.

ZHAO, L. et al. Protective effect and mechanism of action of xanthan gum on the color stability of black rice anthocyanins in model beverage systems. *Food Chemistry*, v. 164, p. 3800–3807, 1 dez. 2020.

ZHOU, D. et al. Development of lower cost seawater desalination processes using nanofiltration technologies — A review. *Desalination*, v. 376, p. 109–116, nov. 2015.

ŻMUDA, Przemysław *et al.* Bioavailability of liposomal vitamin C in powder form: a randomized, double-blind, cross-over trial. *Applied Sciences*, v. 14, n. 17, art. 7718, 2024. DOI: 10.3390/app14177718.