



EXTRAÇÃO VERDE E MICROENCAPSULAÇÃO POR ATOMIZAÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS DE RESÍDUO DE ACEROLA UTILIZANDO SOLVENTES EUTÉTICOS NATURAIS PROFUNDOS

EXTRACCIÓN VERDE Y MICROENCAPSULACIÓN POR ATOMIZACIÓN DE COMPUESTOS BIOACTIVOS DE RESIDUO DE ACEROLA UTILIZANDO SOLVENTES EUTÉCTICOS NATURALES PROFUNDOS

GREEN EXTRACTION AND SPRAY-DRYING MICROENCAPSULATION OF BIOACTIVE COMPOUNDS FROM ACEROLA BY-PRODUCT USING NATURAL DEEP EUTECTIC SOLVENTS

Anderson José de Lucena¹; Ariell Gilmar Carneiro Teófilo Caldas²; Paulo Fernando da Silva Ramos³ Marcony Edson da Silva Júnior⁴; Maria Inês Sucupira Maciel⁵

DOI: <https://doi.org/10.31692/VIICIAGRO.0082>

RESUMO

A crescente geração de resíduos agroindustriais provenientes do processamento de frutas tropicais tem impulsionado a busca por estratégias sustentáveis para o aproveitamento desses subprodutos. Entre eles, destacam-se os resíduos de acerola (*Malpighia emarginata* D.C.), que apresentam elevadas concentrações de compostos bioativos com potencial antioxidante. Nesse contexto, a combinação de tecnologias de extração verde e estabilização surge como alternativa promissora para a obtenção de ingredientes funcionais de alto valor agregado. Assim, o objetivo deste trabalho foi extrair compostos bioativos de resíduos de acerola utilizando a combinação de extração assistida por ultrassom e solventes eutéticos naturais profundos (EAU-NADES), seguida de microencapsulação por secagem por atomização (*spray drying*), avaliando as características físico-químicas, físicas e antioxidantes dos pós obtidos. O resíduo de acerola foi seco, moído e submetido à extração utilizando o sistema cloreto de colina:ácido oxálico (1:1), associado à extração assistida por ultrassom. Os extratos obtidos foram microencapsulados utilizando maltodextrina e goma arábica como materiais de parede. Os pós produzidos foram caracterizados quanto à umidade, atividade de água, higroscopicidade, densidade aparente, densidade absoluta, porosidade intragranular, compostos fenólicos totais, eficiência de microencapsulamento, atividade antioxidante pelo método FRAP e parâmetros de cor. Os resultados demonstraram que o extrato microencapsulado apresentou baixa umidade (1,56%), reduzida atividade de água (0,116) e higroscopicidade de 16,70 g 100 g⁻¹, indicando elevada estabilidade durante o armazenamento. Além disso, foram observados elevados teores de compostos fenólicos totais

¹ Mestrando em Ciência e Tecnologia de Alimentos - PGCTA/UFRPE, andersonjosedelucena@gmail.com

² Graduanda em Ciências do Consumo, UFRPE, ariellteofilo@gmail.com

³ Graduando em Ciências do Consumo, UFRPE, paulofer456@hotmail.com

⁴ Doutor em Ciência e Tecnologia de Alimentos, UNINASSAU, marcony172009@hotmail.com

⁵ Doutora em Ciências Biológicas, Docente do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos - PGCTA/UFRPE, m.ines@dcd.ufrpe.br

(87,62 mg EAG g⁻¹), alta capacidade antioxidante (592,57 µmol Fe²⁺ g⁻¹) e eficiência de microencapsulamento de 99,83%, evidenciando a eficácia do sistema encapsulante na proteção dos compostos bioativos. Conclui-se que a associação entre EAU-NADES e secagem por atomização constitui uma estratégia eficiente para a valorização de resíduos de acerola, possibilitando a obtenção de ingredientes funcionais sustentáveis com potencial aplicação nas indústrias alimentícia, farmacêutica e cosmética.

Palavras-chave: atividade antioxidante, compostos fenólicos, economia circular, resíduos agroindustriais, ultrassom.

RESUMEN

La creciente generación de residuos agroindustriales procedentes del procesamiento de frutas tropicales ha impulsado la búsqueda de estrategias sostenibles para el aprovechamiento de estos subproductos. Entre ellos destacan los residuos de acerola (*Malpighia emarginata* D.C.), que presentan altas concentraciones de compuestos bioactivos con potencial antioxidante. En este contexto, la combinación de tecnologías de extracción verde y estabilización surge como una alternativa prometedora para la obtención de ingredientes funcionales de alto valor agregado. Así, el objetivo de este trabajo fue extraer compuestos bioactivos de residuo de acerola utilizando la combinación de extracción asistida por ultrasonido y solventes eutécticos naturales profundos (EAU-NADES), seguida de microencapsulación mediante secado por atomización (*spray drying*), evaluando las características fisicoquímicas, físicas y antioxidantes de los polvos obtenidos. El residuo de acerola se secó, se molió y se sometió a extracción utilizando el sistema de cloruro de colina:ácido oxálico (1:1) asociado a ultrasonido. Los extractos obtenidos fueron microencapsulados utilizando maltodextrina y goma arábiga como materiales de pared. Los polvos producidos fueron caracterizados en términos de humedad, actividad de agua, higroscopicidad, densidad aparente, densidad absoluta, porosidad intragranular, compuestos fenólicos totales, eficiencia de microencapsulación, actividad antioxidante por el método FRAP y parámetros de color. Los resultados mostraron que el extracto microencapsulado presentó baja humedad (1,56 %), reducida actividad de agua (0,116) e higroscopicidad de 16,70 g 100 g⁻¹, indicando elevada estabilidad durante el almacenamiento. Además, se observaron altos contenidos de compuestos fenólicos totales (87,62 mg EAG g⁻¹), elevada capacidad antioxidante (592,57 µmol Fe²⁺ g⁻¹) y eficiencia de microencapsulación de 99,83 %, evidenciando la eficacia del sistema encapsulante en la protección de los compuestos bioactivos. Se concluye que la asociación entre EAU-NADES y secado por atomización constituye una estrategia eficiente para la valorización de residuos de acerola, permitiendo la obtención de ingredientes funcionales sostenibles con potencial aplicación en las industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética.

Palabras clave: actividad antioxidante, compuestos fenólicos, economía circular, residuos agroindustriales, ultrasonido.

ABSTRACT

The increasing generation of agro-industrial residues from tropical fruit processing has stimulated the search for sustainable strategies to valorize these by-products. Among them, acerola (*Malpighia emarginata* D.C.) residues stand out due to their high content of bioactive compounds with antioxidant potential. In this context, the combination of green extraction and stabilization technologies emerges as a promising approach for obtaining high-value functional ingredients. Therefore, this study aimed to extract bioactive compounds from acerola residue using ultrasound-assisted extraction combined with natural deep eutectic solvents (EAU-NADES), followed by spray-drying microencapsulation, and to evaluate the physicochemical, physical, and antioxidant properties of the obtained powders. Acerola residue was dried, ground, and subjected to extraction using a choline chloride:oxalic acid (1:1) system associated with ultrasound treatment. The resulting extracts were microencapsulated using maltodextrin and gum arabic as wall materials. The powders were characterized in terms of moisture content, water activity, hygroscopicity, apparent density, absolute density, intragranular porosity, total phenolic compounds, microencapsulation efficiency, antioxidant activity by the FRAP assay, and color parameters. The results showed that the microencapsulated extract presented low moisture content (1.56%), low water activity (0.116), and hygroscopicity of 16.70 g 100 g⁻¹, indicating high storage stability. In addition, high total phenolic content (87.62 mg GAE g⁻¹), strong antioxidant activity (592.57 µmol Fe²⁺ g⁻¹), and microencapsulation efficiency of 99.83% were observed, demonstrating the effectiveness of the encapsulating system in protecting bioactive compounds during processing. It can be concluded that the combination of UAE-NADES and spray drying is an efficient strategy for the valorization of acerola residues, enabling the production of sustainable functional

ingredients with potential applications in the food, pharmaceutical, and cosmetic industries.

Keywords: agro-industrial residues, antioxidant activity, circular economy, phenolic compounds, ultrasound.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, observa-se um crescimento significativo no consumo de frutas tropicais, amplamente valorizadas por seus aromas, sabores exóticos e propriedades nutricionais (Sayago-ayerdi et al., 2021). Paralelamente, a expansão da produção industrial de polpas e sucos tem resultado na geração de grandes volumes de resíduos agroindustriais, despertando crescente interesse pela recuperação de compostos de alto valor agregado e pela adoção de estratégias alinhadas aos princípios da economia circular e da sustentabilidade (Kringel et al., 2020).

Nesse contexto, destaca-se a acerola (*Malpighia emarginata* D.C.), uma fruta tropical amplamente explorada pela indústria alimentícia devido ao seu elevado teor de vitamina C, compostos fenólicos e outros metabólitos bioativos com reconhecido potencial funcional (Oledzki; Harasym, 2024). Apesar de sua importância econômica e nutricional, o processamento industrial da acerola gera quantidades expressivas de resíduos, compostos principalmente por sementes e cascas. Estima-se que aproximadamente 40% do volume processado seja convertido nesses subprodutos, que frequentemente são descartados ou destinados a aplicações de baixo valor agregado, ocasionando perdas econômicas e impactos ambientais negativos (Nogueira et al., 2023).

Entretanto, estudos demonstram que esses resíduos ainda apresentam concentrações significativas de compostos bioativos, incluindo compostos fenólicos, flavonoides e ácido ascórbico residual, os quais possuem elevada atividade antioxidante e estão associados à prevenção de doenças crônicas não transmissíveis, como câncer e doenças cardiovasculares (Silva et al., 2021). Dessa forma, a valorização desses subprodutos representa uma alternativa promissora para a obtenção de ingredientes funcionais e para o aproveitamento integral da matéria-prima, contribuindo para modelos de produção mais sustentáveis.

Diante desse potencial, torna-se fundamental o desenvolvimento de processos eficientes para a recuperação desses compostos bioativos. Além disso, considerando a crescente demanda por tecnologias sustentáveis e alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os ODS 3 (Saúde e Bem-Estar), 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), a indústria tem buscado alternativas aos métodos convencionais de extração, frequentemente caracterizados pelo elevado consumo de solventes orgânicos, longos tempos de processamento e impactos ambientais relevantes (Santos-Martín et al., 2023). Nesse cenário, destacam-se os solventes eutéticos naturais profundos (NADES), considerados solventes verdes devido à sua baixa toxicidade, biodegradabilidade e elevada eficiência na extração de compostos bioativos (Oomen et al., 2020).

Adicionalmente, a combinação dos NADES com tecnologias emergentes, como a EAU, tem se mostrado uma estratégia promissora para intensificar os processos extrativos (Santos-martín et al., 2023). A ação das ondas ultrassônicas promove fenômenos de cavitação que favorecem a ruptura das estruturas celulares vegetais e aumentam a transferência de massa, potencializando a liberação de compostos bioativos para o solvente (Siddiqui et al., 2025). Como consequência, são observados maiores rendimentos de extração, menor consumo de solventes e energia, além da redução do tempo de processamento. Dessa forma, a associação entre NADES e ultrassom representa uma abordagem inovadora e sustentável para a recuperação de compostos bioativos presentes em resíduos agroindustriais (Santos-martín et al., 2023).

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo extrair compostos bioativos de resíduos agroindustriais de acerola utilizando a combinação EAU-NADES, bem como produzir pós microencapsulados por secagem por atomização, avaliando suas características físico-químicas, físicas e antioxidantes, visando à obtenção de ingredientes funcionais de alto valor agregado e à valorização sustentável desses subprodutos agroindustriais.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A acerola

O Brasil é atualmente o principal produtor de acerola (*Malpighia emarginata* DC), apresentada na Figura 1, registrando um crescimento significativo ao longo dos anos. Em 2017, a produção nacional atingiu cerca de 70 mil toneladas, sendo que a região Nordeste respondeu por aproximadamente 75% desse total (Miskinis; Nascimento; Colussi, 2023). A acerola é uma fruta tropical típica das Américas, caracterizada por seu sabor agradável e valorizada por seu elevado teor de vitamina C. Essa característica, aliada à presença de compostos antioxidantes como carotenoides, fenólicos e flavonoides, além de fibras solúveis e insolúveis, proteínas, minerais e outras vitaminas, torna a acerola uma importante aliada na promoção da saúde e do bem-estar (Laurindo et al., 2024). Normalmente utilizada na forma de polpa, suco ou geleia, a acerola também gera uma quantidade expressiva de resíduos durante o seu processamento, como cascas, sementes, endocarpos e polpa residual. Esses subprodutos representam uma valiosa fonte de compostos bioativos e polissacarídeos de interesse, como celulose, hemicelulose e pectina (Laurindo et al., 2024; Miskinis; Nascimento; Colussi, 2023). Além de seu potencial nutricional e funcional, a valorização dos subprodutos da acerola também oferece uma alternativa sustentável para a indústria, ajudando a minimizar impactos ambientais ao reduzir o descarte de resíduos orgânicos (Vega-Baudrit et al., 2023).

Figura 1: Acerola (*Malpighia emarginata* DC).



Fonte: Própria (2026).

Isso torna seu aproveitamento ainda mais relevante em um cenário onde a sustentabilidade está ganhando cada vez mais importância. Nos últimos anos, tem-se observado um crescimento expressivo do interesse mundial pela acerola, tanto em pesquisas quanto para exploração econômica. Esse movimento é impulsionado pelo seu grande potencial agroindustrial, sua versatilidade tecnológica e sua capacidade de agregar valor a diferentes cadeias produtivas (Zarić et al., 2023).

Compostos bioativos em subprodutos da acerola

A geração de subprodutos durante o processamento da acerola pode trazer impactos ambientais quando não é bem gerida. No entanto, como destacam Vega-Baudrit et al. (2023), esses resíduos não representam apenas um desafio, eles também carregam um enorme potencial. Ricos em nutrientes, os subprodutos da acerola podem ser reaproveitados de forma eficiente, agregando valor e contribuindo para práticas mais sustentáveis. Ao invés de serem descartados, esses materiais orgânicos podem ser transformados em produtos com alto valor agregado, promovendo não só o reaproveitamento de recursos, mas também benefícios para o meio ambiente.

Entre esses subprodutos, o bagaço, as sementes e as cascas da acerola se destacam como fontes de compostos bioativos. Pesquisas mostram que esses resíduos podem conter concentrações ainda maiores de carotenóides, antocianinas, compostos fenólicos e flavonoides do que a própria polpa ou o suco da fruta (Miskinis; do Nascimento; Colussi, 2023). Poletto et al. (2021) também observaram que o bagaço e as sementes concentram níveis significativos de ácido ascórbico, β -caroteno e seus isômeros, além de outros antioxidantes importantes. Esses compostos estão associados a diversos benefícios para a saúde, como efeito rejuvenescedor, proteção do sistema

nervoso, ação anti-inflamatória, prevenção de doenças crônicas como o câncer e a aterosclerose, além de fortalecer a imunidade (Miskinis; do Nascimento; Colussi, 2023). Esses subprodutos também se destacam pela alta concentração de fibras solúveis e insolúveis, o que reforça ainda mais seu valor funcional.

A eficácia desses compostos, no entanto, está diretamente relacionada à sua capacidade de serem absorvidos pelo organismo após o consumo. Embora muitos bioativos, como polifenóis e carotenoides, apresentem limitações quanto à biodisponibilidade em sua forma natural, a acerola destaca-se pelo elevado teor de vitamina C e pela presença de diversos compostos fenólicos e carotenoides com reconhecido potencial funcional, o que reforça seu interesse para aplicações alimentícias e nutraceuticas (Vilvert et al., 2024; Laurindo et al., 2024). A vitamina C, por exemplo, que além de ser benéfica, também é instável em contato com luz, calor e oxigênio. Para preservar sua eficácia, tecnologias como a encapsulação têm sido utilizadas, protegendo o composto e prolongando sua ação, além de manter as características sensoriais dos produtos (Miskinis; do Nascimento; Colussi, 2023).

Extração assistida por ultrassom utilizando solventes eutéticos naturais profundos (EAU-NADES)

A extração assistida por ultrassom (EAU) tem sido amplamente empregada para a recuperação de compostos bioativos de matrizes vegetais devido à sua elevada eficiência, menor consumo de solventes e reduzido tempo de processamento. A técnica baseia-se no fenômeno da cavitação acústica, em que ondas ultrassônicas promovem a formação e implosão de microbolhas no meio líquido, gerando forças mecânicas capazes de romper estruturas celulares e facilitar a transferência de massa entre o solvente e a matriz sólida (Vieira et al., 2024; Pap et al., 2024). Como consequência, ocorre aumento do rendimento de extração e redução da degradação térmica de compostos sensíveis, como fenólicos, flavonoides e outros antioxidantes.

Nos últimos anos, a EAU tem sido frequentemente associada aos solventes eutéticos naturais profundos (*Natural Deep Eutectic Solvents* – NADES), considerados uma alternativa sustentável aos solventes orgânicos convencionais. Os NADES são formados pela combinação de compostos naturais capazes de atuar como doadores e aceptores de ligações de hidrogênio, resultando em sistemas com elevada capacidade de solvatação, baixa toxicidade, biodegradabilidade e fácil preparação (Choi et al., 2011; Pereira et al., 2025). Além disso, suas propriedades podem ser ajustadas conforme a composição utilizada, permitindo maior seletividade na extração de diferentes classes de compostos bioativos.

A combinação EAU-NADES tem demonstrado efeito sinérgico na recuperação de

compostos fenólicos provenientes de resíduos agroindustriais. Enquanto o ultrassom favorece a ruptura celular e a transferência de massa, os NADES aumentam a solubilização e estabilização dos metabólitos extraídos, proporcionando rendimentos superiores aos obtidos por métodos convencionais (Hong, Deng e Zhao, 2022; Duru et al., 2022). Diversos estudos têm relatado resultados promissores em resíduos de frutas. Lima et al. (2024), utilizando resíduos de araçá-roxo e o sistema cloreto de colina:glicerol (1:2), obtiveram 1045,15 mg GAE g⁻¹ de compostos fenólicos totais. Oliveira et al. (2024) reportaram 413 mg GAE g⁻¹ em cascas de romã utilizando a mesma combinação solvente. Resultados positivos também foram observados para bagaço de uva, bagaço de maçã e resíduos cítricos, evidenciando aumentos significativos na recuperação de compostos fenólicos e na atividade antioxidante dos extratos (Rashid et al., 2023; Plaza e Marina, 2025; Wang et al., 2025).

Os avanços obtidos com a combinação EAU-NADES têm demonstrado elevada eficiência na recuperação de compostos fenólicos, flavonoides e outros metabólitos bioativos a partir de resíduos agroindustriais. Entretanto, muitos desses compostos apresentam elevada instabilidade frente à exposição ao oxigênio, à luz, à umidade e às variações de temperatura, podendo sofrer degradação durante o armazenamento e processamento subsequentes (Filho et al., 2022; Vieira et al., 2024). Dessa forma, após a etapa de extração, torna-se fundamental a adoção de tecnologias capazes de preservar a integridade desses compostos e ampliar sua vida útil. Nesse contexto, diferentes métodos de secagem têm sido empregados para converter extratos líquidos em ingredientes em pó, incluindo liofilização, secagem em leito de jorro e secagem por atomização. Entre essas tecnologias, a atomização destaca-se pela elevada produtividade, menor custo operacional e capacidade de produzir partículas microencapsuladas com elevada estabilidade físico-química e funcional (Filho et al., 2022; Nordin et al., 2024). Assim, a associação entre técnicas sustentáveis de extração, como a EAU-NADES, e processos de microencapsulação por atomização representa uma estratégia promissora para a obtenção de ingredientes funcionais de alto valor agregado destinados às indústrias alimentícia, farmacêutica e cosmética.

Microencapsulação por atomização (*Spray drying*)

A microencapsulação por atomização é uma das tecnologias mais utilizadas para a estabilização e proteção de compostos bioativos sensíveis à ação da luz, oxigênio, umidade e temperatura (Filho et al., 2022). O processo consiste na transformação de uma suspensão ou emulsão líquida em partículas secas por meio da atomização em uma corrente de ar aquecido, promovendo a rápida evaporação da água e a formação de uma matriz protetora ao redor do material encapsulado. As partículas produzidas geralmente apresentam dimensões micrométricas,

podendo variar conforme as condições operacionais e os materiais empregados (Nordin et al., 2024).

Além da proteção contra fatores ambientais, a microencapsulação contribui para o aumento da estabilidade físico-química, melhora a solubilidade de compostos pouco hidrossolúveis, reduz perdas durante o armazenamento e favorece a incorporação dos bioativos em diferentes matrizes alimentícias. A eficiência do processo depende diretamente da escolha dos materiais de parede, os quais devem apresentar compatibilidade química com o núcleo encapsulado, boa capacidade de formação de filme e resistência às condições de processamento (Filho et al., 2022).

Entre os agentes encapsulantes mais empregados destacam-se a maltodextrina (MD) e a goma arábica (GA). A maltodextrina apresenta elevada solubilidade em água, baixa viscosidade e capacidade de formar estruturas amorfas estáveis, além de possuir baixo custo de aplicação (Rezende; Nogueira; Narain, 2018). A goma arábica, por sua vez, destaca-se por suas propriedades emulsificantes, elevada retenção de compostos voláteis e capacidade de formar filmes protetores eficientes. Outros materiais, como a goma xantana e proteínas vegetais ou animais, também têm sido investigados visando melhorar a retenção dos compostos bioativos e as propriedades funcionais dos pós obtidos (Nordin et al., 2024).

Nos últimos anos, a microencapsulação tem se consolidado como uma estratégia promissora para a valorização de resíduos agroindustriais ricos em compostos fenólicos, pigmentos naturais e antioxidantes. Diversos estudos demonstram o potencial da técnica na obtenção de ingredientes funcionais de alto valor agregado a partir de subprodutos de frutas. Vieira et al. (2024) obtiveram elevada eficiência de encapsulamento ao microencapsular extratos de pitaya vermelha ricos em betalaínas e compostos fenólicos utilizando maltodextrina como material de parede. Da mesma forma, Nordin et al. (2024) produziram pós microencapsulados de casca de abacaxi empregando maltodextrina e goma arábica, observando melhorias na estabilidade e na preservação dos compostos bioativos. Malakouti et al. (2025) também relataram resultados promissores utilizando proteínas obtidas de resíduos agroindustriais como materiais encapsulantes para extratos de bagaço de tomate, ampliando as possibilidades de aproveitamento sustentável de subprodutos vegetais.

METODOLOGIA

Os experimentos foram realizados no Departamento de Ciências do Consumo da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife, Pernambuco, Brasil, utilizando as instalações do Laboratório de Físico-Química de Alimentos e do Laboratório de Processamento de Alimentos, onde foram conduzidas as etapas de extração, microencapsulação e caracterização

físico-química dos extratos.

Obtenção do resíduo

O resíduo de acerola (cascas e sementes) foi fornecido por uma indústria de polpas de frutas congeladas localizada em Recife/PE.

Obtenção da farinha do resíduo de acerola (FRA)

O resíduo de acerola foi submetido à secagem em estufa com circulação de ar a 60 °C por 24 h, até atingir teor de umidade igual ou inferior a 10%. Em seguida, o material foi triturado em moinho multiuso TE 631/2 (Tecnal, Brasil). A farinha obtida foi acondicionada em sacos de polietileno de baixa densidade e armazenada a -18 °C até utilização.

Preparação dos NADES

Os solventes eutéticos naturais profundos (NADES) foram preparados conforme a metodologia proposta por Alasalvar e Yildirim (2021). Foi utilizado o sistema constituído por cloreto de colina (aceitador de ligações de hidrogênio) e ácido oxálico (doador de ligações de hidrogênio), na proporção molar de 1:1, devido à sua elevada eficiência na extração de compostos fenólicos, conforme relatado por Silva Júnior et al. (2026). Para a etapa de extração, o solvente foi diluído em água na proporção de 50% (v/v) de NADES e 50% (v/v) de água, seguindo as condições descritas pelos autores.

Obtenção do extrato de compostos bioativos do resíduo de acerola

A extração assistida por ultrassom utilizando NADES foi realizada com base na metodologia descrita por Airouyuma et al. (2022), com adaptações. As condições de extração adotadas foram definidas a partir do estudo de Silva Júnior et al. (2026), no qual diferentes formulações de NADES foram avaliadas quanto à eficiência na extração de compostos bioativos do resíduo de acerola.

Para obtenção do extrato, 1 g da farinha do resíduo de acerola foi misturado a 20 mL do NADES cloreto de colina:ácido oxálico (1:1) e 20 mL de água. A mistura foi submetida à extração assistida por ultrassom utilizando sistema de ultrassom do tipo sonda (QR1000, Ultronique, Ecosonics, São Paulo, Brasil), com potência máxima de 1000 W e frequência de 20 kHz. A extração foi conduzida por 20 min, utilizando amplitude ultrassônica de 60% (330 W), mantendo-se a temperatura entre 35 e 40 °C por meio de banho de água gelada, a fim de evitar a degradação térmica dos compostos bioativos. Após a extração, as amostras foram centrifugadas a 2000 rpm por

10 min. O sobrenadante foi filtrado e armazenado a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ até as análises posteriores.

Microencapsulação por atomização

A microencapsulação foi realizada em um atomizador (Figura 2) modelo MSD 1.0 (LABMAQ do Brasil LTDA). Os agentes encapsulantes utilizados foram maltodextrina 10DE (MD) (Ingredion, São Paulo, Brasil) e goma arábica (GA) (Dinâmica, São Paulo, Brasil), devido ao baixo custo e à elevada eficiência na retenção de compostos bioativos.

Figura 2: Atomizador utilizado na microencapsulação do extrato de FRA.



Fonte: Própria (2026).

O extrato da farinha do resíduo de acerola (FRA) foi homogeneizado com os agentes encapsulantes durante 5 min em homogeneizador Turrtec (Tecnal TE-102, Piracicaba, São Paulo, Brasil), utilizando velocidade de 14.000 rpm. A solução de alimentação apresentou concentração total de sólidos de 30% (m/m), sendo composta por 27% de material de parede e 3% de material de recheio (extrato). As condições operacionais empregadas na secagem por atomização foram: vazão de alimentação de 0,30 L/h, temperatura de entrada do ar de $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura de saída de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ e proporção entre maltodextrina e goma arábica de 0,75:1.

Determinação do teor de compostos fenólicos totais, atividade antioxidante e caracterização físico-química do extrato microencapsulado de FRA

O teor de compostos fenólicos totais (CFT) foi determinado pelo método espectrofotométrico utilizando o reagente de Folin-Ciocalteu (Sigma-Aldrich®, St. Louis, MO, USA), com leitura da absorbância a 725 nm, conforme metodologia descrita por Wettasinghe e

Shahidi (1999). A atividade antioxidante foi determinada pelo método FRAP, conforme descrito por Thaipong et al. (2006), com leitura da absorbância a 593 nm em espectrofotômetro (Shimadzu UV-1650PC, São Paulo, Brasil). Os resultados foram expressos em $\mu\text{mol Fe}^{2+} \text{ g}^{-1}$ de extrato.

A eficiência de microencapsulação (EM) foi determinada segundo Sáenz et al. (2009), sendo os cálculos realizados conforme Mahdavi et al. (2016). A higroscopicidade foi determinada de acordo com Cai e Corke (2000), com modificações, utilizando dessecador contendo solução salina saturada para controle da umidade relativa, seguida da determinação do ganho de massa.

A caracterização física do pó microencapsulado foi realizada por meio da determinação da densidade aparente, densidade absoluta e porosidade intragranular (ϵ), conforme Silva Júnior et al., (2023). A determinação da cor foi realizada por meio de um colorímetro portátil (modelo CR-400/410, Konica Minolta®, Tóquio, Japão), previamente calibrado com um padrão branco antes de cada análise, a fim de garantir a precisão e reprodutibilidade das medições. Seus parâmetros foram expressos em relação aos valores de L, a^* e b^* , sendo L referente à luminosidade, variando de valores positivos (maiores) a menores (mais escuro); a^* representando a tonalidade na escala do vermelho (+) ao verde (-); e b^* indicando a intensidade da cor amarela (+) a azul (-).

Análise estatística

Os resultados experimentais foram expressos como média $\pm$ desvio-padrão, obtidos a partir de análises realizadas em triplicata. Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, por se tratar da caracterização de uma única formulação, utilizando-se o software ASSISTAT, versão 7.7 (Silva & Azevedo, 2016).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização física e físico-química do extrato microencapsulado

Os resultados da caracterização física e físico-química do extrato microencapsulado de FRA estão apresentados na Tabela 1. Entre os parâmetros avaliados, o pH apresentou valor de 2,787, caracterizando o material como altamente ácido. Esse valor é próximo ao pH de 2,5 utilizado por Gomes et al. (2024), durante a extração de compostos bioativos de subprodutos de acerola, condição considerada favorável para a preservação de compostos fenólicos e vitamina C. Em contraste, Costa et al. relataram a necessidade de elevar o pH de suco concentrado de acerola verde de aproximadamente 3,85 para 7,0 antes da secagem por atomização, visando minimizar problemas de aderência nas paredes do equipamento. No presente estudo, a manutenção da acidez natural associada ao baixo teor de sólidos solúveis permitiu a obtenção de um pó estável sem a

necessidade de neutralização, contribuindo para a preservação dos compostos bioativos.

Tabela 1: Características físicas e físico-químicas do extrato microencapsulado de FRA.

Parâmetros	Média ± Desvio-Padrão
pH	2,787 ± 0,020
Higroscopicidade (g 100g ⁻¹)	16,705 ± 0,400
Sólidos Solúveis (°Brix)	1,875 ± 0,050
Umidade (%)	1,562 ± 0,209
Atividade de água (aw)	0,116 ± 0,009
Densidade Aparente	0,272 ± 0,007
Densidade Absoluta	1,010 ± 0,000
Porosidade Intragranular	72,335 ± 0,813
Luminosidade (L*)	74,100 ± 0,349
Intensidade de Vermelho (+a*)	1,850 ± 0,251
Intensidade de Amarelo (+b*)	6,250 ± 0,412

Fonte: Própria (2026).

A higroscopicidade do extrato microencapsulado foi de 16,705 g 100 g⁻¹, valor consideravelmente inferior aos observados por Costa et al. (2025), para pós de suco concentrado de acerola verde (20,01 a 22,03 g 100 g⁻¹), diferença que é tecnologicamente justificada pela natureza do subproduto, o qual apresenta menor teor de açúcares livres de baixo peso molecular que são altamente hidrofílicos. Por outro lado, o resultado obtido aproxima-se de maneira consistente dos índices relatados para materiais microencapsulados de resíduos vegetais, como os elaborados por Silva Júnior et al. (2023), para casca de ciriguela (11,20 a 15,24 g 100 g⁻¹) e por Gomes et al. (2024), para subprodutos de acerola atomizados com goma arábica (14,76 g 100 g⁻¹). Essa similaridade sugere que a matriz encapsulante contribuiu para reduzir a interação do pó com a umidade do ambiente. Tal característica estrutural pode contribuir para a manutenção da estabilidade do produto durante o armazenamento, uma vez que o controle rigoroso da absorção de água impede o efeito plastificante e a formação de pontes líquidas que causam a aglomeração e o empedramento (*caking*) das partículas, assegurando a fluidez do pó e contribuindo para a proteção dos compostos bioativos presentes no núcleo frente à degradação oxidativa.

O teor de sólidos solúveis totais do extrato de FRA foi de 1,875 °Brix, valor próximo ao reportado por Gomes et al. (2024), que observaram aproximadamente 2,54 °Brix antes da adição dos agentes encapsulantes. Essa proximidade sugere que a baixa concentração de sólidos solúveis é uma característica inerente a esse tipo de matéria-prima. Do ponto de vista tecnológico, menores concentrações de açúcares de baixo peso molecular tendem a reduzir a pegajosidade do material durante a secagem por atomização, uma vez que favorecem a manutenção da matriz em estado

vítreo e minimizam a adesão do produto às superfícies do equipamento.

A umidade residual do extrato microencapsulado de FRA foi de 1,562%, valor inferior aos reportados por Gomes et al. (2024), (5,02–10,05%), por Silva Júnior et al. (2023), para pós de casca de ciriguela (3,16–5,58%) e por Dang et al. (2024), para microcápsulas de acerola (2,95–4,01%). Baixos teores de umidade são desejáveis em produtos atomizados, pois contribuem para a estabilidade física e química durante o armazenamento. O resultado obtido sugere elevada eficiência do processo de secagem, reduzindo a disponibilidade de água no sistema e, consequentemente, minimizando fenômenos como aglomeração, empedramento e degradação de compostos bioativos.

A atividade de água foi de 0,116, resultado inferior aos reportados por Costa et al. (2025), que observaram valores entre 0,180 e 0,283, e por Silva Júnior et al. (2023), cujos resultados variaram de 0,155 a 0,235. Valores inferiores a 0,30 são considerados adequados para restringir o crescimento microbiano e reduzir a ocorrência de reações deteriorativas dependentes da água livre, contribuindo para a estabilidade e conservação de produtos em pó durante o armazenamento. Dessa forma, o resultado obtido indica elevada estabilidade microbiológica e físico-química do pó microencapsulado.

A densidade aparente foi de 0,272 g mL⁻¹, valor semelhante aos reportados por Dang et al. (2024), para microcápsulas de emulsão de acerola (0,21–0,23 g mL⁻¹) e por Silva Júnior et al. para pós de casca de ciriguela obtidos por atomização (0,25–0,31 g mL⁻¹). A densidade aparente está relacionada à massa do pó por unidade de volume, incluindo os espaços vazios presentes entre e no interior das partículas. O resultado obtido sugere a formação de partículas com características estruturais típicas de materiais produzidos por atomização. Além disso, a densidade aparente observada, associada à elevada porosidade intragranular do pó, pode favorecer a reidratação e a dispersão do produto, características desejáveis para aplicações em alimentos e ingredientes funcionais.

A densidade absoluta do extrato microencapsulado de FRA foi de 1,010 g mL⁻¹, valor próximo ao reportado por Silva Júnior et al. (2023), variando de 1,06 a 1,07 g mL⁻¹. Diferentemente da densidade aparente, a densidade absoluta considera apenas o volume efetivamente ocupado pela matéria sólida, desconsiderando os espaços vazios presentes entre e no interior das partículas. O resultado obtido foi semelhante aos relatados na literatura para materiais microencapsulados obtidos por atomização, característica desejável nesse tipo de produto. Além disso, a proximidade com os valores encontrados em outros estudos sugere que as condições de atomização empregadas foram adequadas, podendo contribuir para a estabilidade física do pó produzido.

A porosidade intragranular foi de 72,34%, valor ligeiramente superior ao observado por

Silva Júnior et al. (2023), para pós de casca de ciriguela (até 70,44%). Elevados níveis de porosidade são característicos de materiais produzidos por secagem por atomização e podem facilitar a difusão de água para o interior das partículas durante a reconstituição. Associada à baixa densidade aparente observada, essa característica pode favorecer a dispersão e a reidratação do produto, contribuindo para sua aplicabilidade em alimentos, bebidas e ingredientes funcionais.

Os parâmetros colorimétricos indicaram que o extrato microencapsulado de farelo/resíduo de acerola (FRA) apresentou elevada luminosidade ($L^* = 74,10$), evidenciando coloração clara e reduzida ocorrência de escurecimento durante o processo de secagem por atomização. Esse valor foi superior aos reportados por Gomes et al. (2024), para pós produzidos a partir de subprodutos de acerola, cujos valores de luminosidade variaram entre 1,38 e 19,39. Por outro lado, o resultado obtido neste estudo aproximou-se do observado por Silva Júnior et al. (2023), para microcápsulas de casca de ciriguela ($L^* = 89,73$). Segundo esses autores, a elevada luminosidade pode estar associada ao efeito de diluição promovido pelos agentes encapsulantes, especialmente maltodextrina e goma arábica, que contribuem para a obtenção de pós visualmente mais claros.

A combinação da elevada luminosidade com os baixos valores das coordenadas a^* e b^* indica a obtenção de um pó visualmente homogêneo e estável, característica corroborada pela aparência apresentada na Figura 3, que evidencia um produto de coloração clara e uniforme, favorável à aplicação em diferentes matrizes alimentícias sem promover alterações significativas em seus atributos visuais.

Figura 3: Aparência visual do extrato microencapsulado de FRA obtido por secagem por atomização.



Fonte: Própria (2026).

As coordenadas cromáticas a^* (+1,85) e b^* (+6,25) indicaram baixa intensidade das tonalidades vermelha e amarela, respectivamente, sugerindo que o sistema encapsulante contribuiu para a atenuação da coloração característica da matriz vegetal. Em comparação, Gomes et al. (2024), reportaram valores de a^* e b^* de até +32,88 e +31,41, respectivamente, evidenciando maior intensidade cromática dos pós obtidos. Resultados semelhantes aos observados neste estudo foram reportados por Silva Júnior et al., que obtiveram valores de a^* e b^* de -0,07 e +13,07,

respectivamente. De modo geral, os resultados sugerem que os materiais de parede contribuíram para minimizar alterações cromáticas decorrentes do processamento térmico, favorecendo a obtenção de um produto visualmente estável e com potencial para aplicação em diferentes matrizes alimentícias.

Teor de compostos fenólicos totais e atividade antioxidante

Os resultados referentes ao teor de compostos fenólicos totais (CFT), à eficiência de microencapsulamento (E.M.) e à capacidade antioxidante determinada pelo método FRAP estão apresentados na Tabela 2. O teor de CFT do extrato microencapsulado de FRA foi de 87,62 mg GAE g⁻¹, evidenciando elevada retenção de compostos bioativos após a secagem por atomização. Esse valor foi superior ao reportado por Gomes et al. (2024), cujo maior teor atingiu 18,55 mg GAE g⁻¹, indicando maior eficiência das condições de extração e processamento utilizadas neste estudo na preservação dos compostos fenólicos. Embora Costa et al. (2025), tenham reportado valores entre 107,16 e 273,02 mg GAE g⁻¹ para pós obtidos a partir de suco concentrado de acerola verde, destaca-se que o material utilizado neste trabalho consiste em um resíduo agroindustrial, o que demonstra seu elevado potencial como fonte sustentável de compostos bioativos.

A elevada retenção fenólica pode estar relacionada à alta eficiência de microencapsulamento observada, que contribuiu para a proteção dos compostos contra degradação térmica e oxidativa durante a secagem. Resultados semelhantes foram descritos por Silva Júnior et al. (2023), que associaram elevadas concentrações de compostos fenólicos à eficiência do sistema encapsulante e à proteção conferida pelos materiais de parede.

Tabela 2: Teor de compostos fenólicos totais (CFT, expresso em mg equivalentes de ácido gálico por grama de amostra, mg GAE g⁻¹), eficiência de microencapsulamento (E.M., %) e capacidade antioxidante determinada pelo método FRAP (poder antioxidante redutor férrico, µmol Fe²⁺ g⁻¹) dos extratos microencapsulados de FRA.

Parâmetros	Média ± Desvio-Padrão
CFT (mg GAE g ⁻¹)	87,620 ± 1,230
E.M. (%)	99,830 ± 0,005
FRAP (µmol Fe ²⁺ g ⁻¹)	592,570 ± 11,361

Fonte: Própria (2026).

A eficiência de microencapsulamento do extrato de FRA atingiu 99,83%, indicando que a quase totalidade dos compostos bioativos foi retida no interior das matrizes formadas. Esse valor foi semelhante ao máximo reportado por Silva Júnior et al. (2023), que alcançaram até 99,84% e superior ao observado por Dang et al. (2024), cuja eficiência de encapsulamento de compostos fenólicos atingiu 58,06%. A elevada eficiência obtida pode estar relacionada à rápida formação da

matriz encapsulante durante a secagem, promovendo a incorporação dos compostos bioativos no interior das partículas e reduzindo sua exposição na superfície do pó.

Do ponto de vista tecnológico, altos valores de EM são desejáveis, pois estão associados à maior proteção dos compostos encapsulados frente às condições de processamento e armazenamento. Dessa forma, a elevada eficiência observada neste estudo pode ter contribuído para a expressiva retenção de compostos fenólicos e para a elevada capacidade antioxidante do produto, evidenciando a eficácia do sistema encapsulante empregado.

O poder antioxidante redutor férrico (FRAP) foi de 592,57 $\mu\text{mol Fe}^{2+} \text{ g}^{-1}$, valor superior ao observado por Gomes et al. (2024), que reportaram atividade máxima de 256,56 $\mu\text{mol g}^{-1}$. A elevada capacidade antioxidante observada neste estudo está diretamente relacionada ao alto teor de compostos fenólicos totais, uma vez que esses compostos atuam como agentes redutores capazes de doar elétrons e neutralizar espécies reativas. Os resultados sugerem que o processo de microencapsulamento foi eficiente na preservação da atividade antioxidante dos compostos presentes no extrato, minimizando perdas decorrentes do processamento térmico.

CONCLUSÕES

A combinação da extração assistida por ultrassom utilizando NADES e da microencapsulação por atomização foi eficiente para a valorização de resíduo de acerola. O extrato microencapsulado apresentou baixa umidade (1,56%), reduzida atividade de água (0,116), elevado teor de compostos fenólicos totais (87,62 mg GAE g^{-1}), alta capacidade antioxidante (592,57 $\mu\text{mol Fe}^{2+} \text{ g}^{-1}$) e alta eficiência de microencapsulamento (99,83%), indicando adequada estabilidade físico-química e preservação dos compostos bioativos. Dessa forma, a associação dessas tecnologias mostra potencial para a obtenção de ingredientes funcionais sustentáveis, contribuindo para a agregação de valor aos resíduos agroindustriais e para o fortalecimento de estratégias alinhadas aos princípios da economia circular e da química verde.

REFERÊNCIAS

- AIROUYUWA, J. O.; MOSTAFA, H.; RIAZ, A.; MAQSOOD, S. Utilization of natural deep eutectic solvents and ultrasound-assisted extraction as green extraction technique for the recovery of bioactive compounds from date palm (*Phoenix dactylifera* L.) seeds: An investigation into optimization of process parameters. **Ultrasonics Sonochemistry**, v.91, 106233, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106233>.
- ALASALVAR, H.; YILDIRIM, Z. Ultrasound-assisted extraction of antioxidant phenolic compounds from *Lavandula angustifolia* flowers using natural deep eutectic solvents: an experimental design approach. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 22, p. 100492, 2021. DOI: 10.1016/j.scp.2021.100492.
- CAI, Y. Z.; CORKE, H. Production and properties of spray dried *Amaranthus* betacyanin pigments. **Journal of Food Science**, v. 65, n. 7, p. 1248–1252, 2000. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2000.tb10276.x.
- CHOI, Y. H.; VAN SPRONSEN, J.; DAI, Y.; VERBERNE, M.; HOLLMANN, F.; ARENDS, I. W. C. E.; WITKAMP, G. J.; VERPOORTE, R. Are natural deep eutectic solvents the missing link in understanding cellular metabolism and physiology? **Plant Physiology**, v. 156, n. 4, p. 1701–1705, 2011. DOI: 10.1104/pp.111.178426.
- COSTA, F. S.; SANTOS, J. C. C.; SILVA, M. D. C.; CRUZ, M. S.; SANTOS, A. A. L.; OLIVEIRA, C. R.; OLIVEIRA, L. F.; CORRÊA, J. L. G. Optimization of spray-drying conditions for green acerola concentrate juice: effect of temperature and maltodextrin. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.106, p.2527–2541, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.70354>.
- DANG, Y. T.; TRAN, H.; KHA, T. C. Encapsulation of W/O/W acerola emulsion by spray drying: optimization, release kinetics, and storage stability. **Foods**, v.13, p.1463, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13101463>.
- DURU, K. C.; DZUVOR, C. K. O.; ASANTE, D. B.; OSEI, F. A.; AMOAH, R. S.; AMOAH, S.; WANG, H.; XIAO, J. An eco-friendly approach to enhance the extraction and recovery efficiency of isoflavones from kudzu roots and soy molasses wastes using ultrasound-assisted extraction with natural deep eutectic solvents (NADES). **Industrial Crops and Products**, v. 182, p. 114886, 2022. DOI: 10.1016/j.indcrop.2022.114886.
- FILHO, E. N.; SILVA, L. M. R.; BRITO, E. S.; AZEVÊDO, A. M.; RODRIGUES, S. Microencapsulation of acerola (*Malpighia emarginata* DC) and ciriguela (*Spondias purpurea* L.) mixed juice with different wall materials. **Food Chemistry Advances**, v. 1, p. 100046, 2022. DOI: 10.1016/j.focha.2022.100046.
- GOMES, B. T.; ARAÚJO, C. S.; AGUIAR, L. L.; COSTA, A. G. V.; CARNEIRO, J. C. S.; SILVA, P. I. Acerola byproducts microencapsulated by spray and freeze-drying: the effect of carrier agent and drying method on the production of bioactive powder. **International Journal of Food Engineering**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1515/ijfe-2023-0285>.
- HONG, J.; DENG, M.; ZHAO, L. Natural deep eutectic solvent combined with ultrasonic enhancement: a green extraction strategy for solanesol in tobacco leaves. **Industrial Crops and Products**, v. 187, Part A, p. 115355, 2022. DOI: 10.1016/j.indcrop.2022.115355.

KRINGEL, D. H.; DIAS, A. R. G.; ZAVAREZE, E. R.; GANDRA, E. A. Fruit wastes as promising sources of starch: extraction, properties, and applications. *Starch - Stärke*, v.72, p.1900200, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/star.201900200>.

LAURINDO, L. F.; TAKEDA, L. N.; MACHADO, N. M.; OTOBONI, A. M. M. B.; GOULART, R. A.; CATHARIN, V. C. S.; SILVA, L. R.; BARBALHO, S. M.; DIREITO, R. Health benefits of acerola (*Malpighia* spp.) and its by-products: a comprehensive review of nutrient-rich composition, pharmacological potential, and industrial applications. **Food Bioscience**, v. 62, p. 105422, 2024. DOI: 10.1016/j.fbio.2024.105422.

LIMA, N. D.; SILVA, E. K.; BARBOSA, M. I. M. J.; MEIRELES, M. A. A. Green extraction of phenolic compounds from the by-product of purple araçá (*Psidium myrtilodes*) with natural deep eutectic solvents assisted by ultrasound: optimization, comparison, and bioactivity. **Food Research International**, v. 191, p. 114731, 2024. DOI: 10.1016/j.foodres.2024.114731.

MAHDAVI, S. A.; JAFARI, S. M.; ASSADPOOR, E.; DEHNAD, D. Microencapsulation optimization of natural anthocyanins with maltodextrin, gum Arabic and gelatin. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 85, p. 379–385, 2016. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2016.01.011.

MALAKOUTI, S.; PEIGHAMBARDoust, S. H.; SARABANDI, K.; HAMISHEHKAR, H. Valorization of agricultural waste into functional ingredients: Spray-drying microencapsulation of tomato pomace extract using native and enzymatically modified protein carriers. **Journal of Agriculture and Food Research**, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102392>.

MISKINIS, R. A. S.; NASCIMENTO, L. Á.; COLUSSI, R. Bioactive compounds from acerola pomace: A review. **Food Chemistry**, v. 404, Part A, p. 134613, 2023. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.134613

NOGUEIRA, G. D. R.; SILVA, P. B.; SOUZA, G. F. M. V.; DUARTE, C. R.; BARROZO, M. A. S. Vacuum microwave drying of acerola residue: effects of pre-treatment and operating variables on main bioactive compounds. **Waste and Biomass Valorization**, v. 14, p. 1281–1292, 2023. DOI: 10.1007/s12649-022-01925-4

NORDIN, N. L.; AZIZ, N. A. A.; SHAMSUDIN, R.; ABDUL HAMID, N. S.; ISMAIL, N. H.; OTHMAN, N. A. Microencapsulation of bioactive volatile compounds from MD2 pineapple peel extract using spray-drying and foam-mat drying. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 18, p. 101539, 2024. DOI: 10.1016/j.jafr.2024.101539.

OLEŹZKI, R.; HARASYM, J. Acerola (*Malpighia emarginata*) anti-inflammatory activity: a review. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 25, n. 4, p. 2089, 2024. DOI: 10.3390/ijms25042089.

OOMEN, W. W.; BEGINES, P.; MUSTAFA, N. R.; WILSON, E. G.; VERPOORTE, R.; CHOI, Y. H. Natural deep eutectic solvent extraction of flavonoids of *Scutellaria baicalensis* as a replacement for conventional organic solvents. **Molecules**, v. 25, n. 3, p. 617, 2020. DOI: 10.3390/molecules25030617.

PAP, N.; MARNILA, P.; PIHLAVA, J.-M., & TIENAHÖ, J. Optimization of ultrasound assisted extraction of the Sea buckthorn leaves, characterization of the phenolic compounds, and

determination of bioactive properties of the extracts. **Future Foods**, 10, 100487. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100487>.

PEREIRA, T. C.; SOUZA, V. P.; PADILHA, A. P. F.; DUARTE, F. A.; FLORES, E. M. M. Trends and perspectives on the ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds using natural deep eutectic solvents. **Current Opinion in Chemical Engineering**, v. 47, p. 101088, 2025. DOI: 10.1016/j.coche.2024.101088.

PLAZA, M.; MARINA, M. L. Natural deep eutectic solvents and ultrasound-assisted extraction for the recovery of antioxidant phenolic compounds from orange pomace. **Microchemical Journal**, v. 212, p. 113366, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.113366>.

POLETO, P.; ÁLVAREZ-RIVERA, G.; LÓPEZ, G.-D.; BORGES, O. M. A.; MENDIOLA, J. A.; IBÁÑEZ, E.; CIFUENTES, A. Recovery of ascorbic acid, phenolic compounds and carotenoids from acerola by-products: an opportunity for their valorization. **LWT**, v. 146, p. 111654, 2021. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.111654.

RASHID, R.; GANAIE, S. A.; NABI, B.; MASOODI, F. A.; AHMAD, M.; WANI, S. M. Green extraction of bioactive compounds from apple pomace by ultrasound assisted natural deep eutectic solvent extraction: optimisation, comparison and bioactivity. **Food Chemistry**, v. 398, p. 133871, 2023. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.133871.

REZENDE, Y. R. R. S.; NOGUEIRA, J. P.; NARAIN, N. Microencapsulation of extracts of bioactive compounds obtained from acerola (*Malpighia emarginata* DC) pulp and residue by spray and freeze drying: Chemical, morphological and chemometric characterization. **Food Chemistry**, v.254, p.281–291, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.02.026>.

SAÉNIZ, C.; TAPIA, S.; CHÁVEZ, J.; ROBERT, P. Microencapsulation by spray drying of bioactive compounds from cactus pear (*Opuntia ficus-indica*). **Food Chemistry**, v. 114, n. 2, p. 616–622, 2009. DOI: 10.1016/j.foodchem.2008.09.095.

SANTOS-MARTÍN, M.; CUBERO-CARDOSO, J.; GONZÁLEZ-DOMÍNGUEZ, R.; CORTÉS-TRIVIÑO, E.; SAYAGO, A.; URBANO, J.; FERNÁNDEZ-RECAMALES, Á. Ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from blueberry leaves using natural deep eutectic solvents (NADES) for the valorization of agrifood wastes. **Biomass and Bioenergy**, v. 175, 106882, 2023. DOI: 10.1016/j.biombioe.2023.106882.

SAYAGO-AYERDI, S.; GARCÍA-MARTÍNEZ, D. L.; RAMÍREZ-CASTILLO, A. C.; RAMÍREZ-CONCEPCIÓN, H. R.; VIUDA-MARTOS, M. Tropical fruits and their co-products as bioactive compounds and their health effects: a review. **Foods**, v. 10, n. 8, p. 1952, 2021. <https://doi.org/10.3390/foods10081952>.

SIDDIQUI, S. A.; SONI, M.; RAHMAN, M. H.; KHAN, M. K. I.; PATEL, A. S.; PATEL, M. R.; ALI REDHA, A.; JEEVAN KUMAR, S. P. Factors affecting the extraction of (poly)phenols from natural resources using deep eutectic solvents combined with ultrasound-assisted extraction. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 65, n. 1, p. 139–160, 2025. DOI: 10.1080/10408398.2023.2266846.

SILVA, F. de A. S. e.; AZEVEDO, C. A. V. de. The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. *Afr. J. Agric. Res*, v.11, n.39, p.3733-3740, 2016. DOI:

10.5897/AJAR2016.11522.

SILVA, P. B.; NOGUEIRA, G. D. R.; DUARTE, C. R.; BARROZO, M. A. S. A new rotary dryer assisted by infrared radiation for drying of acerola residues. **Waste and Biomass Valorization**, v. 12, p. 3395–3406, 2021. DOI: 10.1007/s12649-020-01222-y.

SILVA JÚNIOR, M. E.; ARAÚJO, M. V. R. L.; MARTINS, A. C. S.; LIMA, M. S.; SILVA, F. L. H.; CONVERTI, A.; MACIEL, M. I. S. Microencapsulation by spray-drying and freeze-drying of extract of phenolic compounds obtained from ciriguela peel. **Scientific Reports**, v.13, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40390-4>.

SILVA JÚNIOR, M. E.; SILVA, N. B.; CALDAS, A. G. C.; RAMOS, P. F. S.; LIMA, M. S.; MACIEL, M. I. S. Natural DEEP eutectic solvents (NADES) for sustainable extraction of phenolic compounds from acerola residue flour. **Food Research International**, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2026.118652>.

THAIPONG, K.; BOONPRAKOB, U.; CROSBY, K.; CISNEROS-ZEVALLOS, L.; BYRNE, D. H. Comparison of ABTS, DPPH, FRAP, and ORAC assays for estimating antioxidant activity from guava fruit extracts. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 19, n. 6–7, p. 669–675, 2006. DOI: 10.1016/j.jfca.2006.01.003.

VEGA-BAUDRIT, J. R.; CAMACHO, M.; BATISTA-MENEZES, D.; CORRALES-UREÑA, Y.; ZÚÑIGA, J. M.; MORA CHACÓN, A.; LECOT, N.; CASTILLO HENRÍQUEZ, L.; LOPRETTI, M. Acerola (*Malpighia* spp.) waste: a sustainable approach to nutraceutical, pharmaceutical, and energy applications. **Recycling**, v. 8, n. 6, p. 96, 2023. DOI: 10.3390/recycling8060096.

VIEIRA, T. R. R.; SILVA, E. K.; MEIRELES, M. A. A.; CAMPOS, F. R.; GOMES, M. T. M.; AZEVEDO, L.; BARBOSA, M. I. M. J. Red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) as a source of betalains and phenolic compounds: ultrasound extraction, microencapsulation, and evaluation of stability. **LWT - Food Science and Technology**, v. 196, p. 115755, 2024. DOI: 10.1016/j.lwt.2024.115755.

VILVERT, J. C.; FREITAS, S. T.; SANTOS, L. F.; RIBEIRO, T. S.; VELOSO, C. M. Phenolic compounds in acerola fruit and by-products: an overview on identification, quantification, influencing factors, and biological properties. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 18, p. 216–239, 2024. DOI: 10.1007/s11694-023-02175-1.

WANG, C.; LI, Y.; ZHANG, X.; LIU, H.; CHEN, J.; ZHAO, Y. Efficient recovery of procyanidins from grape residue by UAE-NADES and macroporous resin. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 119, p. 107400, 2025. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2025.107400.

WETTASINGHE, M.; SHAHIDI, F. Evening primrose meal: A source of natural antioxidants and scavenger of hydrogen peroxide and oxygen-derived free radicals. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 47, n. 5, p. 1801–1812, 1999. DOI: 10.1021/jf9810416

ZARIĆ, D.; PLJEVLJAKUŠIĆ, D.; ŠAVIKIN, K.; JANKOVIĆ, T.; MENKOVIĆ, N. Acerola (*Malpighia emarginata* D.C.): phytochemical profile, biological activities and industrial applications. *Plants*, v. 12, n. 21, p. 3754, 2023. DOI: 10.3390/plants12213754.