

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS – UEA
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA – EST
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

RONILDO PIMENTEL NUNES JÚNIOR

AVALIAÇÃO DA PARTIÇÃO DE CORANTE DE FOLHAS DE
CRAJIRU (*Arrabidaea chica*) POR SISTEMAS AQUOSOS
BIFÁSICOS MICELARES

MANAUS

2026

RONILDO PIMENTEL NUNES JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DA PARTIÇÃO DE CORANTE DE FOLHAS DE
CRAJIRU (*Arrabidaea chica*) POR SISTEMAS AQUOSOS
BIFÁSICOS MICELARES**

**Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Química da
Escola Superior de Tecnologia da
Universidade do Estado do Amazonas,
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química.**

Orientador: Profa. Dra. Ellen Raphael

Coorientador: Prof. Dr. Luciano Sindra Virtuoso

MANAUS

2026

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.

N972a

Nunes Júnior, Ronildo Pimentel

Avaliação da partição de corante de folhas de cajú (Anacardium occidentale L.) por sistemas aquosos bifásicos micelares / Ronildo Pimentel Nunes Júnior. Manaus : [s.n], 2026.

69 f.: color.; 21.0 cm.

TCC - Graduação em Engenharia Química- Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2026.

Inclui Bibliografia.

Orientador: Raphael, Ellen.

Coorientador: Virtuoso, Luciano Sindra.

1. Sistema Aquoso Bifásico Micelar. 2. Extração. 3. Coeficiente de Partição. 4. Cajú. 5. Corante Natural. I. Raphael, Ellen (Orient.) II . Virtuoso, Luciano Sindra (Coorient.) III. Universidade do Estado do Amazonas. IV. Título

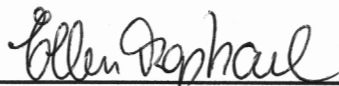
CDU(1997)54:62

RONILDO PIMENTEL NUNES JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DA PARTIÇÃO DE CORANTE DA FOLHA DE CRAJIRU
(*Arrabidaea chica*) POR SISTEMAS AQUOSOS BIFÁSICOS
MICELARES**

**Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Química da Escola
Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Química.**

Banca Examinadora:



Profa. Dra. Ellen Raphael – Orientadora



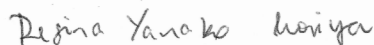
Documento assinado digitalmente

FAGNALDO BRAGA PONTES

Data: 25/06/2026 15:06:46-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Fagnaldo Braga Pontes – SENAI



Profa. Dra. Regina Yanako Moriya – UEA

Conceito: Aprovado

Manaus, 22 de junho de 2026

AGRADECIMENTOS

Ao Pai por toda força e graça.

A minha família, minha mãe, Iris, pois sua força, motivação e amor que torna possível o alcance dessa etapa. Aos meus irmãos, Iamiris, Ronald e Juan pelo companheirismo, gestos de carinho, compartilho com vocês (Acima de tudo, vistam-se do amor, que une perfeitamente todas as coisas).

A minha orientadora, Profa. Dra. Ellen Raphael, pela oportunidade, apoio e orientação nesses anos. Sua dedicação e amor ao ensino inspiram meu crescimento pessoal e acadêmico (Professores brilhantes ensinam para uma profissão. Professores fascinantes ensinam para a vida).

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Luciano Sindra Virtuoso, coordenador do Grupo Química de Coloides da Universidade Federal de Alfenas, pela colaboração e fornecimento dos dados de equilíbrio dos sistemas.

Aos amigos que a UEA me presenteou tornando essa jornada mais leve e divertida: Beatriz, Geraldo, Rangel, Luiz, Ruan, Adriano, Guilherme, Idaline, Thatierlen, Alessandra. Aos calouros inglórios, os chefes, engenheiros, sal grosso, grupo de op, relóginho, gestão lab... Especialmente, à Sabrina pela amizade e, com certeza, sem você não teria conseguido. Aos amigos externos do ambiente acadêmico, do estágio Isabela, Lia e Caio e da vida Jennifer, Anna, João, Rebeca (Se você encontrar alguém que faça você querer ser uma pessoa melhor, essa pessoa vale a pena manter por perto).

Ao Fagnaldo esse ser único que permitiu que eu aprendesse tanto ao seu lado. Agradeço pelo conhecimento doado, pelo tempo disponibilizado, pelos ensinamentos passados e pela amizade (Tudo no mundo começou com um sim). Ao meu grande amigo, Kahllyl, pela parceria e presença nos momentos mais desafiadores dentro e fora da faculdade (Foi-me dito que encontraria amizade no caminho, secreta e inesperada. Certamente eu não esperava encontrar uma amizade como a demonstrada aqui).

À Gabriela. Foi constante e essencial com seu amor, carinho, os momentos de risada, companheirismo e conversas nos momentos mais alegres e difíceis também (*You are the best thing that's ever been mine*).

Ao corpo docente do curso de engenharia química da UEA. Em especial, aos grandes professores Jefferson, Kiki, Regina, Érica e Claudia, pelos ensinamentos, paciência e investimento na construção da minha formação. À Sara, assessora do curso e colega, essencial

em tantos momentos que precisei e por acreditar na minha capacidade (Professor medíocre conta. O bom professor explica. O professor superior demonstra. O grande professor inspira!).

Ao HUB – Centro de Desenvolvimento, Tecnologia e Inovação e ao Laboratório Ilum e seu coordenador, Prof. Dr. Ricardo Serudo, pela estrutura e infraestrutura que possibilitaram a elaboração desta monografia.

Ao Laboratório Yvonne Mascarenhas (NANOPOL) do Departamento de Física de Materiais do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal do Amazonas, pelo ensaios de atividade antioxidante e teor de fenólicos totais.

RESUMO

A crescente demanda por corantes naturais tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias de extração e purificação mais sustentáveis, capazes de substituir processos convencionais baseados em solventes orgânicos. Nesse contexto, os Sistemas Aquosos Bifásicos Micelares (SABMs) destacam-se como uma alternativa promissora para a separação de compostos bioativos devido as propriedades oferecidas pelo surfactante, alta concentração de água e condições moderadas de operação. Diante disso, este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de SABMs formados por polietilenoglicol (PEG), Triton X-114 e água na partição de compostos corantes extraídos de folhas de crajiru (*Arrabidaea chica*). Para isso, foram preparados extratos na concentração de 40 mg.ml⁻¹ da folha em pó por 3 métodos diferentes (infusão, sonicação e maceração) e caracterizados quanto aos parâmetros colorimétricos, composição e UV-Vis. Os ensaios de partição no SABM foram realizados na temperatura de 20 °C variando o comprimento da linha de amarração (CLA) e o peso molecular do polímero (400 g.mol⁻¹ e 4000 g.mol⁻¹), avaliando-se o coeficiente de partição (k), a eficiência de extração (EE) e a variação da energia livre de Gibbs (ΔG). O extrato obtido por maceração apresentou maior intensidade de absorção da radiação eletromagnética, diferença colorimétrica ($\Delta E^* = 77,64 \pm 0,08$), atividade antioxidante (DPPH = $1600,567 \pm 47,808$ e ABTS = $3723,44 \pm 29,627$) e teor de antocianinas ($46,5899 \pm 2,0595$ mg.L⁻¹). Os SABM demonstraram potencial para a separação dos pigmentos presentes no crajiru, onde pôde-se observar uma eficiência de extração máxima de 86,87% e mínima de 70,80% do corante na fase inferior do SABM formado por PEG400 na linha de amarração 1 e PEG4000 na linha de amarração 5, respectivamente. Além disso, pôde-se constatar que para todos os sistemas obteve-se $k < 1$ e $\Delta G > 0$, indicando que a maior distinção das propriedades físico-química das fases resultou em maior distribuição do corante nas fases, assim como uma diminuição da barreira termodinâmica à transferência do corante para a fase superior. Dessa forma, os sistemas estudados mostraram-se uma alternativa sustentável e eficiente para a recuperação e concentração de corantes naturais de interesse industrial.

Palavras-chave: Sistema Aquoso Bifásico Micelar, Extração, Coeficiente de Partição, Crajiru, Corante Natural

ABSTRACT

The growing demand for natural dyes has driven the development of more sustainable extraction and purification technologies capable of replacing conventional processes based on organic solvents. In this context, Aqueous Biphasic Micellar Systems (ABMS) have emerged as a promising alternative for the separation of bioactive compounds due to their high water content, the properties imparted by surfactants, and their ability to operate under mild conditions. Accordingly, the objective of this study was to evaluate the potential of SABMs formed by polyethylene glycol (PEG), Triton X-114, and water in the partitioning of coloring compounds extracted from cajiru leaves (*Arrabidaea chica*). Therefore, extracts were prepared at a concentration of 40 mg.ml⁻¹ of leaf powder using three different methods (infusion, sonication, and maceration) and characterized in terms of colorimetric parameters, composition, and UV-Vis spectra. Partition tests in the SABM were conducted at 20 °C by varying the length of the tie-line length (TLL) and the molecular weight of the polymer (400 g·mol⁻¹ and 4000 g·mol⁻¹), the partition coefficient (k), the extraction efficiency (EE), and the Gibbs free energy change (ΔG) were evaluated. The extract obtained by maceration exhibited higher electromagnetic radiation absorption intensity, a colorimetric difference ($\Delta E^* = 77.64 \pm 0.08$), antioxidant activity (DPPH = 1600.567 ± 47.808 and ABTS = 3723.44 ± 29.627), and anthocyanin content (46.5899 ± 2.0595 mg·L⁻¹). The SABMs demonstrated potential for separating the pigments present in cajiru, achieving a maximum extraction efficiency of 86.87% and a minimum of 70.80% of the dye were observed in the lower phase of the SABM formed by PEG400 in tie line 1 and PEG4000 in tie line 5, respectively. Furthermore, it was found that for all systems, $k < 1$ and $\Delta G > 0$, indicating the greater difference in the physicochemical properties of the phases resulted in a greater distribution of the dye across the phases, as well as a reduction in the thermodynamic driving force for dye transfer to the upper phase. Thus, the systems studied proved to be a sustainable and efficient alternative for the recovery and concentration of natural dyes of industrial interest.

Keywords: Aqueous Biphasic Micellar System, Extraction, Partition Coefficient, Cajiru, Natural Colorant

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aplicabilidade dos Corantes Naturais.....	18
Figura 2 – Frutos de Açaí.....	20
Figura 3 – Folhas de Crajiru.....	21
Figura 4 – Frutos de Urucum.....	21
Figura 5 – Frutos de Jenipapo.....	22
Figura 6 – Diagrama de Fases.....	25
Figura 7.a – Visão geral de SAB: polímero/polímero.....	26
Figura 7.b – Visão geral de SAB: polímero/sal.....	26
Figura 7.c – Visão geral de SAB: líquido iônico/sal.....	26
Figura 8 – Exemplos de SAB polímero/polímero.....	27
Figura 9 – Exemplos de SAB polímero/sal.....	28
Figura 10 – Exemplos de SAB sal/sal.....	29
Figura 11 – Formação de Micelas.....	30
Figura 12 – Representação esquemática de Diagrama de Fases de SAB.....	32
Figura 13 – Folhas de crajiru.....	35
Figura 14 – Folhas de crajiru em pó.....	35
Figura 15 – Espectrofotômetro UV-Vis.....	38
Figura 16 – Banho Ultrassônico.....	41
Figura 17 – Balança Analítica.....	41
Figura 18 – Centrífuga.....	43
Figura 19 – ExtA por infusão.....	45
Figura 20 – ExtB por EAU.....	45
Figura 21 – ExtC por maceração.....	45
Figura 22 – Coordenadas de cromaticidade CIELAB calculadas a partir dos espectros de emissão dos extratos: ● ExtB; ■ ExtC e ▲ ExtA.....	46
Figura 23 – Espectros de absorção dos extratos.....	49
Figura 24 – Estrutura molecular do kaempferol.....	49
Figura 25 – Sistemas após partição.....	51
Figura 26 – Sistema PEG400-LA1 após partição.....	51
Figura 27 – Espectros de absorção do corante nas fases dos SABM.....	54
Figura 28 – Efeito do CLA no coeficiente de partição do corante em SABM formado por PEG 400 g.mol ⁻¹ + Triton X-144 + H ₂ O.....	55

Figura 29 – Efeito do CLA no coeficiente de partição do corante em SABM formado por PEG 4000 g.mol ⁻¹ + Triton X-144 + H ₂ O.....	56
Figura 30 – Efeito do ΔG em função do CLA dos SABM formado por PEG 400 g.mol ⁻¹ + Triton X-144 + H ₂ O.....	57
Figura 31 – Efeito do ΔG em função do CLA dos SABM formado por PEG 4000 g.mol ⁻¹ + Triton X-144 + H ₂ O.....	57
Figura 32 – Efeito do peso molecular do PEG na eficiência de extração.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação de corantes.....	19
Tabela 2 – Informações dos reagentes.....	34
Tabela 3 – Composição dos SABM formados por PEG 400 g.mol ⁻¹ + Triton X-114 + Água à 293,15 K.....	39
Tabela 4 – Composição dos SABM formados por PEG 4000 g.mol ⁻¹ + Triton X-114 + Água à 293,15 K.....	39
Tabela 5 – Nova composição global dos SABM formados por PEG 400 g.mol ⁻¹ + Triton X-114 + Água à 293,15 K.....	40
Tabela 6 – Nova composição global dos SABM formados por PEG 400 g.mol ⁻¹ + Triton X-114 + Água à 293,15 K.....	40
Tabela 7 – Composição mássica dos sistemas de partição com PEG 400.....	42
Tabela 8 – Composição mássica dos sistemas de partição com PEG 4000.....	43
Tabela 9 – Parâmetros colorimétricos dos extratos.....	46
Tabela 10 – Teor de fenólicos e antocianinas nos extratos.....	47
Tabela 11 – Valores de atividade antioxidante dos extratos.....	48
Tabela 12 – Dados de partição do corante para o SABM com PEG 400.....	52
Tabela 13 – Dados de partição do corante para o SABM com PEG 400.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABTS	Ácido 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfônico)
CAS	<i>Chemical Abstract Service</i>
CMC	Concentração Micelar Crítica
CLA	Comprimento da Linha de Amarração
DPPH	2,2-difenil-1-picrilhidrazil
EAU	Extração Assistida por Ultrassom
EE	Eficiência de Ultrassom
FI	Fase Inferior
FRAP	<i>Ferric Reducing Antioxidant Power</i>
FS	Fase Superior
ILA	Inclinação da Linha de Amarração
LA	Linha de Amarração
LI	Líquido Iônico
PAA	Poli(Ácido Acrílico)
PEG	Polietilenoglicol
PM	Peso Molecular
PPG	Polipropilenoglicol
PSS	Poliestirenosulfonado
SAB	Sistema Aquoso Bifásico
SABM	Sistema Aquoso Bifásico Micelar
TPTZ	2,4,6-Tris(2-piridil)-s-triazina
UV-Vis	Espectroscopia Ultravioleta-Visível
ΔE^*	Diferença total de cor
ΔG	Energia livre de Gibbs
Λ	Comprimento de onda
E	Absortividade molar
M	Micro
L^*	Luminosidade
a^*	Coordenada vermelho-verde
b^*	Coordenada amarelo-azul
k_p	Coefficiente de Partição

EE	Eficiência de Extração
Abs ^{FS}	Absorbância da Fase Superior
Abs ^{FI}	Absorbância da Fase Inferior
W ^{FS}	Concentração da Fase Superior
W ^{FI}	Concentração da Fase Inferior
m ^{FS}	Massa da Fase Superior
m ^{FI}	Massa da Fase Inferior
m ^{Ext}	Massa de extrato
X ₁	Fração mássica de PEG
X ₂	Fração mássica de Triton X-114
X ₃	Fração mássica de Água
A	Absorbância
FD	Fator de diluição
L	Caminho óptico
R	Constante universal dos gases
T	Temperatura
°C	Grau Celsius
K	Kelvin
G	Grama
M	Mili
L	Litro
M	Molar
Rpm	Rotações por minuto
Nm	Nanômetro
W	Watt
J	Joule
Mesh	Unidade de granulometria

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
2 OBJETIVO.....	17
2.1 OBJETIVO GERAL.....	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	18
3.1 CORANTES.....	18
3.1.1 Corantes da Região Amazônica.....	20
3.2 MÉTODOS DE EXTRAÇÃO DE CORANTES.....	22
3.2.1 Métodos Convencionais.....	22
3.2.2 Métodos Não Convencionais.....	23
3.3 SISTEMAS AQUOSOS BIFÁSICOS.....	24
3.4 TIPOS DE SISTEMAS AQUOSOS BIFÁSICOS.....	26
3.4.1 Polímero/Polímero.....	27
3.4.2 Polímero/Sal.....	28
3.4.3 Sal/Sal.....	29
3.4.5 Polímero/Surfactante.....	30
3.5 DIAGRAMAS DE FASES.....	31
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	34
4.1 REAGENTES.....	34
4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	34
4.2.1 Preparo da matéria-prima.....	34
4.2.2 Métodos de Extração do Corante.....	35
4.2.3 Caracterização dos Extratos.....	35
4.2.3.1 Caracterização Colorimétrica.....	35
4.2.3.2 Determinação de Fenólicos e Antocianinas.....	36
4.2.3.3 Determinação da Atividade Antioxidante.....	37
4.2.3.4 Espectroscopia do Ultravioleta e Visível.....	38
4.2.4 Montagem dos Sistemas Iniciais de Composição Global.....	38
4.2.5 Montagem dos Sistemas de Partição.....	41
4.2.6 Cálculo dos Dados Termodinâmicos de Partição.....	44
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS EXTRATOS.....	45

5.1.1 Caracterização Colorimétrica.....	45
5.1.2 Compostos Fenólicos e Antocianinas.....	47
5.1.3 Atividade Antioxidante.....	48
5.1.4 Caracterização Espectral dos Extratos de Crajiru.....	49
5.2 PARTICIONAMENTO DO EXTRATO.....	50
5.2.1 Influência da Concentração no Coeficiente de Partição.....	54
5.2.2 Influência do Comprimento da Linha de Amarração.....	55
5.2.3 Influência da Peso Molecular do Polietilenoglicol.....	58
6 CONCLUSÃO.....	60
7 PERSPECTIVAS.....	61
REFERÊNCIAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

A obtenção da ampla variedade de produtos utilizados pela sociedade moderna está diretamente relacionada às atividades da indústria química, como as indústrias alimentícia, petroquímica, farmacêutica, de papel e celulose, cosmética e de tratamento de água. Por meio de processos de transformação física, química e biológica, a indústria química possibilita a produção de bens de consumo, como medicamentos, combustíveis, materiais poliméricos, produtos de higiene e saneantes, contribuindo significativamente para a melhoria da qualidade de vida da população (De Figueiredo *et al.*, 2023).

Alguns produtos, como alimentos, medicamentos e cosméticos, necessitam da adição de diversos compostos para atender aos requisitos de qualidade e aceitação do consumidor. Entre eles, destacam-se os corantes, substâncias responsáveis por conferir ou intensificar a coloração dos produtos (Martins, 2016). No entanto, a utilização de corantes, especialmente em alimentos, requer atenção devido aos possíveis impactos à saúde associados a alguns compostos sintéticos. Dessa forma, observa-se um crescente interesse pelo uso de corantes naturais, que além de proporcionarem coloração, podem apresentar propriedades bioativas e atender à demanda por produtos mais seguros e sustentáveis (Sigurgisladottir *et al.*, 2020)

Além do crescente interesse pela substituição dos corantes sintéticos por alternativas naturais, os processos de obtenção e produção desses compostos também têm despertado atenção da comunidade científica. Tradicionalmente, a extração de pigmentos naturais é realizada com o emprego de solventes orgânicos, os quais podem apresentar elevada toxicidade, inflamabilidade e impactos ambientais associados ao seu descarte. Nesse contexto, a utilização de solventes alternativos e tecnologias de extração ambientalmente amigáveis tem se destacado como uma estratégia promissora para a obtenção de corantes naturais com maior qualidade e menor impacto ambiental (Chemat, Vian, Cravotto, 2012)

Os processos de separação desempenham um papel fundamental na obtenção, purificação e concentração de compostos de interesse, como corantes naturais. Dentre esses processos, a extração líquido-líquido destaca-se por possibilitar a transferência seletiva de um soluto entre duas fases líquidas imiscíveis, explorando diferenças em propriedades físico-químicas, como solubilidade, polaridade e coeficiente de partição. Essa operação apresenta diversas vantagens em relação a métodos convencionais de separação, especialmente para compostos termosensíveis (Kilikian *et al.*, 2020)

A eficiência da extração líquido-líquido está diretamente relacionada aos princípios termodinâmicos do sistema de extração, assim como dos compostos nas fases. Esses princípios

são descritos pelo equilíbrio líquido-líquido (ELL), onde as propriedades intensivas das fases não se alteram ao longo do tempo. Por isso, para uma possível aplicação de extração líquido-líquido de uma determinada espécie, faz-se necessário o conhecimento dos dados de equilíbrio entre as fases (Stragevitch, 1992)

Apesar da ampla aplicação da extração líquido-líquido em processos industriais, sua utilização convencional apresenta algumas limitações relacionadas ao emprego de solventes orgânicos. Muitos desses solventes são inflamáveis, voláteis e potencialmente nocivos à saúde humana e ao meio ambiente, por exemplo, o etanol que ainda apresenta limitações relacionadas à inflamabilidade. Nesse contexto, tem crescido o interesse pelo desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis, seja na substituição da matriz líquida ou do processo de extração (Penido *et al.*, 2022)

Nos últimos anos, os Sistemas Aquosos Bifásicos (SABs) têm despertado crescente interesse da comunidade científica como uma alternativa promissora para processos de separação e purificação. Esses sistemas são formados por substâncias de baixa toxicidade, como polímeros, sais, líquidos iônicos ou surfactantes, principalmente, em meio aquoso. A principal característica dos SABs é formação de duas fases imiscíveis sob condições específicas de temperatura, pressão e composição. Devido às condições de operação, como baixa temperatura e pressão, e composição, majoritariamente, água, os SABs destacam-se como uma tecnologia “verde” para a extração, concentração e purificação de biomoléculas, pigmentos naturais e outros compostos de interesse industrial (Hatti-Kaul, 2001).

Dentre os diferentes tipos de SABs, os Sistemas Aquosos Bifásicos Micelares (SABMs) têm recebido atenção devido à sua elevada eficiência na separação de compostos orgânicos e biomoléculas. Esses sistemas são formados por soluções aquosas de surfactantes que, acima da concentração micelar crítica (CMC) e sob condições específicas se separam em duas fases aquosas. Tendo uma fase rica em surfactante cria-se fases com diferentes propriedades físico-químicas favorecendo a partição de espécies (Li *et al.*, 2020).

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar o potencial de Sistemas Aquosos Bifásicos Micelares formado por Polietilenoglicol + Triton X-114 + Água sob temperatura de 293,15 K na extração e partição de compostos corantes presentes nos extratos de cajuru (*Arrabidaea chica*), visando o desenvolvimento de uma estratégia de separação mais sustentável e eficiente.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho consiste em avaliar a partição de corante vegetal da região amazônica por SABM formados por Polietilenoglicol, Água e Triton X-114 à 293,15 K.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

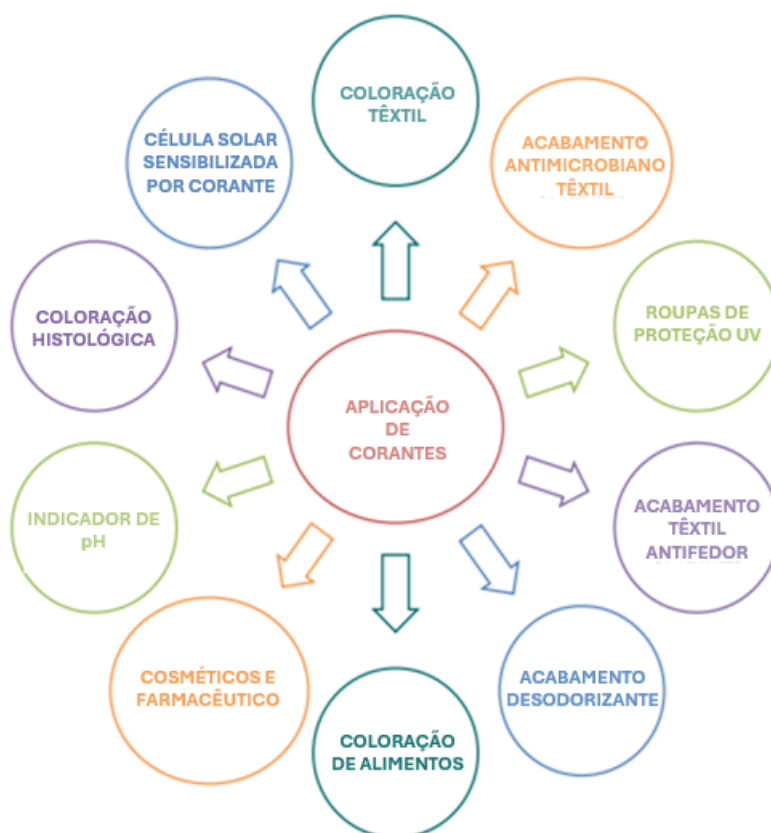
- i. Selecionar o método de obtenção do extrato de corante avaliando as propriedades espectroscópicas e composicional;
- ii. Particionar corante vegetal obtido do crajiru em SABM formado por Polietilenoglicol + Triton X-114 + Água sob temperatura de 293,15 K;
- iii. Avaliar a influência do peso molecular do polímero PEG e o CLA na partição do corante vegetal.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 CORANTES

Os corantes são substâncias químicas orgânicas com grupos cromóforos, ou seja, possuem a habilidade de absorver a radiação eletromagnética (Shahid, 2013) e atuam colorindo diversos materiais como tecidos (Bhatia, 2017), papéis (Qhadir, 2015), cosméticos (Guerra, 2018) e alimentos (Novais, 2022). Como pode-se observar pela Figura 1, os corantes conferem cores estáveis e uniformes, o que é crucial para o apelo visual, padronização e reconhecimento da marca e produtos como na indústria têxtil, cosmética, farmacêutica e de alimentos.

Figura 1 – Aplicabilidade dos corantes naturais



Fonte: Özomay (2022)

Do ponto de vista da química fina, a síntese e formulação de corantes exigem profunda expertise em química orgânica para garantir a fixação (em têxteis), a segurança toxicológica

(em alimentos e fármacos) e a estabilidade do produto frente à luz, calor e pH, impulsionando a pesquisa contínua por alternativas mais eficientes e sustentáveis, como os corantes de alta performance e os de origem natural.

Essas substâncias são classificadas como aditivos alimentares, pois possuem o objetivo de alterar características físicas dos alimentos sem conferir quaisquer aspectos nutritivos (Brasil, 1997). Segundo o Brasil (1977), os corantes possuem 5 classes de distinção, sendo elas:

- I. Corante orgânico natural: obtido a partir de vegetais ou animais;
- II. Corante orgânico sintético: obtido a partir de síntese orgânica, sendo ainda dividido em artificial (não se encontra em produtos naturais) e idêntico ao natural (estrutura química semelhante ao orgânico natural);
- III. Corante inorgânico: obtido de substâncias minerais;
- IV. Caramelo: obtido pelo aquecimento de açúcares; e
- V. Caramelo (processo amônia): idêntico ao natural obtido pelo processo amônia.

Cada classe de corante possui uma quantidade restrita permitida para aplicabilidade em alimentos e bebida, veja alguns exemplos na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação de Corantes

Classificação	Exemplos
Corante orgânico natural	Curcumina, Riboflavina, Cochonilha, Urzela, Caramelo, Carvão medicinal, Carotenóides, Xantofilas, Antocianinas
Corante orgânico sintético artificial	Amarelo crepúsculo, Laranja GGN, Tartrazina, Azul brilhante, Indigotina, Eritrosina, Ponceau 4R
Corante orgânico sintético idêntico ao natural	Beta-caroteno, Cantaxanteno, Complexo cúprico de clorofila, Caramelo amônia
Corante inorgânico	Carbonato de cálcio, Dióxido de Titânio, Alumínio, Hidróxido de ferro

Fonte: Adaptado de Brasil (1977)

Sabe-se que o emprego de corantes naturais traz benefícios tanto estéticos quanto nutritivos e funcionais (a depender da substância). A curcumina, por exemplo, confere coloração amarelada ou laranja para os alimentos, além de ser fonte de antioxidantes. No entanto, a indústria enfrenta desafios relacionados ao processamento dos corantes naturais devido às instabilidades térmicas, pH e luminosidade. Outro ponto a ser levado em consideração tem relação com intensidade de coloração quando comparados aos sintéticos, exigindo novas técnicas de extração e purificação (Zanoni, Yamanaka, 2016)

3.1.1 Corantes da Região Amazônica

Considera-se floresta amazônica uma fonte de grande variedade de espécies da fauna e flora, possibilitando recursos para pesquisa e desenvolvimento de produtos. Em outras palavras, há várias espécies conhecidas que apresentam potencial para obtenção de corantes naturais a partir de folhas, flores, cascas, sementes e outras partes (De Souza, 2018). Algumas das espécies mais conhecidas são:

- Açaí (*Euterpe precatoria* Mart.): o açaí (Figura 2) é um fruto distribuído geograficamente na região norte do Brasil, sendo bastante utilizada para atividades econômicas comercializada na forma de refresco pastoso, sorvete, picolés, doces, entre outros. Em sua composição química, se apresentam as antocianinas, pigmento responsável por ação antioxidante representando uma importância para indústria alimentícia, cosmética e farmacológica (Homma *et al.*, 2006)

Figura 2 – Frutos de Açaí



Fonte: Carvalho (2021)

- Crajiru (*Arribadecea chica Verlot*): o crajiru é uma planta comum na Região Amazônica, possui propriedades anti-inflamatórias exercendo atividades contra vários malefícios da saúde humana, como infecções, diarreia, leucemia, entre outros. A partir das folhas (Figura 3), pode-se obter um corante vermelho-escuro de caráter hidrofóbico e solúvel em álcoois e óleos (Behrens *et al.*, 2012).

Figura 3 – Folhas de Crajiru



Fonte: Embrapa

- Urucum (*Bixa orellana L.*): o urucum (Figura 4) ou colorau é uma espécie nativa do Brasil espalhada por todo o território. Seu principal uso é como colorífico e corante para indústrias alimentícias, farmacêuticas, têxteis, tintas, entre outras (Garcia *et al.*, 2012).

Figura 4 – Fruto de Urucum



Fonte: Embrapa

- Jenipapo (*Genipa americana*): o jenipapo é um fruto da região amazônica (Figura 5), conhecido por conter uma substância corante violeta ou azul-escuro, denominada genipina. Esse pigmento corante é solúvel na água e no álcool, porém sua torna-se pouco comestível na região (Nascimento *et al.*, 2024)

Figura 5 – Frutos de Jenipapo



Fonte: Embrapa

Vários trabalhos na literatura relatam a extração de corante de matriz vegetal da Região Amazônica. Por exemplo, Amâncio (2019) estudou a aplicabilidade de corantes obtidos do açaí, urucum, murtinha, crajiru e jenipapo na confecção de fotoanodos para células solares sensibilizadas por corantes. Outro estudo, explorou o potencial de tingimento do couro de Matrinxã (*Brycon amazonicus*) de espécies como açaí, bacuripari, cacauí, crajiru, cupuaçu, murici, patauí, rambutã, entre outros (Melo, 2007)

3.2 MÉTODOS DE EXTRAÇÃO DE CORANTES

3.2.1 Métodos Convencionais

Os métodos convencionais de extração de corantes naturais são técnicas estabelecidas e de baixo custo que utilizam princípios básicos de solubilidade e temperatura. Eles geralmente envolvem as seguintes abordagens:

- **Extração Aquosa:** A extração aquosa é um método tradicional para extração de corantes naturais de uma variedade de materiais, onde baseia-se no uso principal de água com ou sem a presença de sais, ácidos, bases e álcool durante o processo. O processamento ocorre, basicamente, em etapas sequenciais iniciando pela

cominuição do material, imersão em água, aquecimento e, por fim, filtração obtendo o corante desejado. A principal desvantagem desse método consiste na degradação térmica dos pigmentos presente no material, tendo em vista sua alta sensibilidade sob temperaturas elevadas, além da necessidade de alta solubilidade dos pigmentos em água (Shrivastava *et al.*, 2006)

- **Extração com Solvente:** Os corantes naturais também podem ser extraídos usando solventes orgânicos com objetivo de maximizar a eficiência de extração e compatibilidade de polaridade com os corantes. Os solventes podem ser halogenados, oxigenados e até misturas de solventes, sendo o etanol mais utilizado. No entanto, esse tipo de extração requer atenções relacionadas ao equipamento, sendo em escala laboratorial, comumente, usado o extrator Soxhlet, onde o solvente puro vaporiza, condensa-se e lava repetidamente a amostra sólida, concentrando de forma eficiente o corante no balão de aquecimento. Em geral, solvente orgânicos são uma boa opção para corantes hidrofóbicos, além da possibilidade de realização a uma temperatura mais baixa (Sk *et al.*, 2021)
- **Extração Ácida e Alcalina:** A maioria das corantes naturais são glicosídeos, que podem ser extraídos em condições ácidas ou alcalinas, sendo, preferencialmente, o uso de meio acidificado para a extração do corante natural. As soluções alcalinas são adequadas para corantes com grupos fenólicos na sua estrutura (Khatun *et al.*, 2017)

Esses métodos formam a base histórica da extração de corantes, mas estão sendo cada vez mais complementados por técnicas modernas que visam maior eficiência e sustentabilidade. A substituição de solventes orgânicos e voláteis na extração de corantes é vital para redução de riscos à saúde e maximização da segurança da operação, além de minimizar os impactos ambientais negativos, como emissão de compostos orgânicos voláteis e a geração de resíduos tóxicos (Chungkrang, 2021)

3.2.2 Métodos Não Convencionais

Os métodos não convencionais ou emergentes de extração de corantes representam um avanço significativo em relação às técnicas tradicionais, focando na redução do tempo de processo, aumento do rendimento, menor uso de solventes e preservação da qualidade dos pigmentos (principalmente os naturais e termossensíveis), estão entre eles:

- **Extração Assistida por Ultrassom:** Esse processo utiliza ondas ultrassônicas melhora a extração dos corantes, através do aumento da área de superfície entre as fases sólida e

líquida, levando a uma extração mais eficiente. A principal variável de estudo está relacionada à frequência das ondas, sendo ajustável para melhor otimização da extração e redução da perda de energia. Esse método torna-se vantajoso pela diminuição na quantidade de solvente necessária, no tempo e na temperatura de extração, e se prova ser ambientalmente correta (Sheikh, 2016)

- **Extração Assistida por Micro-ondas:** consiste no uso de energia eletromagnética para geração de calor liberando constituintes da amostra para o solvente. Esses sistemas podem ser do tipo fechado, onde a extração ocorre sob alta pressão e temperatura, porém com rendimento limitado da amostra; e do tipo aberto, onde ocorre à pressão atmosférica, proporcionando maior rendimento e ideal para compostos termossensíveis (Rehman *et al.*, 2022).
- **Extração com Fluido Supercrítico:** o fluido supercrítico é um substituto aos solventes tradicionais devido às características únicas desses fluidos, como alta densidade, viscosidade e solubilidade. Por isso, o método oferece vantagens como extração mais rápida, alta seletividade e capacidade de operar em temperatura ambiente ou baixa. Ele também reduz a poluição por solventes e preserva as propriedades dos corantes, especialmente em corantes termossensíveis (Ragab, 2022).

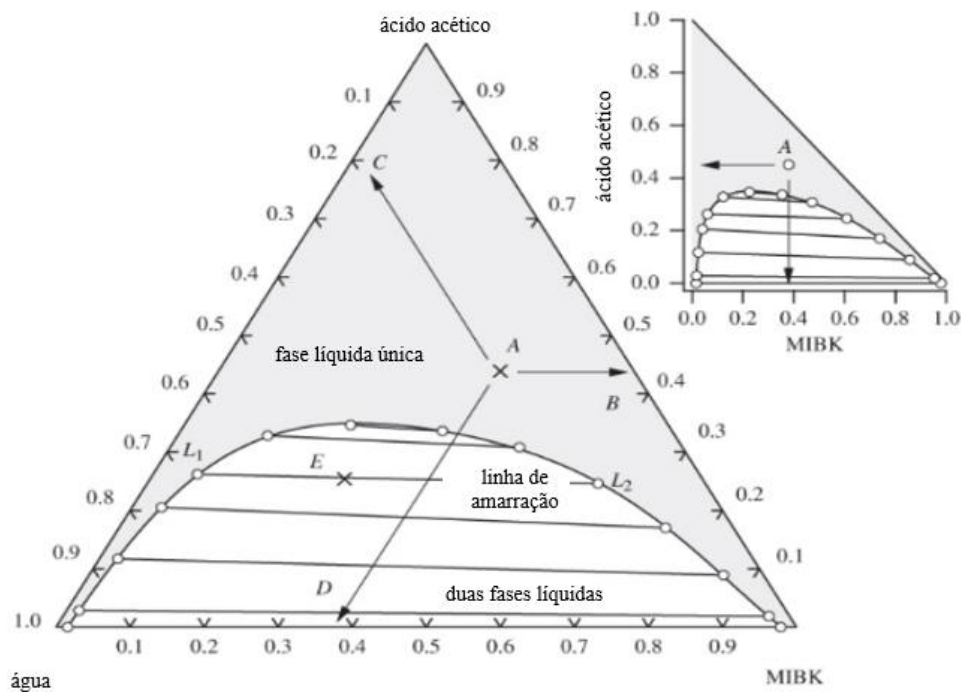
A substituição de solventes orgânicos e voláteis na extração de corantes é ponto crucial para o futuro da Engenharia Sustentável. Entre os mais recentes substitutos, encontra-se a aplicação dos Sistemas Aquosos Bifásicos (SAB). O SAB, por ser predominantemente composto por água (o solvente mais seguro e abundante) e componentes como polímeros atóxicos (ex: PEG) ou sais, elimina a necessidade de solventes orgânicos perigosos (Singla, 2023).

3.3 SISTEMAS AQUOSOS BIFÁSICOS

Através a da Figura 6, conseguimos visualizar o comportamento de Sistemas Aquosos Bifásicos (SAB) que ocorrem a partir da separação espontânea de duas fases aquosas imiscíveis quando dois compostos são misturados a uma determinada temperatura, pressão e composição. Apesar dos compostos serem solúveis ou parcialmente solúveis em água, suas propriedades como interações específicas e alta concentração provocam a permanência em fases distintas. Em geral, a água é o principal constituinte de ambas as fases, o que torna os SAB sistemas

suaves e biocompatíveis, amplamente utilizados em processos de separação e purificação de biomoléculas (Garza-Madrid *et al.*, 2010).

Figura 6 – Diagrama de Fases



Fonte: Matsoukas (2016)

Acredita-se que o surgimento dos sistemas aquosos bifásicos ocorreu em meados do século XIX. A primeira observação é de 1896, realizada pelo microbiologista Martinus Willem Beijerinck, que notou a formação espontânea de duas fases imiscíveis ao misturar soluções de ágar e gelatina em determinada faixa de temperatura e composição. Porém, torna-se, recente o estudo dos SABs, se iniciando na década de 1950 com o trabalho de Per-Åke Albertsson. Albertsson demonstrando a potencial aplicação para a separação e purificação de materiais biológicos (Albertsson *et al.*, 1990).

No entanto, deve-se levar em consideração uma série de fatores controláveis que ditam o desempenho dos sistemas que se fundamentam no Equilíbrio Líquido-Líquido (ELL) entre as fases imiscíveis. Esses fatores se apoiam, prioritariamente, nas propriedades dos constituintes

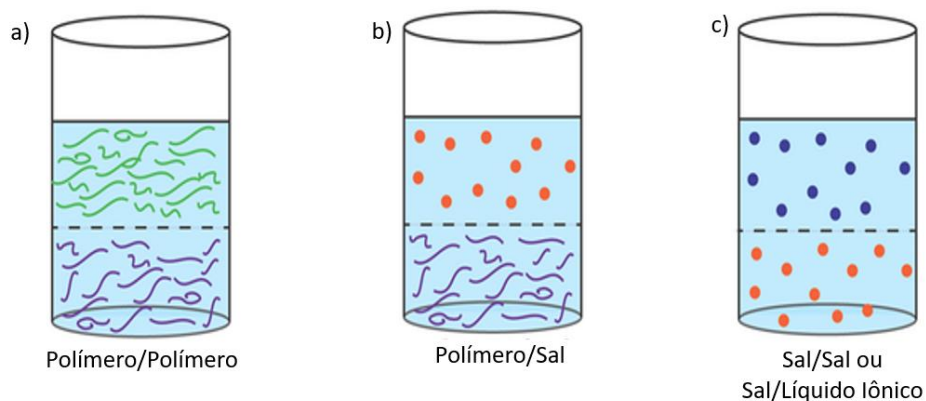
das fases, como hidrofobicidade, massa molecular, e propriedades dos sistemas, como temperatura e potencial hidrogeniônico (Liu *et al.*, 2013)

Os SABs podem ser classificados então em classes dependentes da composição das fases, entre os principais tipos encontram-se: polímero/polímero, como o sistema polietilenoglicol (PEG)/dextrana, em que dois polímeros hidrofílicos formam fases distintas; polímero/sal, em que um polímero como o PEG e um sal inorgânico geram separação por diferenças de solubilidade; e sal/sal, onde dois sais incompatíveis em altas concentrações formam fases separadas. Além dos SAB tradicionais, recentemente a literatura reporta o uso de novos compostos para o preparo dos mesmos, como líquidos iônicos, surfactantes e solventes eutéticos profundos (Titus *et al.*, 2022).

3.4 TIPOS DE SISTEMAS AQUOSOS BIFÁSICOS

Os SAB mais conhecidos são formados pela mistura de dois polímeros hidrofílicos (polímero/polímero) ou de um polímero e um sal inorgânico (polímero/sal). No entanto, um avanço significativo ocorreu em 2003, quando Rogers e colaboradores expandiram a geração de SAB ao combinar dois sais inorgânicos distintos em densidade de carga. Essa inovação levou ao surgimento dos líquidos iônicos (LI), devido à sua natureza iônica e estado líquido à temperatura ambiente (Lee *et al.*, 2017). Pode-se ter uma visão geral dos tipos de SAB através da Figura 7.

Figura 7 – Visão geral de SABs a) polímero/polímero, b) polímero/sal e c) líquido iônico/sal



Fonte: Fick (2023)

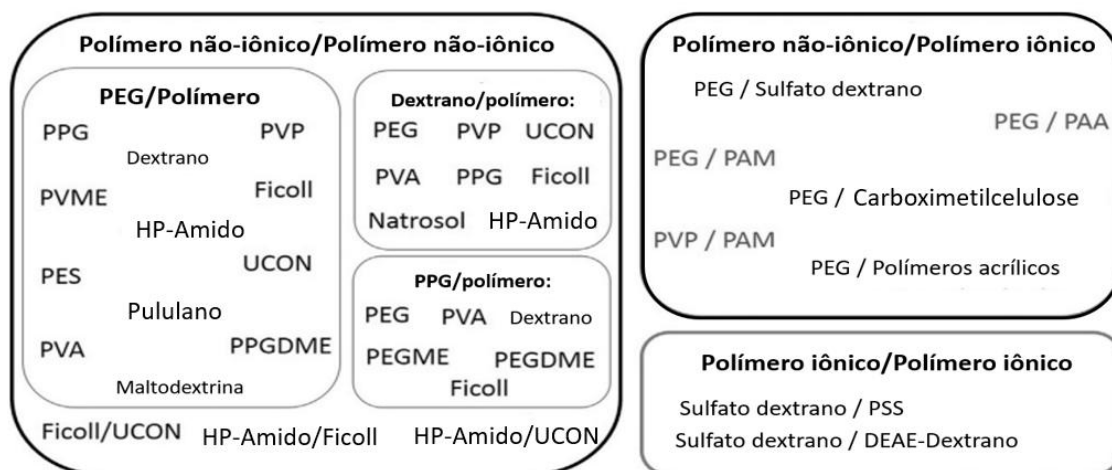
Portanto, nas últimas duas décadas, muitos estudos se concentraram no desenvolvimento de novos SAB baseados em combinações de polímeros, sais inorgânicos, líquidos iônicos e surfactantes (Wang *et al.*, 2013).

3.4.1 Polímero/Polímero

Polímeros são macromoléculas formadas pela união de pequenas unidades, chamadas meros. Essa estrutura confere a eles propriedades únicas e variadas, dependendo do tipo de monômero e da forma como estão ligados (Carter, Paul, 1991). Na literatura, o polietilenoglicol é o polímero mais citado para os SAB devido a promover estabilidade para o sistema, além de baixo custo e variação da massa molecular e tamanho da cadeia (Rodríguez *et al.*, 2009). Por exemplo, a literatura relata SAB que existem PEG 2000 (Chen *et al.*, 2004), PEG 4000 (De Oliveira *et al.*, 2008), PEG 1500 (Alvarenga *et al.*, 2014), PEG 400 (Pereira *et al.*, 2014).

Os SAB polímero/polímero são formados quando dois de polímeros solúveis em água são misturados acima de uma concentração crítica, induzindo a formação de duas fases. Várias combinações de polímeros são estudadas para a formação do SAB, obtidos a partir de: (a) dois polímeros não iônicos, como PEG/dextrano; (b) um polímero não iônico e um polímero iônico, como PEG/poli(ácido acrílico) (PAA); e (c) dois polieletrólitos carregados, sulfato de dextrano de sódio/sulfonato de poliestireno (PSS), como pode-se observar na Figura 8.

Figura 8 – Exemplos de SAB polímero/polímero



Fonte: Pereira, Freire, Coutinho (2020)

A escolha do polímero adequado se deve explicitamente a aplicação desejada, porém ocorre uma difusão entre os estudos para o PEG devido ao ajuste de massa molecular; quanto maior a massa molar do polímero, menor será a concentração necessária para a formação de duas fases. Isso está relacionado a hidrofobicidade conferida ao aumento da massa molar promovendo uma segregação mais eficiente entre as fases e, conseqüentemente, ampliando a região bifásica do sistema. (Serveish *et al.*, 2024).

3.4.2 Polímero/Sal

Os SAB são formados pela dissolução de um polímero solúvel em água e um sal inorgânico (ou orgânico) promovendo fases ricas em cada um dos componentes. Devido às suas propriedades diferentes, esses sistemas foram amplamente estudados, caracterizados e aplicados a muitas separações (Raja *et al.*, 2011). Uma ampla variedade de polímeros e sais pode ser combinada para a formação de SAB, como observa-se na Figura 9

Figura 9 - Exemplos de SAB polímero/sal

PEG ou PGG/sal inorgânico	PEG ou PGG/sal orgânico	
Fosfatos : K_3PO_4 ; KH_2PO_4 ; K_2HPO_4 ; Na_3PO_4 ; NaH_2PO_4 ; $NH_4H_2PO_4$; $(NH_4)_2HPO_4$;	Tartaratos : $K_2C_4H_4O_6$; $KNaC_4H_4O_6$; $Na_2C_4H_4O_6$; $(NH_4)_2C_4H_4O_6$;	
Sulfatos : Na_2SO_4 ; $(NH_4)SO_4$; Li_2SO_4 ; $MnSO_4$; $ZnSO_4$; $CuSO_4$; $MgSO_4$; $FeSO_4$; $(Al)_2(SO_4)_3$	Citratos : $K_3C_6H_5O_7$; $Na_3C_6H_5O_7$;	
Carbonatos : K_2CO_3 ; $(NH_4)_2CO_3$; Na_2CO_3 ;	Formatos : $NaCHO_2$; $KCHO_2$;	Succinato : $NaC_4H_6O_4$;
Hidróxidos : KOH ; $NaOH$;	Oxalato : $K_2C_2O_4$;	Acetato : KCH_3CO_2 ;
Cloreto s: $NaCl$; KCl ;		
Outros : Na_2NO_3 ; NaF ; Na_2SiO_3 ; $NaClO_4$;		
Outros polímeros/sal		
PEGDME + : $K_3C_6H_5O_7$; $K_3C_6H_5O_7$; $K_2C_2O_4$; $(NH_4)H_2PO_4$; $(NH_4)_2HPO_4$;		
UCON + : K_2HPO_4 ; KH_2PO_4 ; Na_2HPO_4 ; NaH_2PO_4 ;		
POELE 20 + : K_3PO_4 ; KOH ; K_2CO_3 ; $K_2C_2O_4$; $K_2C_4H_4O_6$; $K_3C_6H_5O_7$;		

Fonte: Pereira, Freire, Coutinho (2020)

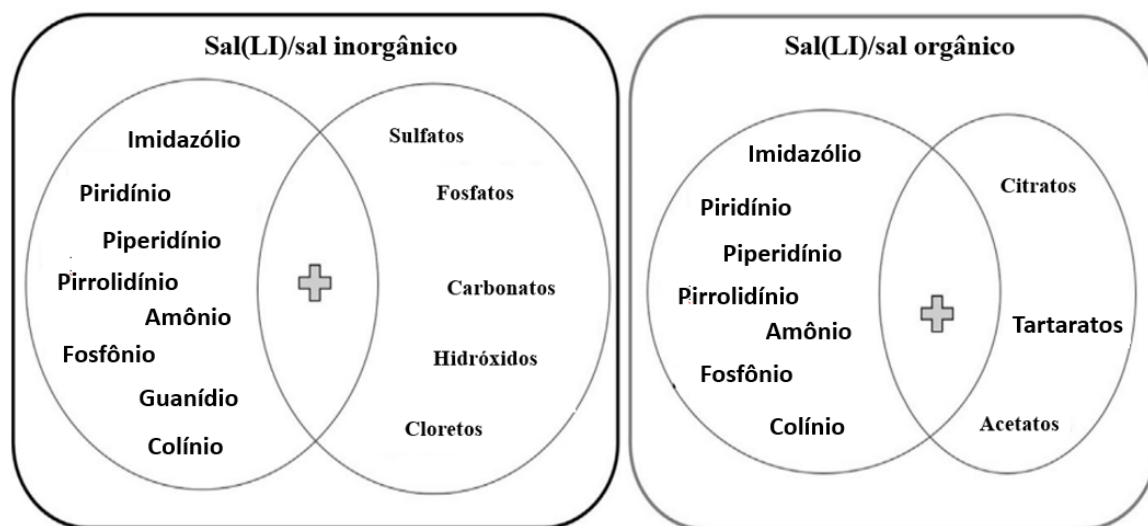
Os polímeros PEG e PPG são os agentes formadores de fase polimérica mais usados, enquanto os sais inorgânicos à base de fosfato e sulfato são os sais mais comuns. No entanto, SAB compostos por polímeros e hidróxido (Ghaffari *et al.*, 2022), fosfatos (Gan *et al.*, 2023; Bonnassieux *et al.*, 2024), sulfatos (Zong *et al.*, 2022; Aunnankat *et al.*, 2024) e sais orgânicos

(Marimuthu *et al.*, 2025, Khayati *et al.*, 2023). Os SAB dos tipos polímero/polímero e polímero/sal oferecem uma capacidade limitada de manipular a diferença de polaridades entre as fases restringindo suas aplicações em extração e purificação (Freire *et al.*, 2012).

3.4.3 Sal/Sal

Os sistemas formados por sal/sal ou líquido iônico/sal resulta da dissolução de algum sal orgânico ou inorgânico com um componente chamado de líquido iônico (LI) que apresenta íons deslocalizados de carga. Os LI são sais compostos por cátions e ânions orgânicos ou inorgânicos em estado líquido em temperaturas menores que 100 °C, apresentando propriedades únicas, como baixa volatilidade, alta estabilidade térmica, condutividade elétrica e forte capacidade de dissolução (Angell, 2012). Devido as suas variações de cátions e ânions, essa classe de sais oferece novos diagramas de fases combinando diferentes compostos, como observa-se na Figura 10.

Figura 10 – Exemplos de SAB sal/sal



Fonte: Adaptado de Pereira, Freire, Coutinho (2020)

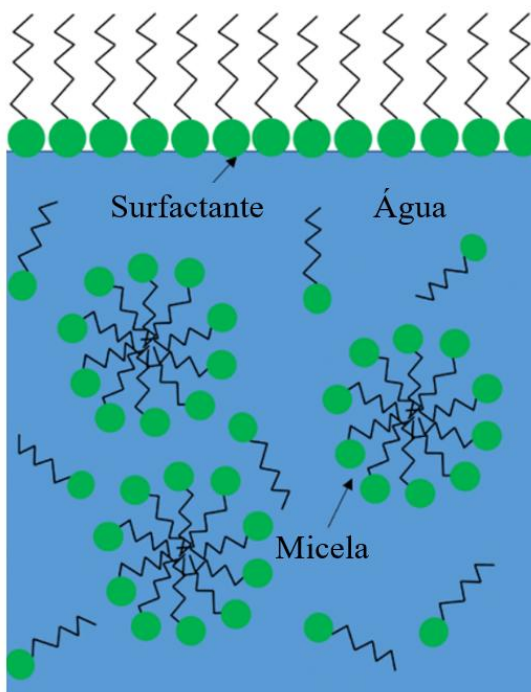
Vários estudos relatam diferentes combinações para diferentes fins. Por exemplo, sistemas formados por sulfato de alumínio e líquidos iônicos a base de imidazólio foram utilizados para remoção de antibióticos de sistemas aquáticos (Mohammadi, Ghorbanidehkordi, Hallajisani; 2022).

Outro sistema formado por líquidos iônicos de guanidínio e hidrogenofosfato de potássio foi usado para a reciclagem de tiosulfato de ouro, como alternativa sustentável para lixiviação na recuperação de ouro (Ma *et al.*, 2024).

3.4.4 Polímero/Surfactante

Os surfactantes são moléculas anfifílicas compostas por uma porção hidrofílica, conhecida como cabeça, e uma porção hidrofóbica ou apolar, conhecida como cauda. Acima da concentração micelar crítica (CMC), eles formam agregados conhecidos como micelas. Em uma micela em meio aquoso, as caudas hidrofóbicas se agrupam no interior para minimizar o contato com a água, enquanto as cabeças hidrofílicas permanecem na superfície externa para maximizar o contato com a água, como se pode observar na Figura 11 (Rangel-Yagui, 2004).

Figura 11 – Formação de Micelas



Fonte: Sun (2021)

Muitas pesquisas relatam o uso de sistemas aquoso bifásicos micelares (SABM) para partição, extração ou pré-concentração, principalmente, de biomoléculas como os corantes, devido às suas propriedades de modelar o sistema conforme o caráter hidrofílico/hidrofóbico dos surfactantes (Fideles *et al.*, 2025).

Os SABM foram criados por Watanabe e Tanaka em 1978 para extrair zinco (II). Seu princípio de funcionamento se baseia na formação de duas fases, uma rica em micelas (concentrada) e a outra pobre (diluída). Várias modificações vêm sendo realizadas desde então para maximizar essa separação, modificando, principalmente, a estrutura, carga e quantidade do surfactante ou mistura com determinados aditivos, como sais, biopolímeros, álcoois ou líquidos iônicos (Pereira, Freire, Coutinho, 2020).

Por exemplo, um estudo envolvendo misturas de surfactantes aniônicos e catiônicos para partição dos corantes Allura Red, Azorubina, Tartrazina, entre outros, com finalidades analíticas de determinação colorimétrica demonstrou uma metodologia eficaz, rápida e ambientalmente amigável atingindo uma eficiência de extração de até 98% (Smirnova, 2023).

Outro estudo teve o objetivo de avaliar o equilíbrio líquido-líquido de SABMS formados por Triton X-100, como surfactante, e sais orgânicos e inorgânicos em diferentes temperaturas. Além disso, foi possível aplicar o sistema na partição de corante Rodamina B, obtendo como eficiência na fase rica em surfactante uma extração de 99% (Boravelli *et al.*, 2024).

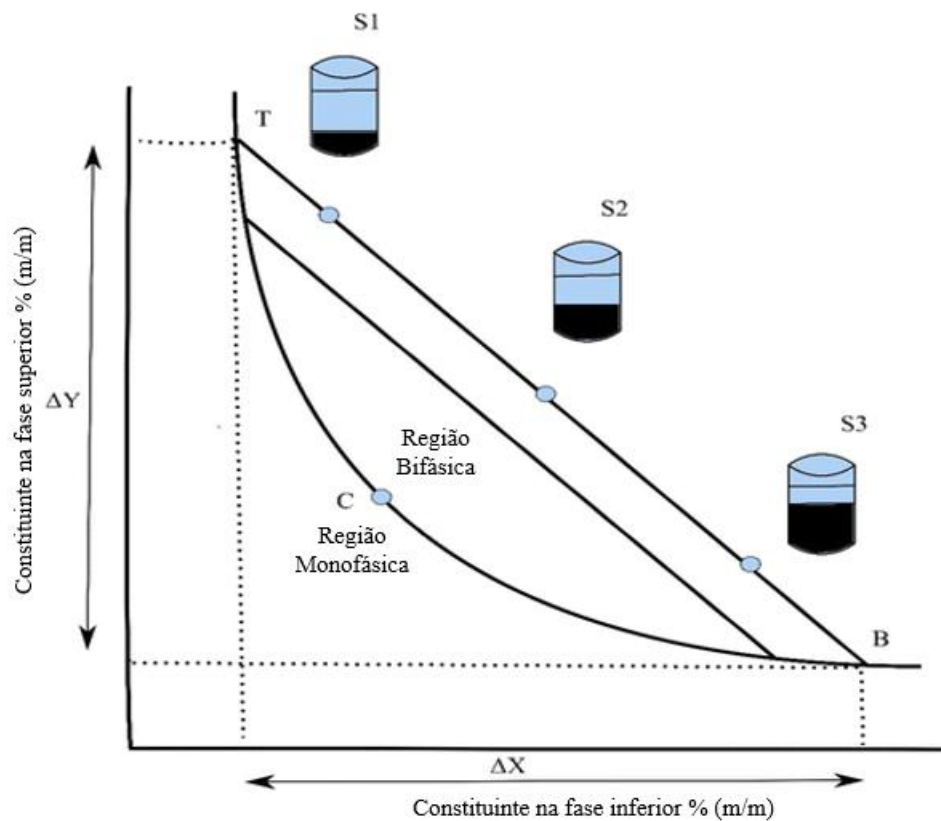
Segundo o trabalho de Lu (2021), foi investigada a extração de corante natural, curcumina, utilizando SABM a partir do dodecil sulfonato de sódio e líquidos iônicos. Identificou que a mistura entre os componentes favorecia uma separação adequada da curcumina, avaliando diferentes fatores de influência, como potencial hidrogeniônico, razão mássica surfactante/LI, concentração de pigmento e temperatura de extração.

Maheshwari e colaboradores (2023) descreveram a extração do carotenóide luteína de pétalas de calêndula utilizando SABM a base de surfactantes não iônicos, como plurônicos e lutensol. Após otimização estatística, pôde-se chegar a uma eficiência de separação 95,6%. Além disso, foi observado que os extratos obtidos apresentaram muita atividade antioxidante quando comparado a extratos em solventes orgânicos.

3.5 DIAGRAMAS DE FASES

Os dados de equilíbrio líquido-líquido dos sistemas aquosos bifásicos são interpretados graficamente através de coordenadas triangulares onde cada interseção corresponde a um componente da mistura ternária. Em um diagrama ternário, pode ser observado na Figura 12, deve-se obter uma curva binodal separando as regiões de composição monofásica e multifásica (Brandani, 1994).

Figura 12 – Representação esquemática de Diagrama de Fases de SAB



Fonte: Iqbal (2016)

Os sistemas podem ser interpretados ou identificados por três tipos de diagramas, sendo eles (Treybal, 1957), como pode-se observar na Figura 12:

- Formação de um par parcialmente miscível.
- Formação de dois pares parcialmente miscíveis.
- Formação de três pares parcialmente miscíveis.

As linhas de amarração (LA) em um diagrama representam a composição das fases em equilíbrio, ou seja, em uma extremidade é maior concentração fase aquosa, enquanto na outra extremidade possui menor concentração. Salienta-se que em qualquer ponto em cima da mesma LA, as propriedades intensivas permanecem inalteráveis, como por exemplo, densidade, volume molar, entalpia molar (Pinto, 2016).

A Inclinação da Linha de Amarração (ILA) é uma medida de como a composição das fases pode variar com a alteração de uma propriedade físico-química, como, por exemplo, a temperatura e a massa molar. Para uma elevada ILA, por exemplo, menores quantidades do componente expresso no eixo das abcissas é capaz de induzir separação de fases para uma dada

quantidade do componente expresso no eixo das ordenadas. O valor da inclinação pode ser calculado por:

$$ILA = \frac{W_1^{FS} - W_1^{FI}}{W_2^{FS} - W_2^{FI}} \quad (1)$$

Em que $W_1^{FS} - W_1^{FI}$ correspondem à diferença de concentração nas fases superior e inferior expressa em porcentagem da fração mássica, respectivamente. Com o objetivo de quantificar uma métrica para a composição das fases durante a separação, faz-se uso do comprimento da linha de amarração (CLA). Basicamente, o aumento do valor do CLA, as fases de maior afastamento entre suas respectivas propriedades intensivas, e logo, a diminuição provoca a igualdade entre as propriedades das fases chegando ao ponto crítico (onde as propriedades das fases são iguais) (Junior *et al.*, 2019).

$$CLA = \sqrt{[W_1^{FS} - W_1^{FI}]^2 + [W_2^{FS} - W_2^{FI}]^2} \quad (2)$$

A distribuição de compostos entre as duas fases aquosas dos SAB é caracterizada por um parâmetro denominado razão de distribuição (ou coeficiente de partição) k , definido como:

$$k = \frac{W_{FS}}{W_{FI}} \quad (3)$$

Onde:

W_{FS} – concentração da fase superior

W_{FI} – concentração da fase inferior

4 MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento deste trabalho (os reagentes, os equipamentos e o procedimento experimental) foi realizado no Laboratório ILUM, localizado no Centro de Desenvolvimento, Tecnologia e Inovação HUB na Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas.

4.1 REAGENTES

Os materiais foram utilizados sem purificação adicional, suas respectivas especificações são apresentadas na Tabela 2. Para o desenvolvimento de todas as etapas deste trabalho foi utilizada água destilada.

Tabela 2 – Informações dos reagentes.

Nome	Fórmula Química	Marca	Pureza	CAS
Polietilenoglicol 400	$H(OC_2H_4)_nOH$	Sigma-Aldrich	99%	25322-68-3
Polietilenoglicol 4000	$H(OC_2H_4)_nOH$	Sigma-Aldrich	99%	25322-68-3
Triton X-114	$(C_2H_4O)_n(C_{14}H_{22})$	Sigma-Aldrich	99%	9036-19-5
Água	H_2O	-	Destilada	-

Fonte: Autoral (2026)

4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.2.1 Preparo do matéria-prima

As folhas de cajú (Figura 13) foram adquiridas em comércio local via na cidade de Manaus, AM, Brasil. Após a aquisição, as folhas foram higienizadas em solução de hipoclorito de sódio por 10 minutos, lavadas em água destilada e, em seguida, secas em estufa à 45 °C por 6h. As folhas foram cominuídas em moinho de facas e peneiradas, obtendo-se fino particulado (< 100 mesh) (Figura 14).

Figura 13 – Matéria-prima



Fonte: Autoral (2026)

Figura 14 – Crajiru em pó



Fonte: Autoral (2026)

4.2.2 Métodos de Extração do Corante

Foi utilizada uma suspensão do pó de crajiru com água destilada na concentração de 40 mg.mL^{-1} para os métodos apresentados abaixo:

- Método A – Infusão (Souza, 2024): a suspensão foi transferida para um Erlenmeyer de 125 mL e submetida à extração por infusão em banho-maria mantido a 90°C durante 30 minutos. Ao longo do processo, a mistura foi agitada manualmente em intervalos regulares de 10 minutos. O extrato obtido foi denominado ExtA.
- Método B – Ultrassom (Siqueira *et al.*, 2022): a suspensão foi submetida a extração ultrassônica com sonicator Vibra-Cell VCX750 (Sonics & Materials, Inc., Newtown, CT, EUA) por 5 minutos à temperatura ambiente ($\sim 25^\circ \text{C}$). O ultrassom foi aplicado com uma sonda de 25 mm operando com potência ultrassônica de 450 W durante 5 minutos (densidade de energia = 2700 J.cm^{-3}). O extrato obtido foi denominado ExtB.
- Método C – Maceração (Oliveira *et al.*, 2021): A suspensão foi transferida para um almofariz e submetida à maceração mecânica utilizando um pistilo. A trituração foi mantida até a formação de um extrato vermelho concentrado. O extrato obtido foi denominado ExtC.

4.2.3 Caracterização dos Extratos

4.2.3.1 Caracterização Colorimétrica

Os parâmetros colorimétricos foram medidos utilizando um colorímetro digital (Delta Color 71421, Delta Vista), que forneceu a luminosidade (L^*), a coordenada vermelho-verde (a) e a coordenada amarelo-azul (b^*). Todas as medições foram realizadas em triplicata. A diferença de cor total (ΔE) foi calculada de acordo com a Equação 4

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (4)$$

4.2.3.2 Determinação de Fenólicos e Antocianinas

O teor total de fenólicos dos extratos foi quantificado utilizando o método de Folin-Ciocalteu. Foram preparadas duas soluções de reagentes: (i) reagente de Folin-Ciocalteu (1 N) diluído até um volume final de 100 mL, e (ii) solução de bicarbonato de sódio adicionada à mistura de Folin-Ciocalteu. As amostras foram preparadas a uma concentração de 1 mg, mL⁻¹ em metanol. Um volume de 20 µL de cada extrato foi misturado com 150 µL de reagente de Folin-Ciocalteu e deixado em repouso por 5 min. Posteriormente, foram adicionados 150 µL de solução de bicarbonato de sódio (NaHCO₃), e a mistura foi incubada por 90 minutos. A absorbância foi medida a 750 nm utilizando um leitor de microplacas (Epoch 2, BioTek).

A quantificação das antocianinas totais foi realizada de acordo com o método do pH diferencial descrito por Hosseinian *et al.* (2008). Foram preparadas duas soluções: (i) para pH 1,0 usando tampão de cloreto de potássio, e (ii) para pH 4,5. Os extratos foram diluídos nas soluções em proporção volumétrica 1:10, deixando as soluções estabilizarem por um período de 30 minutos ao abrigo de luz. Em seguida, as amostras foram lidas em um espectrofotômetro de UV-visível (Shimadzu, UV1600) foi utilizado para a leitura das absorbâncias da amostra a λ 510nm e a λ 700nm. A absorbância total da amostra foi calculada pela Equação 5

$$A = (A_{510 \text{ nm}} - A_{700 \text{ nm}})_{\text{pH } 1,0} - (A_{510 \text{ nm}} - A_{700 \text{ nm}})_{\text{pH } 4,5} \quad (5)$$

O teor de antocianinas totais foi calculado pela Equação 6

$$\text{TA (mg. L}^{-1}\text{)} = \frac{A \cdot \text{PM} \cdot \text{FD} \cdot 1000}{\epsilon \cdot l} \quad (6)$$

Onde:

A = absorbância total da amostra calculada pela Equação 5

PM = peso molecular do padrão cianidina-3-glicosídeo, 449,2 g.mol⁻¹

FD = fator de diluição

1000 = fator de conversão de grama para miligrama

ϵ = absorvividade molar da cianidina-3-glicosídeo, 26900 L.mol⁻¹.cm⁻¹

l = caminho óptico da cubeta, 1 cm

4.2.3.3 Determinação da Atividade Antioxidante

A atividade antioxidante dos extratos foi obtida a partir de três métodos reportados por Macalia (2026):

- Ensaio de eliminação de radicais livres DPPH. A capacidade antioxidante dos extratos foi determinada utilizando o ensaio DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazil). Preparou-se uma solução metanólica de DPPH• a 100 µM, e a reação foi iniciada pela mistura de 1 mL da amostra com 1 mL da solução de DPPH. 4,7,15 As misturas de reação foram incubadas no escuro à temperatura ambiente por 30 min. Em seguida, a absorbância foi medida a 515 nm utilizando um leitor de microplacas (Epoch 2, BioTek).
- Ensaio de eliminação de radicais ABTS^{•+}. A atividade antioxidante dos extratos foi determinada utilizando o ensaio de eliminação de radicais [2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolína-6-ácido sulfônico)]. O radical catiônico ABTS^{•+} foi gerado pela reação de 7 mM de ABTS com 140 mM de persulfato de potássio (K₂S₂O₈) à temperatura ambiente. A solução resultante foi deixada em repouso no escuro por 12–16 h, e sua absorbância foi ajustada para 0,70 ± 0,05 a 750 nm ($y = -0,0003x + 0,7502$, $R^2 = 0,9999$) utilizando etanol como diluente. Para o ensaio, a solução de ABTS^{•+} foi misturada com as amostras de extrato em proporção volumétrica 1:10 em uma microplaca de 96 poços. Após um período de reação de 6 minutos, a absorbância foi registrada a 750 nm utilizando um leitor de microplacas (Epoch 2, BioTek).
- Ensaio do Poder Antioxidante por Redução do Ferro (FRAP). O reagente de poder antioxidante de redução férrica (FRAP) foi preparado no momento da análise, através de uma mistura entre 25 mL de tampão acetato (300 mmol.L⁻¹), 2,5 mL de TPTZ (2,4,6-tripiridil-s-triazina, 10 mmol.L⁻¹) e 2,5 mL de FeCl₃ (20 mmol.L⁻¹). A reação foi iniciada pela adição de 90 µL de cada extrato, 270 µL de água destilada e 2,7 mL do reagente FRAP em um poço de microplaca, em triplicata. A absorbância foi medida imediatamente a 595 nm utilizando um leitor de microplacas (Epoch 2, BioTek). O

reagente FRAP foi utilizado como branco, e o sulfato ferroso (FeSO_4) serviu como padrão de calibração. A atividade antioxidante foi quantificada utilizando a curva de calibração de FeSO_4 (até 1000 μM), com os resultados expressos em $\mu\text{M FeSO}_4/\text{g}$ de extrato.

4.2.2.4 Espectroscopia do Ultravioleta e Visível

O perfil espectral dos extratos foi obtido através de um Espectrofotômetro de Absorção Molecular nas Regiões do Ultravioleta e Visível (UV-Vis), da marca Shimadzu conforme ilustrado na Figura 18. Para a aquisição dos espectros as amostras foram diluídas em proporção volumétrica 1:10. As diluições foram acondicionadas em cubetas de quartzo e submetidas à varredura espectral na faixa de comprimento de onda de 200 nm a 800 nm. A água destilada foi utilizada como branco para correção da linha de base.

Figura 18 – Espectrofotômetro UV-Vis



Fonte: Autoral (2026)

4.2.4 Montagem dos Sistemas Iniciais de Composição Global

O procedimento de montagem dos sistemas de composição global e partição (item 4.2.5) foi adaptado da literatura (Moraes, 2024). Para a montagem dos sistemas de partição formados por Polietilenoglicol + Triton X-114 + Água, foi utilizada a composição reportada na literatura (Junqueira, 2019), onde relata diferentes sistemas variando o peso molecular do polietilenoglicol entre 400 g.mol^{-1} , 1500 g.mol^{-1} 4000 g.mol^{-1} , temperatura de equilíbrio

(278,15 K; 283,15 K; 288,15 K e 293,15 K) e o comprimento de 5 linhas de amarração dos sistemas. Para este trabalho, utilizou-se polietilenoglicol 400 g.mol⁻¹ e 4000 g.mol⁻¹, as linhas de amarração 1, 3 e 5 sob temperatura fixa de 293,15 K, conforme mostrado nas Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 3 – Composição dos SABM formados por PEG 400 g.mol⁻¹ + Triton X-114 + Água à 293,15 K

LA	CLA	ILA	Global (%)			Fase Superior (%)			Fase Inferior (%)		
			X ₁	X ₂	X ₃	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁	X ₂	X ₃
1	4,38	-0,11	17,03	3,92	79,05	17,25	0,90	81,84	16,86	5,25	77,93
3	12,02	-0,58	23,04	4,15	72,81	24,98	0,62	74,50	18,96	11,03	70,05
5	21,45	-0,86	31,23	4,80	63,97	35,24	0,45	64,36	21,22	16,68	62,10

Fonte: Adaptado de Junqueira (2019)

Tabela 4 – Composição dos SABM formados por PEG 4000 g.mol⁻¹ + Triton X-114 + Água à 293,15 K

LA	CLA	ILA	Global (%)			Fase Superior (%)			Fase Inferior (%)		
			X ₁	X ₂	X ₃	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁	X ₂	X ₃
1	9,88	-0,61	9,29	3,01	88,7	10,84	0,37	90,01	6,42	8,19	84,74
3	12,92	-0,74	11,7	3,63	85,27	14,71	0,34	87,24	7,03	10,73	81,78
5	14,94	-0,7	14,7	4,27	82,03	17,15	0,31	84,98	8,55	12,52	76,14

Fonte: Adaptado de Junqueira (2019)

Onde:

LA – Linha de amarração

CLA – Comprimento da linha de amarração

ILA – Inclinação da linha de amarração

X₁ – Fração mássica de PEG

X₂ – Fração mássica de Triton X-114

X₃ – Fração mássica de Água.

No entanto, os sistemas montados a partir da composição da Tabela 3 e Tabela 4 apresentam desproporções volumétricas entre as fases, por isso, optou-se por selecionar outros pontos de composição global em cima da mesma linha de amarração, tendo em vista que as propriedades intensivas das fases não se alteram em cima da linha de amarração da região bifásica (Moraes, 2024). Os sistemas foram montados com base nas composições globais descritas na literatura (Tabelas 5 e 6), mantendo-se uma massa total de 30 g para cada SABM.

Tabela 5 – Nova composição global dos SABM formados por PEG 400 g.mol^{-1} + Triton X-114 + Água à 293,15 K

LA	PEG 400 (%)	Triton X-114 (%)	Água (%)
1	16,81	5,22	77,97
3	19,18	10,68	70,14
5	21,46	16,33	62,21

Fonte: Moraes, 2024

Tabela 6 – Nova composição global dos SABM formados por PEG 4000 g.mol^{-1} + Triton X-114 + Água à 293,15 K

LA	PEG 4000 (%)	Triton X-114 (%)	Água (%)
1	6,51	8,00	85,49
3	7,23	10,25	82,52
5	8,82	12,23	78,95

Fonte: Moraes, 2024

Os reagentes foram pesados individualmente em balança analítica e adicionados em tubos Falcon de 50 mL, sendo posteriormente submetidos à agitação manual até completa homogeneização. Após essa etapa, as amostras foram transferidas para um banho ultratermostático (Figura 19) mantido a 20 °C (293,15 K), permanecendo em repouso durante 24 horas para garantir o alcance do equilíbrio de fases. Ao término do tempo de equilíbrio, as fases superior e inferior foram cuidadosamente separadas e coletadas individualmente. Para

atingir o equilíbrio do sistema, foi utilizado o banho ultratermostático da Marca Solidsteel, Modelo SSDu-20L. O equipamento possui capacidade de 20 litros, faixa de temperatura ajustável de -10 °C a 100 °C.

Figura 19 – Banho Ultratermostático



Fonte: Autoral (2026)

4.2.5 Montagem dos Sistemas de Partição

Para cada massa molar de PEG e para cada linha de amarração estudada, os experimentos de partição foram conduzidos em tubos Falcon com capacidade de 15 mL, sendo realizados em triplicata. Foi utilizada uma balança analítica da Marca Marte, Modelo AUW220D, com capacidade máxima de 220 g e precisão de 0,1 mg, conforme exibido na Figura 20.

Figura 20 – Balança Analítica



Fonte: Autoral (2026)

Para cada tubo experimental, foram pesadas aproximadamente 2,0 g da fase superior e 2,0 g da fase inferior do sistema bifásico, bem como uma alíquota de 0,100 g do extrato concentrado C, obtido por maceração. A escolha deste extrato deve-se ao fato de o mesmo ter apresentado as melhores características para os estudos de partição, especialmente em termos de intensidade de cor e comportamento espectral, conforme apresentado nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 7 – Composição mássica dos sistemas de partição com PEG 400

Linha de Amarração	Replicata	m ^{FS}	m ^{FI}	m ^{Ext}
1	I	2,0384 g	2,0130 g	0,1115 g
	II	2,0184 g	2,0271 g	0,1013 g
	III	2,0105 g	2,0007 g	0,1021 g
3	I	2,0124 g	2,0018 g	0,1019 g
	II	2,0057 g	2,0135 g	0,1047 g
	III	2,0046 g	2,0092 g	0,1034 g
5	I	2,0096 g	2,0058 g	0,1007 g
	II	2,0240 g	2,0124 g	0,1078 g
	III	2,0033 g	2,0027 g	0,1015 g

Fonte: Autoral (2026)

Tabela 8 – Composição dos sistemas de partição com PEG 4000

Linha de Amarração	Replicata	m ^{FS}	m ^{FI}	m ^{Ext}
1	I	2,0177 g	2,0154 g	0,1026 g
	II	2,0035 g	2,0102 g	0,1060 g
	III	2,0017 g	2,0226 g	0,1072 g
3	I	2,0163 g	2,0329 g	0,1185 g
	II	2,0269 g	2,0005 g	0,1104 g
	III	2,0032 g	2,0169 g	0,1019 g
5	I	2,0145 g	2,0061 g	0,1091 g
	II	2,0252 g	2,0323 g	0,1033 g
	III	2,0136 g	2,0155 g	0,1083 g

Fonte: Autoral (2026)

Em seguida, os sistemas foram homogeneizados manualmente por 3 minutos, de modo a garantir a completa dispersão do extrato e favorecer o estabelecimento do equilíbrio de distribuição entre as fases. Posteriormente, os sistemas foram centrifugados à 3000 rpm por 5 minutos para acelerar o processo de partição do extrato e das fases utilizando a centrífuga da marca KASVI, modelo K14-0815C, conforme exibido na Figura 21.

Figura 21 – Centrífuga



Fonte: Autoral (2026)

Na sequência, os sistemas de partição foram transferidos para um banho ultratermostático mantido a 20 °C (293,15 K), permanecendo em repouso durante 24 horas para garantir o alcance do equilíbrio de fases. Ao término do tempo de equilíbrio, as fases superior e inferior foram cuidadosamente separadas (para não coletar a interface) e lidas em UV-Vis, individualmente.

4.2.6 Cálculo dos Dados Termodinâmicos de Partição

Os coeficientes de partição do corante estudado foram obtidos a partir da razão entre as absorvâncias do corante em ambas as fases dos sistemas, de acordo com a Equação 7

$$k_p = \frac{Abs^{FS}}{Abs^{FI}} \quad (7)$$

Onde:

k_p – Coeficiente de Partição do Corante

Abs^{FS} – Absorvância na Fase Superior no comprimento de onda de 495 nm

Abs^{FI} – Absorvância na Fase Inferior no comprimento de onda de 495 nm

A eficiência de extração (EE%) do corante para ambas as fases foi calculada através da Equação 8:

$$EE = \frac{k_p}{k_p + 1} \cdot 100 \quad (8)$$

Através da Equação 8 foi possível estimar a variação da energia livre de Gibbs de partição da corante da fase superior para a fase inferior.

$$\Delta G^\circ = -R \cdot T \cdot \ln(k_p) \quad (9)$$

Onde:

ΔG° – Variação da energia de Gibbs de transferência do corante da FS para FI (J.mol⁻¹)

R – Constante dos gases ideais, J.mol⁻¹.K⁻¹

T – Temperatura do estudo de partição, K

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS EXTRATOS

Após a aplicação das diferentes metodologias de extração descritas no item de Materiais e Métodos, foram obtidos os extratos das folhas de cajú destinados às etapas subsequentes de caracterização e avaliação do processo de partição. As Figuras 19, 20 e 21 apresentam o aspecto visual dos extratos obtidos por cada um dos métodos empregados, onde pôde-se inferir uma coloração avermelha consistente entre os diferentes métodos, sendo necessário uma investigação instrumental quantitativa do corante.

Figura 19 – ExtA por
infusão



Fonte: Autoral (2026)

Figura 20 – ExtB por EAU



Fonte: Autoral (2026)

Figura 21 – ExtC por
maceração



Fonte: Autoral (2026)

5.1.1 Caracterização Colorimétrica

A cor é uma das principais características dos extratos vegetais, estando diretamente relacionada à presença de pigmentos naturais e compostos bioativos. Assim, a análise dos parâmetros colorimétricos L^* , a^* , b^* e ΔE^* apresentados na Tabela 9 permite avaliar a influência dos métodos de extração sobre a aparência dos extratos e inferir possíveis alterações na composição dos compostos.

Os extratos apresentaram características colorimétricas semelhantes, observando-se o aumento da luminosidade (L^*) do ExtA > ExtB > ExtC, bem como do amarelamento (b^*), indicando uma coloração amarelada mais intensa no extrato obtido por maceração em comparação com os extratos A e B. Essa mudança cromática é consistente com um aumento na liberação e dispersão, principalmente, de flavonoides, como o kaempferol, decorrentes da

ruptura da parede vegetal, facilitando a dispersão das biomoléculas no meio aquoso (Meléndez-Martínez, 2019).

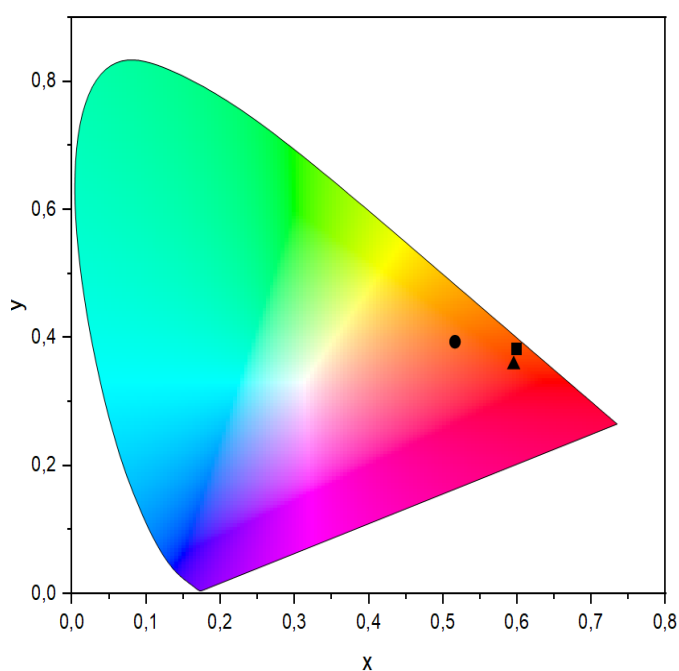
Tabela 9 – Parâmetros colorimétricos dos extratos

Amostras	L*	a*	b*	ΔE^*
ExtA	$11,77 \pm 0,01$	$24,58 \pm 0,04$	$17,66 \pm 0,08$	$71,41 \pm 0,03$
ExtB	$13,13 \pm 0,04$	$14,24 \pm 0,03$	$17,51 \pm 0,01$	$64,62 \pm 0,02$
ExtC	$19,00 \pm 0,01$	$27,41 \pm 0,02$	$30,88 \pm 0,05$	$77,64 \pm 0,08$

Fonte: Autoral (2026)

Observa-se pouca variação nos valores de a^* para os ExtA e ExtC, porém um decaimento da coloração avermelhada com o uso do ultrassom. A carajurina e carajurona são biomoléculas do tipo desoxiantocianidinas presentes na espécie estudada apresentando caracteristicamente coloração avermelhada (Zorn, 2001).

Figura 22 – Coordenadas de cromaticidade CIELAB calculadas a partir dos espectros de emissão dos extratos: ● ExtB; ■ ExtC e ▲ ExtA



Fonte: Autoral (2026)

O decaimento da pigmentação vermelhada no ExtB pode estar associado com aumento de compostos amarelados como fenólicos, tendo em vista que apresenta valores parecidos de b^* como o ExtA. Essa variação pode ser melhor visualizada no diagrama de cores na Figura 24. Os valores de ΔE^* seguiram a ordem $\text{ExtC} > \text{ExtA} > \text{ExtB}$, indicando que a maceração promoveu a maior alteração colorimétrica entre os métodos avaliados. Esse resultado está em concordância com os elevados valores dos parâmetros a^* e b^* , sugerindo uma maior intensidade das tonalidades vermelha e amarela nos extratos obtidos por esse método. A maior diferença de cor pode estar relacionada à extração e preservação mais eficiente dos pigmentos naturais do caju.

5.1.2 Compostos Fenólicos e Antocianinas

Na Tabela 10 estão apresentados os valores de compostos fenólicos totais e teor de antocianinas em cada extrato submetido à diferentes técnicas de extração.

Tabela 10 – Teor de fenólicos e antocianinas nos extratos

Amostra	Fenólicos	Antocianinas (mg.L^{-1})
ExtA	$444,4848 \pm 19,0212$	$31,8281 \pm 3,3373$
ExtB	$897,5758 \pm 19,8984$	$27,9192 \pm 1,0736$
ExtC	$755,8788 \pm 5,2988$	$46,5899 \pm 2,0595$

Fonte: Autoral (2026)

Com base nos dados da Tabela 10, observa-se que o método de extração influenciou diretamente nos teores de compostos fenólicos e antocianinas obtidos dos extratos. Entre os tratamentos avaliados, o ExtB apresentou o maior teor de fenólicos totais, seguido do ExtC e do ExtA. Esses resultados indicam que a aplicação de ultrassom favorece a extração de compostos fenólicos, provavelmente devido ao fenômeno de cavitação, que promove a ruptura das paredes celulares e aumenta a transferência de massa entre as matrizes líquidas e vegetal (Shen *et al.*, 2023).

Em relação ao teor de antocianinas, verificou-se um comportamento distinto. O ExtC apresentou a maior concentração, seguido do ExtA e do ExtB. Esse resultado sugere que, embora o ultrassom seja eficiente para a extração de fenólicos totais, ele pode não ser o método mais adequado para a preservação ou recuperação de antocianinas, tendo em vista que são

compostos sensíveis a fatores como intensidade do processamento, podendo sofrer hidrólise durante o tratamento ultrassônico (Decker *et al.*, 2024).

5.1.1 Atividade Antioxidante

Com base nos resultados apresentados na Tabela 11, observa-se que a atividade antioxidante dos extratos variou significativamente em função do método de extração e do ensaio empregado.

Tabela 11 – Valores de atividade antioxidantes dos extratos

Amostras	ABTS	DPPH	FRAP
ExtA	2234,778 ± 21,688	818,6969 ± 25,446	445,230 ± 29,983
ExtB	3417,444 ± 108,594	669,91717 ± 73,25	1749,706 ± 10,827
ExtC	3723,444 ± 29,627	1600,567 ± 47,808	1582,450 ± 45,808

Fonte: Autoral (2026)

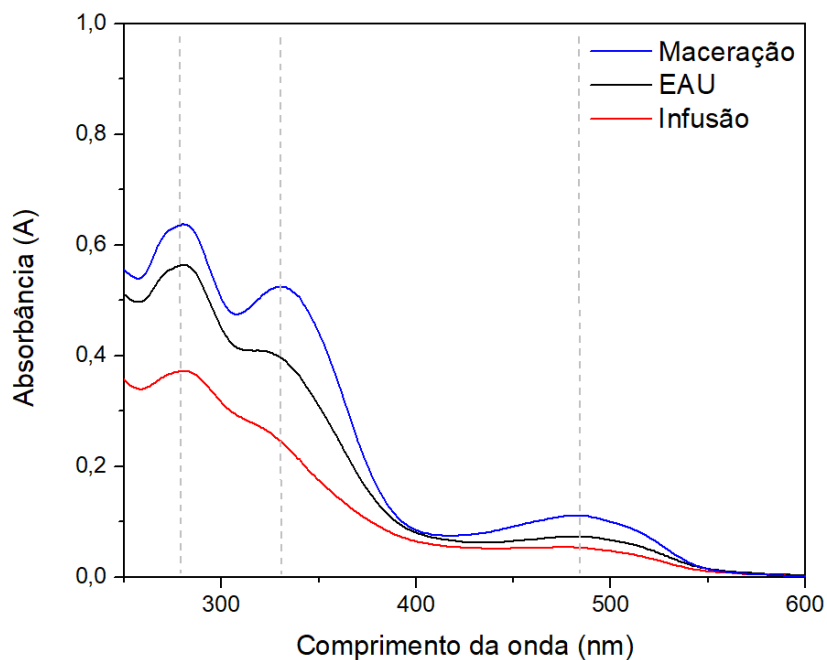
Os resultados demonstraram que a atividade antioxidante dos extratos de cajuru foi influenciada pelo método de extração empregado, isto é, as condições operacionais afetam diretamente a recuperação dos compostos bioativos presentes na matriz vegetal. O ExtC apresentou os maiores valores nos ensaios ABTS e DPPH, indicando elevada capacidade de neutralização de radicais livres por mecanismos de transferência de elétrons e/ou átomos de hidrogênio (Panche *et al.*, 2016).

O ExtB apresentou o maior valor no ensaio FRAP, sugerindo uma maior capacidade de atuar por transferência de elétrons. No entanto, a mesma atividade não foi observada nos ensaios ABTS e DPPH. Esse resultado pode ser explicado porque cada método avalia mecanismos antioxidantes distintos e possui sensibilidade variável aos compostos presentes nos extratos (Prior, Wu, Schaich, 2005).

5.1.4 Caracterização Espectral dos Extratos de Crajiru

Os espectros apresentados na Figura 23 apresentam três regiões de absorção entre 257 nm–307 nm, 307 nm–350 nm e 420 nm–545 nm.

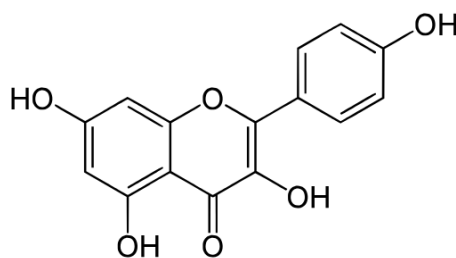
Figura 23 – Espectros de absorção dos extratos



Fonte: Autoral (2026)

É possível observar um pico largo com máximo de absorbância em 330 nm, sendo atribuído como característica da classe dos flavonoides e fenólicos (Feitosa, 2025). Flavonoides como kaempferol, cuja estrutura molecular está apresentada na Figura 24, apresentam sistema aromático e anel benzóico apresentam bandas características nessa região devido às transições eletrônicas $\pi \rightarrow \pi^*$.

Figura 24 – Estrutura molecular do kaempferol



Fonte: MedChemExpress (2025)

Segundo Harborne (1998), os espectros de absorção das naftoquinonas são caracterizados pela presença de três a quatro bandas máximas, distribuídas abaixo de 300 nm, entre 320 e 340 nm e acima de 400 nm. A observação desse padrão espectral no extrato estudado constitui um indicativo da presença de compostos pertencentes à classe das naftoquinonas nos extratos (Souza, 2024).

Outras moléculas de interesse, como as antocianinas apresentam absorções características, quando na forma de cátion flavílico, entre os comprimentos de onda de 465 a 530 nm (Albarici *et al.*, 2006). Portanto, pode-se inferir a presença de antocianinas nos três extratos avaliados.

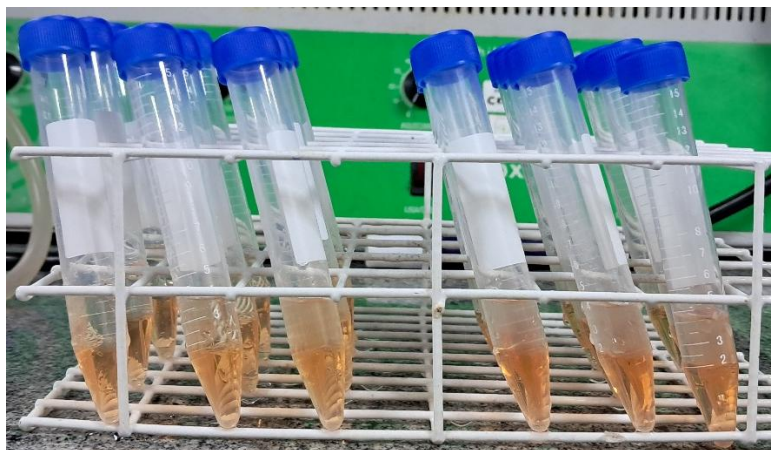
Comparando os métodos de extração, verifica-se que a maceração apresentou as maiores absorbâncias em praticamente toda a faixa espectral analisada, seguida pela extração assistida por ultrassom (EAU) e pela infusão. Como não foram observados deslocamentos significativos dos máximos de absorção (efeitos batocrômicos ou hipsocrômicos), conclui-se que os métodos de extração não alteraram significativamente a estrutura química dos compostos extraídos.

As diferenças observadas entre os espectros estão relacionadas principalmente à quantidade dos metabólitos presentes em cada extrato que, por sua vez, depende não só de diversos fatores ajustáveis como temperatura, pressão, tempo, propriedades do soluto e do solvente (Drosou *et al.*, 2015).

5.2 PARTICIONAMENTO DO CORANTE

Após o período de 24 horas em repouso a 20 °C, todos os sistemas apresentaram separação de fases, indicando o estabelecimento do equilíbrio termodinâmico. As Figura 25 e 26 ilustram o aspecto macroscópico dos sistemas após a etapa de equilíbrio, permitindo observar a formação das fases superior e inferior e a interface entre elas. A visualização dessa separação foi importante para orientar a coleta das amostras, realizada cuidadosamente para evitar a transferência de material da região interfacial, garantindo maior precisão nas análises de absorbância por espectroscopia UV-Vis.

Figura 25 – Sistemas após partição



Fonte: Autoral (2026)

Figura 26 – Sistema PEG400-LA1 após partição



Fonte: Autoral (2026)

Com o objetivo de avaliar o comportamento de partição do extrato de cajuira nos Sistemas Aquosos Bifásicos Micelares (SABMs), foram realizados ensaios empregando sistemas constituídos por Polietilenoglicol (PEG 400 e PEG 4000), Triton X-114 e água, à temperatura de 293,15 K.

Os dados experimentais obtidos, juntamente com os parâmetros calculados a partir desses ensaios conforme descrito no item 4.2.6, estão apresentados nas Tabelas 12 e 13. A análise desses resultados possibilita verificar a influência da massa molar do PEG sobre a distribuição do extrato entre as fases, bem como a eficiência do processo de extração promovido pelos sistemas estudados.

Tabela 12 - Dados de partição do corante para o SABM com PEG 400

LA	Replicata	Abs ^{FS}	Abs ^{FI}	K	ΔG (KJ.mol ⁻¹)	EE ^{FS} (%)	EE ^{FI} (%)
1	I	0,095	0,577	0,1646	4,3970	14,1369	85,8631
	II	0,077	0,596	0,1292	4,9879	11,4413	88,5587
	III	0,092	0,575	0,1600	4,4667	13,7931	86,2069
3	I	0,093	0,558	0,1667	4,3672	14,2857	85,7143
	II	0,091	0,551	0,1652	4,3894	14,1745	85,8255
	III	0,087	0,538	0,1617	4,4408	13,9200	86,0800
5	I	0,208	0,581	0,3580	2,5037	26,3625	73,6375
	II	0,218	0,584	0,3733	2,4018	27,1820	72,8180
	II	0,182	0,568	0,3204	2,7740	24,2667	75,7333

Fonte: Autoral (2026)

Tabela 13 - Dados de partição do corante para o SABM com PEG 4000

LA	Replicata	Abs ^{FS}	Abs ^{FI}	k _p	ΔG (KJ.mol ⁻¹)	EE ^{FS} (%)	EE ^{FI} (%)
1	I	0,157	0,646	0,2430	3,4478	19,5517	80,4483
	II	0,134	0,646	0,2074	3,8339	17,1795	82,8205
	III	0,136	0,622	0,2186	3,7055	17,9420	82,0580
3	I	0,239	0,698	0,3424	2,6123	25,5069	74,4931
	II	0,212	0,659	0,3217	2,7643	24,3398	75,6602
	III	0,218	0,615	0,3545	2,5279	26,1705	73,8295
5	I	0,285	0,649	0,4391	2,0058	30,5139	69,4861
	II	0,238	0,602	0,3953	2,2619	28,3333	71,6667
	II	0,240	0,595	0,4034	2,2130	28,7425	71,2575

Fonte: Autoral (2026)

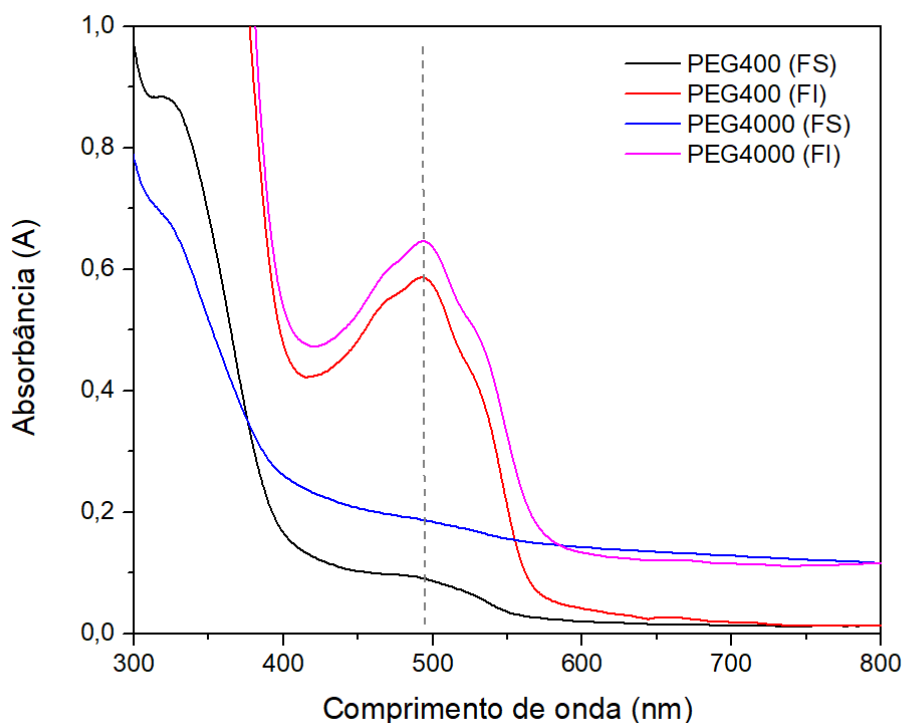
5.2.1 Influência da Concentração do Corante no Coeficiente de Partição

Inicialmente, realizou-se uma avaliação do comportamento espectral do corante presente nas diferentes fases dos SABM, com o objetivo de verificar a ocorrência de possíveis deslocamentos batocrômicos ou hipsocrômicos decorrentes das interações entre os componentes do sistema e os compostos presentes no extrato. Essa etapa é fundamental para garantir a confiabilidade das determinações espectrofotométricas, uma vez que alterações no comprimento de onda de máxima absorção poderiam influenciar a quantificação e a interpretação dos resultados de partição.

A Figura 27 apresenta os espectros de absorção na região do UV-Vis obtidos para o corante presente nas fases superior e inferior dos SABMs ricos em PEG 400 ou PEG 4000 e Triton X-114, respectivamente, à temperatura de 20 °C, considerando a primeira Linha de Amarração (LA). A comparação dos espectros permite avaliar a manutenção das características

espectrais do corante em cada fase do sistema, fornecendo informações importantes sobre a influência do meio na estabilidade e no comportamento óptico dos compostos extraídos.

Figura 27 – Espectros de absorção do corante nas fases dos SABM



Fonte: Autoral (2026)

Como observado anteriormente, a região de comprimento de onda de máxima absorção do corante ocorre entre 420 nm e 570 nm, valor que está em concordância com os dados reportados na literatura (Souza, 2024). Além disso, a análise dos espectros de absorção obtidos para as fases superior e inferior dos sistemas aquosos bifásicos demonstra que não ocorreram deslocamentos significativos do comprimento de onda de máxima absorção, seja para maiores ou para menores comprimentos de onda.

Por outro lado, observa-se uma variação na intensidade das bandas de absorção entre as diferentes fases analisadas. Esse comportamento está diretamente relacionado às diferenças de concentração do corante em cada fase após o processo de partição. Dessa forma, as alterações observadas referem-se apenas à magnitude da absorbância, sem modificar a posição da banda característica do corante, sendo um fator importante para determinação do coeficiente de partição (Montes, Campos, Heredia, 2020).

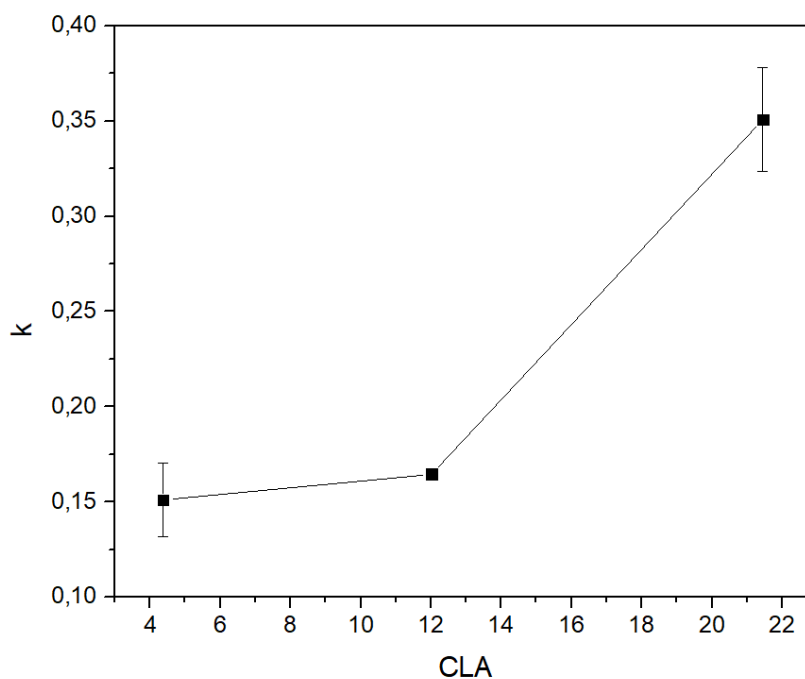
5.2.3 Influência do Comprimento da Linha de Amarração

O CLA é um parâmetro termodinâmico que influencia significativamente o comportamento de partição de grande parte dos objetos de estudo, refletindo as diferenças de composição dos componentes formadores do SABM nas fases em equilíbrio numa determinada temperatura fixa (Machado, 2006).

Observa-se nas Figuras 28 e 29 que o aumento do CLA promoveu um aumento progressivo dos valores de coeficiente de partição para ambos os sistemas estudados. Para o sistema contendo PEG 400, o coeficiente de partição aumentou de aproximadamente 0,15 para 0,35 à medida que o CLA passou de cerca de 4 para 21.

Comportamento semelhante foi observado para o sistema contendo PEG 4000, no qual k aumentou de aproximadamente 0,22 para 0,41 com o aumento do CLA de aproximadamente 10 para 15. Em outras palavras, as alterações das propriedades intensivas das fases com o aumento do CLA demonstram que valores menores de comprimento favorecem a partição do corante para a fase inferior de ambos os sistemas.

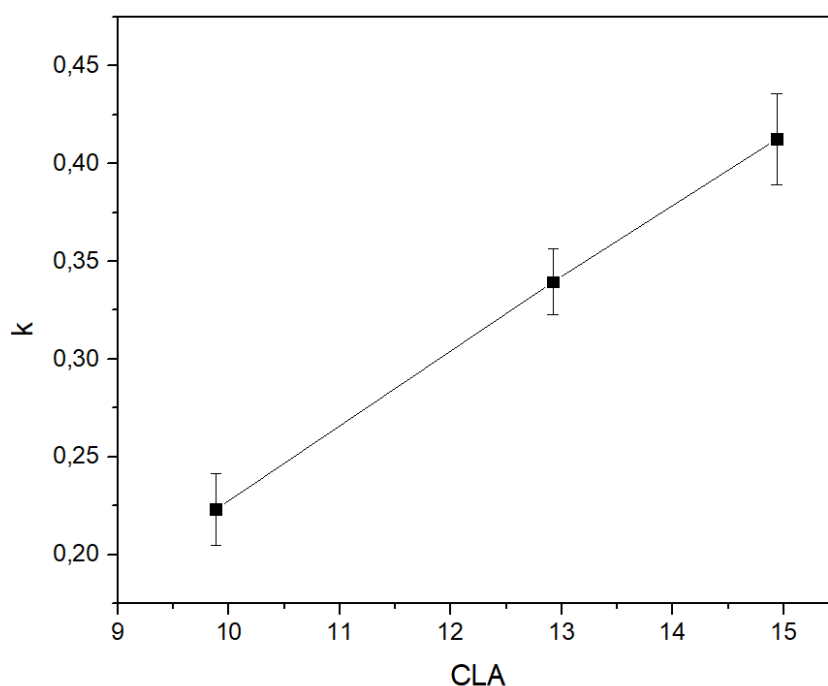
Figura 28 - Efeito do CLA no coeficiente de partição do corante em SABM formado por PEG 400 g.mol^{-1} + Triton X-114 + H_2O



Fonte: Autoral (2026)

Os resultados encontrados se mostraram promissores quando comparados com outros dados da literatura. Por exemplo, (Junqueira, 2019) observou o mesmo comportamento de aumento do coeficiente de partição com aumento do CLA utilizando SABM formado por polímero e surfactante. Essa divisão ocorre, principalmente, pela interação entre o soluto e fase inferior rica em Triton X-114, sendo observado o caráter hidrofóbico da fase.

Figura 29 - Efeito do CLA no coeficiente de partição do corante em SABM formado por PEG 4000 g.mol⁻¹ + Triton X-114 + H₂O

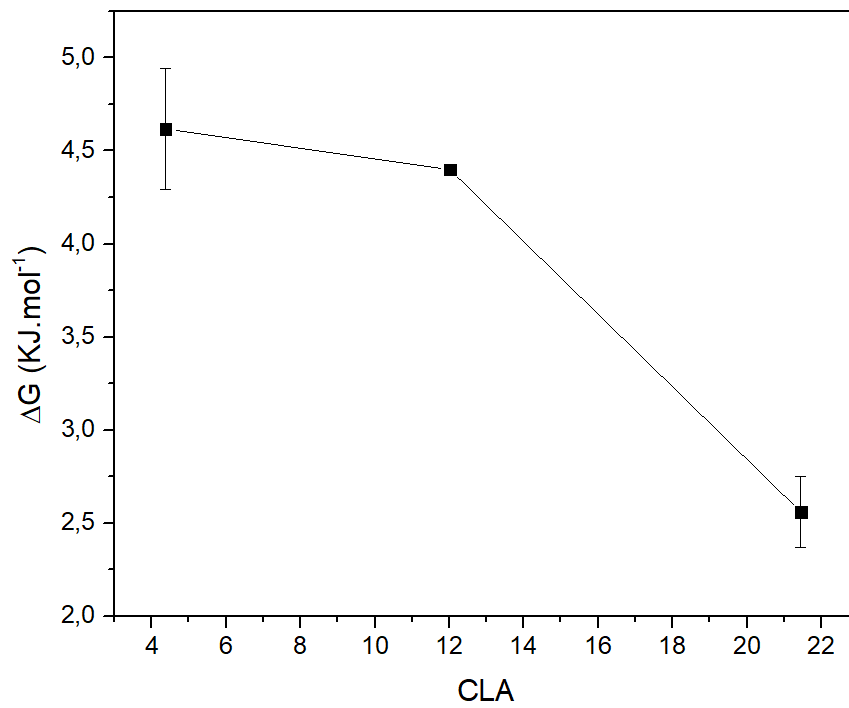


Fonte: Autoral (2026)

Os principais compostos descritos para o extrato incluem desoxiantocianidinas (como carajurina e carajurona) e flavonoides (como luteolina, apigenina e kaempferol) (Zorn *et al.*, 2001; Devia *et al.*, 2002). Essas moléculas apresentam estruturas policíclicas contendo múltiplos grupos hidroxila, ou seja, atuam com uma polaridade intermediária e elevada capacidade de estabelecer ligações de hidrogênio (Panche *et al.*, 2016).

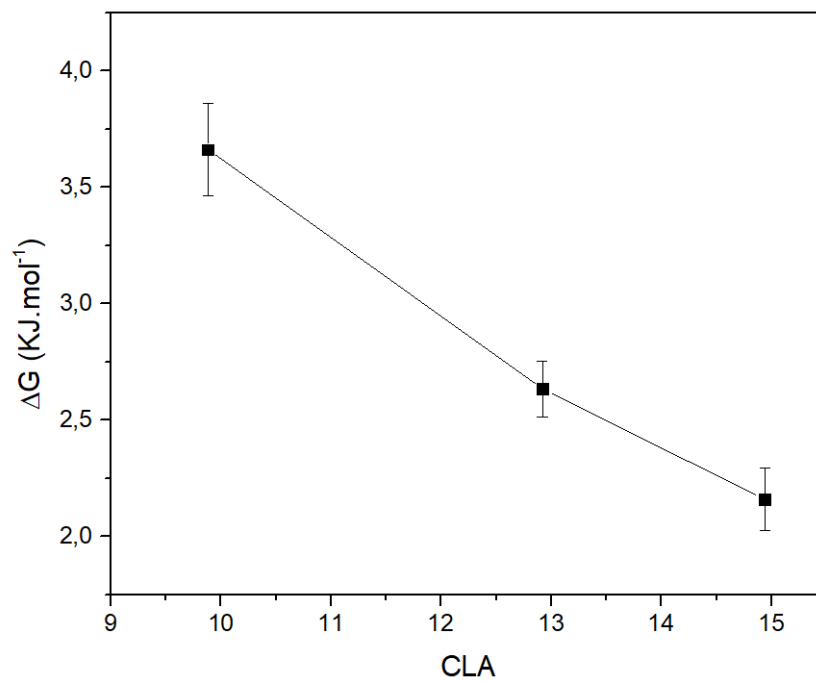
Os valores de ΔG foram positivos para todos os sistemas avaliados, indicando que a transferência dos compostos do extrato entre as fases ocorre de maneira espontânea para a fase inferior rica em surfactante Triton X-114. Observa-se na Figura 30 e Figura 31 que o aumento do CLA promove uma diminuição dos valores de ΔG .

Figura 28 - Efeito do ΔG em função do CLA dos SABM formado por PEG 400 g.mol^{-1} + Triton X-114 + H_2O



Fonte: Autoral (2026)

Figura 29 - Efeito do ΔG em função do CLA dos SABM formado por PEG 4000 g.mol^{-1} + Triton X-114 + H_2O



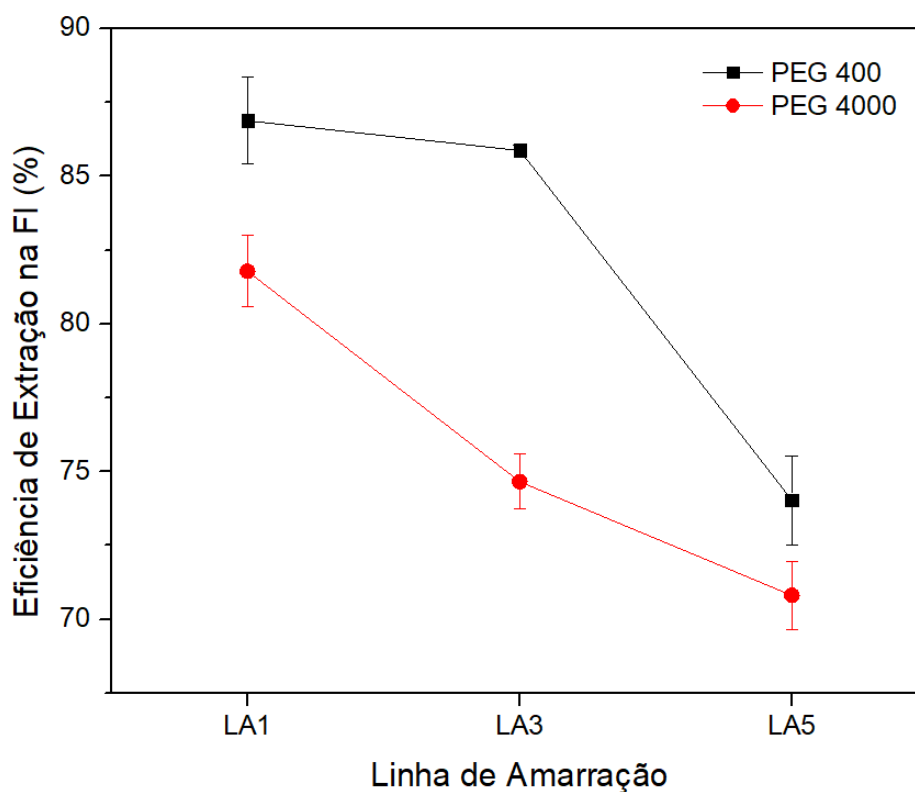
Fonte: Autoral (2026)

A redução dos valores de ΔG indica que a transferência dos compostos é mais favorável para a fase superior com o aumento do comprimento da linha de amarração (CLA). Esse comportamento está de acordo com o aumento do coeficiente de partição (k) observado, sugerindo que os metabólitos passaram a encontrar um ambiente de maior preferência pela fase inferior (Coelho *et al.*, 2020).

5.2.4 Influência do Peso Molecular do Polietilenoglicol

A influência do peso molecular do polímero polietilenoglicol foi avaliada variando entre 400 g.mol⁻¹ e 4000 g.mol⁻¹ como pode-se observar na Figura 32. A eficiência de extração apresentou tendência decrescente com o aumento de CLA. Para o sistema PEG400, a eficiência reduziu de aproximadamente 86% (LA1) para 74% (LA5). Tendência semelhante foi observada para o PEG4000, cujos valores diminuíram de cerca de 81% (LA1) para 70% (LA5).

Figura 30 – Efeito do peso molecular na eficiência de extração



Fonte: Autoral (2026)

Os maiores percentuais de extração foram obtidos nas formulações LA1, independentemente da massa molar do PEG. Isso sugere que, embora o aumento de LA favoreça a distribuição relativa do composto entre as fases (maior k), pode ocorrer redução da recuperação global do analito na fase inferior.

Esse efeito pode ser explicado pelo maior caráter hidrofóbico apresentado pelo PEG de maior massa molar em comparação ao PEG de menor massa molar (Junqueira, 2019). O aumento da cadeia molecular faz com que os grupos hidroxila diminuam, por isso, ocorre o aumento da hidrofobicidade da fase superior (Amjad *et al.*, 2022). Como resultado, intensifica-se a compatibilidade entre alguns compostos do corante com a fase superior reduzindo a concentração total do corante na fase inferior (Alvarenga *et al.*, 2014; Capela *et al.*, 2023).

Esse resultado corrobora com o estudo realizado por Liu (2012), no qual observou SABM formados por PEG/Triton X-100 para partição de aminoácidos. Conclui-se que o menor peso molecular do polímero apresenta maior diferença hidrofóbica entre as fases, favorecendo a preferência de moléculas hidrofílicas pela fase superior.

6 CONCLUSÕES

Esse trabalho colabora com o avanço de alternativas mais sustentáveis de extração, pré-concentração e purificação de compostos corantes que apresentam alguma atividade bioquímica de interesse industrial ou tecnológico através do uso de Sistemas Aquoso Bifásicos Micelares formados por Polietilenoglicol, Surfactante Triton X-114 e Água sob temperatura fixa.

No primeiro momento, destaca-se o preparo de extratos de corante obtido por três métodos (entre convencionais e não convencionais). Esses extratos apresentaram características semelhantes em relação as propriedades de absorção e emissão, ou seja, a variação dos métodos não provocou mudança estrutural químicas com os parâmetros aplicados. O extrato obtido por maceração apresentou melhores propriedades antioxidantes e maior teor de antocianinas.

O extrato de corante vegetal obtido pelo método de maceração foi aplicado na partição em 6 composições distintas de SABM formados por Polietilenoglicol, Triton X-114 e Água. Destaca-se valores de coeficiente de partição menores que 1, ou seja, em todos os 6 sistemas obteve-se a preferência do corante pela inferior rica em surfactante; além disso, para todos os 6 sistemas os valores de variação da energia livre de Gibbs é superior a 0, indicando que o processo não possui espontaneidade para a fase inferior do sistema.

A partir da variação do comprimento da linha de amarração para o sistema formado tanto com PEG400 quanto PEG4000, verificou-se o aumento do coeficiente de partição do processo, o que pode ser um indicativo do aumento de seletividade do processo quando se altera as propriedades intensivas das fases. Além disso, os coeficientes de partição de PEG4000 são maiores que PEG400 revelando o aumento do peso molecular do polímero promoveu maior interação com as moléculas presentes no extrato (migrando da fase inferior para superior), mas ainda com maior concentração na fase inferior

Esse estudo mostrou uma eficiência máxima de 86,87% e mínima de 70,80% de extração do corante na fase inferior para o SABM formado por PEG400 na linha de amarração 1 e PEG4000 na linha de amarração 5. Experimentalmente, menores comprimentos de linha amarração e menor peso molecular do polietilenoglicol promove a melhor eficiência de extração para o corante aplicado. Pode-se inferir, então que o Sistema Aquosos Bifásico Micelar contendo PEG 400 é o mais promissor, devendo-se avaliar ainda o comportamento com a variação de outros parâmetros, como temperatura e pH.

7 PERSPECTIVAS

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, algumas perspectivas para estudos futuros podem ser destacadas, visando ampliar o conhecimento acerca da aplicação de Sistemas Aquosos Bifásicos Micelares na extração e purificação de corantes naturais provenientes do *crajiu* (*Arrabidaea chica*). Nesse contexto, sugerem-se as seguintes investigações:

- Avaliar a influência da temperatura sobre o comportamento de partição do corante nos sistemas estudados, possibilitando a determinação de parâmetros termodinâmicos, como a variação de entalpia e seletividade;
- Realizar a qualificação e quantificação dos principais compostos bioativos presentes nos extratos e nas fases que apresentaram melhor desempenho de partição, utilizando técnicas analíticas como Cromatografia Líquida de Alta Eficiência ou Espectrometria de Massas;
- Estudar a aplicação dos corantes purificados em diferentes matrizes, como alimentos, cosméticos ou materiais têxteis, visando verificar seu potencial tecnológico.

REFERÊNCIAS

- ABBOTT, Andrew P. et.al. Glycerol eutectics as sustainable solvent systems. **Green Chemistry**, v. 13, n. 1, p. 82-90, 2011.
- ALBARICI, T. R.; PESSOA, J. D. C.; FORIM, M. R. Efeito das variações de pH e temperatura sobre as antocianinas na polpa de açaí: estudos espectrofotométricos e cromatográficos. EMBRAPA. ISSN 1517-4786. São Carlos, SP 2006.
- ALBERTSSON, Per-Åke; JOHANSSON, Göte; TJERNELD, Folke. Aqueous two-phase separations. **Separation processes in Biotechnology**, p. 287-328, 2020.
- ALVARENGA, Bruno G. et.al. Measurement and correlation of the phase equilibrium of aqueous two-phase systems composed of polyethylene (glycol) 1500 or 4000+ sodium sulfite+ water at different temperatures. **Journal of Chemical & Engineering Data**, v. 59, n. 2, p. 382-390, 2014.
- AMJAD, Razieh Sobhi et al. An efficiency strategy for cobalt recovery from simulated wastewater by biphasic system with polyethylene glycol and ammonium sulfate. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 17302, 2022.
- ANGELL, C. Austen; ANSARI, Younes; ZHAO, Zuofeng. Ionic liquids: past, present and future. **Faraday discussions**, v. 154, p. 9-27, 2012.
- AUNNANKAT, Kridsada et al. Extraction of Lead Ions and Partitioning Behavior in Aqueous Biphasic Systems Based on Polyethylene Glycol and Different Salts. **Journal of Chemical & Engineering Data**, v. 69, n. 10, p. 3584-3592, 2024.
- BEHRENS, Maria Dutra; TELLIS, Carla J. Moragas; DO SOCORRO CHAGAS, Maria. Arrabidaea chica (Humb. & Bonpl.) B. Verlot (Bignoniaceae). **Revista Fitos**, v. 7, n. 04, p. 236-244, 2012.
- BHATIA, Deepika et al. Biological methods for textile dye removal from wastewater: A review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 47, n. 19, p. 1836-1876, 2017.
- BONNASSIEUX, Sophie et al. Revisiting the driving force inducing phase separation in PEG–phosphate aqueous biphasic systems. **Faraday Discussions**, v. 253, p. 181-192, 2024.
- BORAVELLI, Joseph Abhisheka Rao; VIR, Anil B. Liquid–Liquid Equilibrium Data of Various Micellar Aqueous Two-Phase Systems for the Extraction of Rhodamine B and Hexavalent Chromium. **Journal of Chemical & Engineering Data**, v. 69, n. 5, p. 1904-1916, 2024.
- BRANDANI, Stefano. The relevance of binodal curve data in ternary liquid—liquid equilibria. **Chemical engineering science**, v. 49, n. 9, p. 1469-1471, 1994.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Comissão Nacional de Normas e Padrões para Alimentos (CNNPA). **Resolução nº 44, de 1977**. Estabelece as condições gerais de elaboração,

classificação, apresentação, designação, composição e fatores essenciais de qualidade dos corantes empregados na produção de alimentos e bebidas. Brasília, DF, 1978.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância Sanitária. **Portaria nº 540, de 27 de outubro de 1997**. Aprova o Regulamento Técnico: Aditivos Alimentares – definições, classificação e emprego. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 1997

BROWN, Theodore L. et.al. **Química: la ciencia central**. Pearson educación, 2004.

CAPELA, Emanuel V. et al. Using three-phase partitioning for the purification and recovery of antibodies from biological media. **Separation and Purification Technology**, v. 316, p. 123823, 2023.

CARTER, Giles F.; CARTER, Giles F.; PAUL, Donald E. **Materials science and engineering**. ASM international, 1991.

CARVALHO, José Edmar Urano de. **Cachos de açaí**. Brasília, DF: Embrapa, [s.d.]. 2021.

CHEMAT, Farid; VIAN, Maryline Abert; CRAVOTTO, Giancarlo. Green extraction of natural products: Concept and principles. **International journal of molecular sciences**, v. 13, n. 7, p. 8615-8627, 2012.

CHEN, Ji et.al. Application of poly (ethylene glycol)-based aqueous biphasic systems as reaction and reactive extraction media. **Industrial & engineering chemistry research**, v. 43, n. 17, p. 5358-5364, 2004.

CHUNGKRANG, Lizamoni; BHUYAN, Smita; PHUKAN, Ava Rani. Natural dyes: extraction and applications. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 10, n. 1, p. 1669-1677, 2021.

COELHO, Yara L. et al. New Insights into the Partitioning of Phenothiazine Dyes in Aqueous Two-Phase Systems. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 31, p. 1700-1713, 2020.

CONSELHO EDITORIAL MEDICINA NATURAL. **Crajiuru (Pariri): guia completo da planta amazônica**. Medicina Natural, 7 jun. 2012.

DA CRUZ SILVA, Keycianne et al. Aqueous two-phase systems formed by different phase-forming components: Equilibrium diagrams and dye partitioning study. **Fluid Phase Equilibria**, v. 520, p. 112664, 2020.

DE FIGUEIREDO, Alberthmeiry Teixeira; BARRADO, Cristiano Morita. **Processos da Indústria Química**. Editora Intersaberes, 2023.

DE OLIVEIRA, Rosana Moura et.al. Liquid–liquid equilibria of biphasic systems composed of sodium citrate+ polyethylene (glycol) 1500 or 4000 at different temperatures. **Journal of Chemical & Engineering Data**, v. 53, n. 4, p. 895-899, 2008.

DE SOUZA, Helenires Queiroz et al. Preparo do corante de crajirú (*Arrabidaea chica* (Bonpl.) B. Verl.) e sua aplicação em Histologia. 2018.

DECKER, Betina Louise Angioletti et al. Ultrasound-assisted extraction of anthocyanins from grape pomace using acidified water: Assessing total monomeric anthocyanin and specific anthocyanin contents. **Food Research International**, v. 194, p. 114910, 2024.

DEVIA, B.; LLABRES, G.; WOUTERS, J.; DUPONT, L.; ESCRIBANO-BAILÓN, M. T. New anthocyanins from leaves of *Arrabidaea chica*. *Journal of Natural Products*, v. 65, n. 9, p. 1216–1218, 2002.

DROSOU, Christina et al. A comparative study on different extraction techniques to recover red grape pomace polyphenols from vinification byproducts. **Industrial Crops and Products**, v. 75, p. 141-149, 2015.

EDU AMBIENTAL. **Urucum**. *Blog do Edu Ambiental*, 27 jun. 2013.

FEITOSA, José Douglas de Arruda et al. Estudo fitoquímico e atividade biológica do extrato aquoso de *Arrabidaea chica* (Bignoniaceae). 2025.

FICK, Caitlyn; KHAN, Zara; SRIVASTAVA, Samanvaya. Interfacial stabilization of aqueous two-phase systems: a review. **Materials Advances**, v. 4, n. 20, p. 4665-4678, 2023.

FORSYTH, Stewart A.; PRINGLE, Jennifer M.; MACFARLANE, Douglas R. Ionic liquids—an overview. **Australian Journal of Chemistry**, v. 57, n. 2, p. 113-119, 2004.

FREIRE, Mara G. et al. Aqueous biphasic systems: a boost brought about by using ionic liquids. **Chemical Society Reviews**, v. 41, n. 14, p. 4966-4995, 2012.

FRUTOPEDIA. **Jenipapo (*Genipa americana*)**. Frutopedia, [s.d.]

FUKAYA, Yukinobu; OHNO, Hiroyuki. Hydrophobic and polar ionic liquids. **Physical Chemistry Chemical Physics**, v. 15, n. 11, p. 4066-4072, 2013.

GAN, Mei Qi et al. Optimization of Polymer/Salt Aqueous Biphasic System (ABS) for Direct Recovery of Recombinant *Bacillus Subtilis* Protease. **EDITORIAL BOARD**, p. 61, 2023.

GARCIA, Carlos Eduardo Rocha et al. Carotenoides bixina e norbixina extraídos do urucum (*Bixa orellana* L.) como antioxidantes em produtos cárneos. **Ciência Rural**, v. 42, p. 1510-1517, 2012.

GARZA-MADRID, Marcos et.al. Potential of aqueous two-phase systems constructed on flexible devices: Human serum albumin as proof of concept. **Process Biochemistry**, v. 45, n. 7, p. 1082-1087, 2010.

GHAFFARI, Fariba et al. Liquid–liquid equilibrium measurements and computational study of salt–polymer aqueous two phase system for extraction of analgesic drugs. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 13848, 2022.

GUERRA, Eugenia; LLOMPART, Maria; GARCIA-JARES, Carmen. Analysis of dyes in cosmetics: challenges and recent developments. **Cosmetics**, v. 5, n. 3, p. 47, 2018.

HARBORNE, J. B. Métodos fitoquímicos: um guia para técnicas modernas de análise de plantas. 3ª edição. Nova York, NY: Londres, Reino Unido, p.219-245, 1998.

HATTI-KAUL, Rajni. Aqueous two-phase systems: A general overview. **Molecular biotechnology**, v. 19, n. 3, p. 269-277, 2001.

HOMMA, Alfredo Kingo Oyama et al. Açaí: novos desafios e tendências. **Amazônia: ciência & desenvolvimento**, v. 1, n. 2, p. 7-23, 2006.

HOSSEINIAN, F. S.; LIU, R. H. *Antioxidant activity and free radical-scavenging capacity of anthocyanin pigments extracted from purple corn pericarp.* **Food Chemistry**, v. 109, n. 4, p. 879–888, 2008

IQBAL, Mujahid et.al. Aqueous two-phase system (ATPS): an overview and advances in its applications. **Biological procedures online**, v. 18, n. 1, p. 18, 2016.

JUNIOR, SANTOS et.al. Equilíbrio líquido-líquido em sistemas envolvendo líquidos iônicos: um estudo acerca da modelagem termodinâmica. 2019.

JUNQUEIRA, Cristina Mazzeu. Surfactantes como agentes moduladores da partição e formadores de novos sistemas aquosos bifásicos. 2019. 136 f. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal de Alfenas, Alfenas, MG, 2019.

KILIKIAN, Beatriz Vahan et.al. Extração líquido-líquido em sistemas de duas fases aquosas. **Purificação de produtos biotecnológicos: operações e processos com aplicação industrial**, p. 241, 2020.

KHATUN, Most Halima et al. Optimization of alkaline extraction of natural dye from Acacia catechu and its dyeing on silk fabrics. **J. Environ. Sci**, v. 6, p. 111-117, 2017.

KHAYATI, Gholam et al. Influence of Organic salts on the phase equilibrium of biphasic systems containing the nonionic surfactant (Triton X-100): experiment and correlation. **Journal of Solution Chemistry**, v. 52, n. 2, p. 251-261, 2023.

LEE, Sze Ying et al. Recent advances in protein extraction using ionic liquid-based aqueous two-phase systems. **Separation & Purification Reviews**, v. 46, n. 4, p. 291-304, 2017.

LI, Zhiyong et.al. Ionic liquid-based aqueous two-phase systems and their applications in green separation processes. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 29, n. 11, p. 1336-1346, 2010.

LIMA, Regiane G. et al. Determination of Photosensitizing Potential of Lapachol for Photodynamic Inactivation of Bacteria. **Molecules**, v. 29, n. 21, p. 5184, 2024.

LIU, Yang et al. Partitioning of biomolecules in aqueous two-phase systems of polyethylene glycol and nonionic surfactant. **Biochemical engineering journal**, v. 69, p. 93-99, 2012.

LIU, Yang; FENG, Yuan-qi; ZHAO, Yongjie. Liquid–liquid equilibrium of various aqueous two-phase systems: experiment and correlation. **Journal of Chemical & Engineering Data**, v. 58, n. 10, p. 2775-2784, 2013.

LU, Xiaoxing et al. Distribution of pigments in the aqueous two-phase system formed with piperazinium-based ionic liquid and anionic surfactant. **Journal of Molecular Liquids**, v. 330, p. 115677, 2021.

MA, Xiaoyu et al. Sistemas aquosos bifásicos verdes construídos por líquido iônico de guanidínio para recuperação eficiente de ouro (I) de solução de tiosulfato. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 12, n. 30, p. 11396-11408, 2024.

MACALIA, Célio Matias Airone et al. Ultrasound-Assisted Enhancement of Bioactive Compounds in Amazonian Fruit Juices (*Mammea americana*, *Solanum sessiliflorum*, and *Cassia leiandra*). **ACS omega**, v. 11, n. 7, p. 11360-11374, 2026.

MACHADO, Alex Barreto. **Estudos do processo de extração líquido-líquido para a purificação do ácido acrílico**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

MACHADO, Poliana Aparecida Lopes. Estudo de sistemas aquosos bifásicos envolvendo sais inorgânicos e o líquido iônico [C4mim] Cl. 2016.

MAHESHWARI, Neha et al. Surfactant-enhanced extraction of lutein from marigold petals using an aqueous two-phase system. **Separations**, v. 10, n. 2, p. 133, 2023.

MATSOUKAS, Themis. *Fundamentos de termodinâmica para engenharia química*. Tradução de Fernando Henrique de Albuquerque Ferreira. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

MARIMUTHU, Nagaraju et al. Recovery of hyaluronic acid using thermosensitive polymer-salt aqueous biphasic system with polymer recycling. **Journal of bioscience and bioengineering**, v. 140, n. 2, p. 79-89, 2025.

MARTINS, Natália et al. Food colorants: Challenges, opportunities and current desires of agro-industries to ensure consumer expectations and regulatory practices. **Trends in food science & technology**, v. 52, p. 1-15, 2016.

MEDCHEMEXPRESS. *Kaempferol (Standard): chemical structure*. Monmouth Junction, 2025. Disponível em: [MedChemExpress – Kaempferol \(Standard\)](#).

MELÉNDEZ-MARTÍNEZ, A. J. An overview of carotenoids, apocarotenoids and vitamin A in agro-food, nutrition, health and disease. *Molecular Nutrition & Food Research*, v. 63, 2019.

MOHAMMADI, I.; GHORBANIDEHKORDI, S.; HALLAJISANI, A. Assessment of ionic liquid-based aqueous two-phase system abilities to remove sulfonamide antibiotics from the aquatic environment. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 19, n. 11, p. 11291-11300, 2022.

MELO, Karina Suzana Gomes de. *Extração e uso de corantes vegetais da Amazônia no tingimento do couro de Matrinxã (Brycon amazonicus Spix & Agassiz, 1819)*. 2007. 79 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura no Trópico Úmido) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia / Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2007

MONTES, Cristina; CAMPOS, Joaquín; HEREDIA, Francisco J. Instrumental factors influencing absorption measurements for fluid food color determination. *Journal of AOAC International*, v. 87, n. 3, p. 632–638, 2004

MORAES, Elias Kahllyl da Silva. **Estudo de partição da rodamina B utilizando sistemas aquosos bifásicos micelares**. Manaus, 2024

NASCIMENTO, Lariza Leisla Leandro et al. Genipa americana L.: A review on traditional uses, phytochemistry and biological activities. *Chemistry & Biodiversity*, v. 21, n. 11, p. e202400748, 2024.

NOVAIS, Cláudia et al. Natural food colorants and preservatives: A review, a demand, and a challenge. *Journal of agricultural and food chemistry*, v. 70, n. 9, p. 2789-2805, 2022.

OLIVEIRA, L.; TOLEDO, H.; CRUZ, J.; GOMES, J.; GOMES, J.; MENEZES, E.; SANTOS, A. **Estudo dos Extratos de Crajiru (Arrabidaea chica) em Cromatografia em Camada Delgada**. In: 61º Congresso Brasileiro de Química, 61., 2021

ÖZOMAY, Meral; AKALIN, Mehmet. Optimization of fastness properties with gray relational analysis method in dyeing of hemp fabric with natural and classic mordant. *Journal of Natural Fibers*, v. 19, n. 8, p. 2914-2928, 2022.

PANCHE, A. N.; DIWAN, A. D.; CHANDRA, S. R. Flavonoids: an overview. *Journal of Nutritional Science*, v. 5, e47, 2016.

PENIDO, Ricardo; NUNES, Renata; DOS SANTOS, Eduardo Nicolau. Solventes sustentáveis para processos químicos. *Revista Virtual de Química*, v. 14, n. 3, 2022.

PEREIRA, Jorge FB et.al. Molecular interactions in aqueous biphasic systems composed of polyethylene glycol and crystalline vs. liquid cholinium-based salts. *Physical Chemistry Chemical Physics*, v. 16, n. 12, p. 5723-5731, 2014.

PEREIRA, Jorge F. B.; FREIRE, Mara G.; COUTINHO, João A. P. Aqueous two-phase systems: towards novel and more disruptive applications. *Fluid Phase Equilibria*, v. 505, 2020

PINTO, RAFAELA ROCHA. Equilíbrio líquido-líquido em sistemas ternários com Líquidos Iônicos baseados no íon amônio, incluindo a síntese e purificação dos mesmos. **Campinas: Universidade Estadual de Campinas**, 2016.

PŁOTKA-WASYLKA, Justyna et.al. Deep eutectic solvents vs ionic liquids: Similarities and differences. *Microchemical Journal*, v. 159, p. 105539, 2020.

PRIOR, Ronald L.; WU, Xianli; SCHAICH, Karen. *Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplements*. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 53, n. 10, p. 4290–4302, 2005

RANGEL-YAGUI, C. O.; PESSOA JR., A.; TAVARES, L. C. **Two-phase aqueous micellar systems: an alternative method for protein purification**. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 21, n. 4, p. 531–544, 2004

QADIR, Ishtiyak; CHHIPA, R. C. Critical evaluation of some available treatment techniques for textile and paper industry effluents: a review. **Am. Chem. Sci. J.**, v. 6, n. 2, p. 77-90, 2015.

RAGAB, Menna M.; HASSABO, Ahmed G.; OTHMAN, Hanan. An overview of natural dyes extraction techniques for valuable utilization on textile fabrics. **Journal of Textiles, Coloration and Polymer Science**, v. 19, n. 2, p. 137-153, 2022.

RAJA, Selvaraj et al. Aqueous two phase systems for the recovery of biomolecules—a review. **Sci Technol**, v. 1, n. 1, p. 7-16, 2011.

REHMAN, Fazal Ur et al. Microwave-assisted exploration of yellow natural dyes for nylon fabric. **Sustainability**, v. 14, n. 9, p. 5599, 2022.

RODRÍGUEZ, Héctor et.al. Biphasic liquid mixtures of ionic liquids and polyethylene glycols. **Physical Chemistry Chemical Physics**, v. 11, n. 46, p. 10916-10922, 2009.

SERVESH, Anushka et.al. Recent advances in polyethylene glycol as a dual-functional agent in heterocycle synthesis: Solvent and catalyst. **Polymers for Advanced Technologies**, v. 35, n. 6, p. e6433, 2024.

SHAHID, Mohammad et al. Recent advancements in natural dye applications: a review. **Journal of cleaner production**, v. 53, p. 310-331, 2013.

SHEIKH, Javed; JAGTAP, Priyanka S.; TELI, M. D. Ultrasound assisted extraction of natural dyes and natural mordants vis a vis dyeing. **Fibers and Polymers**, v. 17, n. 5, p. 738-743, 2016.

SHEN, Lipeng et al. A comprehensive review of ultrasonic assisted extraction (UAE) for bioactive components: Principles, advantages, equipment, and combined technologies. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 101, p. 106646, 2023.

SHRIVASTAVA, A. et al. Extraction and dyeing methods for natural dyes. **Natural dyes: scope and challenges**, p. 67-80, 2006.

SIGURGISLADOTTIR, S.; TORRES, M. D.; GÓMEZ, B.; et al. Natural food colorants: sources, chemistry and applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, v. 19, n. 6, p. 3281–3308, 2020.

SINGLA, Mohit; SIT, Nandan. Theoretical aspects and applications of aqueous two-phase systems. **ChemBioEng Reviews**, v. 10, n. 1, p. 65-80, 2023.

SIQUEIRA, Francilia Campos de; BARBOSA-CARVALHO, Anna Paula Pereira; LEITÃO, Deusa do Socorro Teixeira Costa; FURTADO, Kalebe Ferreira; CHAGAS-JUNIOR, Gilson Celso Albuquerque; LOPES, Alessandra Santos; CHISTÉ, Renan Campos. *Scavenging capacity of extracts of Arrabidaea chica leaves from the Amazonia against ROS and RNS of physiological and food relevance*. *Antioxidants*, Basel, v. 11, n. 10, p. 1909, 2022. DOI: 10.3390/antiox11101909.

SK, Salauddin et al. Review on extraction and application of natural dyes. **Textile & Leather Review**, v. 4, n. 4, p. 218-233, 2021.

SMIRNOVA, Svetlana V.; APYARI, Vladimir V. *Aqueous two-phase systems based on cationic and anionic surfactants mixture for rapid extraction and colorimetric determination of synthetic food dyes*. **Sensors (Basel)**, v. 23, n. 7, p. 3519, 2023.

SMITH, Emma L.; ABBOTT, Andrew P.; RYDER, Karl S. Deep eutectic solvents (DESS) and their applications. **Chemical reviews**, v. 114, n. 21, p. 11060-11082, 2014.

SOUZA, Sabrina dos Santos. **Potencial formador de AgNPs de extrato aquoso de crajiru (*Arrabidaea chica* (Humb. & Bonpl.) B. Verlot), planta medicinal da região amazônica**. Manaus: Universidade Federal do Amazonas, 2024..

STRAGEVITCH, Luiz. **Equilíbrio líquido-líquido em extração de aromáticos**. 1992. Tese de Doutorado. [sn].

SUN, Liying et al. Wetting mechanism and experimental study of synergistic wetting of bituminous coal with SDS and APG1214. *ACS Omega*, v. 7, n. 1, p. 780–785, 2021

TITUS, Amber R. et.al. Mechanism of phase separation in aqueous two-phase systems. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 22, p. 14366, 2022.

TREYBAL, Robert E. Liquid extraction. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 49, n. 3, p. 514-526, 1957.

WANG, Xiuhong et al. Study on the aqueous two-phase systems composed of surfactant, ionic liquid and water. **Fluid Phase Equilibria**, v. 347, p. 1-7, 2013.

XU, Kaijia et.al. A green deep eutectic solvent-based aqueous two-phase system for protein extracting. **Analytica Chimica Acta**, v. 864, p. 9-20, 2015.

ZANONI, M. V. B.; YAMANAKA, H. (Org.). *Corantes: caracterização química, toxicológica, métodos de detecção e tratamento*. São Paulo: Editora Unesp, 2016.

ZASLAVSKY, B. Yu et.al. Aqueous biphasic systems formed by nonionic polymers I. Effects of inorganic salts on phase separation. **Colloid and Polymer Science**, v. 264, n. 12, p. 1066-1071, 1986.

ZORN, B.; GARCÍA-PIÑERES, A. J.; CASTRO, V.; MURILLO, R.; MORA, G.; MERFORT, I. 3-Deoxyanthocyanidins from *Arrabidaea chica*. *Phytochemistry*, v. 56, p. 831–835, 2001.

ZONG, Wei et al. Mitigating Co²⁺ and Ni²⁺ hazards in contaminated soils using a PEG8000–Na₂SO₄ aqueous two-phase system: Mechanisms and toxicity reduction. 2022