

**Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Ciências Agrárias
Programa de Pós-graduação em Alimentos e Saúde**

Lucas André Xavier da Silva

**Aproveitamento tecnológico dos resíduos da agroindústria de frutos do Cerrado e
Caatinga para obtenção de surfactante natural**

Montes Claros- MG
2024

Lucas André Xavier da Silva

Aproveitamento tecnológico dos resíduos da agroindústria de frutos do Cerrado e Caatinga para obtenção de surfactante natural

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Alimentos e Saúde, do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Alimentos e Saúde.

Orientadora: Professora Dr^a. Juliana Pinto de Lima

Coorientadora: Professora Dr^a. Janaína Teles de Faria

Montes Claros- MG

2024

Silva, Lucas André Xavier.

S586a
2024

Aproveitamento tecnológico dos resíduos da agroindústria de frutos do cerrado e caatinga para obtenção de surfactante natural [manuscrito]/ Lucas André Xavier da Silva. Montes Claros, 2024.

94 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Área de concentração em Alimentos e Saúde.
Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias.

Orientadora: Juliana Pinto de Lima.

Banca examinadora: Janaína Teles de Faria, William James Nogueira, Hugo Calixto Fonseca.

Inclui referências: f. 71-94.

1. Compostos bioativos -- Teses. 2. Extração (Química) -- Teses. 3. Otimização -- Teses. 4. Saponinas -- Teses. I. Lima, Juliana Pinto. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 602.4:631.4

ELABORADA PELA BIBLIOTECA UNIVERSITÁRIA DO ICA/UFGM
Nádia Cristina Oliveira Pires / CRB-6/2781

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Reitora: Sandra Regina Goulart Almeida

Vice- Reitor: Alessandro Fernandes Moreira

Pró- Reitor de Pesquisa: Fernando Marcos dos Reis

Pró- Reitora de Pós- Graduação: Isabela Almeida Pordeus

CURSO DE MESTRADO ALIMENTOS E SAÚDE


Coordenador: Sérgio Henrique Sousa Santos

Subcoordenador: Igor Viana Brandi


ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos 19 dias do mês de fevereiro de 2024 às 14:00 horas, sob a Presidência da Prof^ª Juliana Pinto de Lima, Dr. Sc. (Orientadora – UFMG/ICA) e com a participação dos Professores Janaína Teles de Faria, Dr. Sc. (Coorientadora – UFMG/ICA), William James Nogueira Lima, Dr. Sc. (UFMG/ICA) e do Técnico em Laboratório Hugo Calixto Fonseca, Dr. Sc. (UFMG/ICA), reuniu-se, presencialmente, a Banca de defesa de dissertação do Discente **Lucas André Xavier da Silva**, aluno do Curso de Mestrado em Alimentos e Saúde. O resultado da defesa de dissertação intitulada: **“Aproveitamento tecnológico dos resíduos da agroindústria de frutos do Cerrado e Caatinga para obtenção de surfactante natural”**, sendo o aluno considerado **aprovado**. E, para constar, eu, Professora Juliana Pinto de Lima, Presidente da Banca, lavrei a presente ata que depois de lida e aprovada, será assinada por mim e pelos demais membros da Banca examinadora.


OBS.: O aluno somente receberá o título após cumprir as exigências onde a candidato deverá, após a aprovação de sua Dissertação ou Tese e da realização das modificações propostas pela banca examinadora, se houver, encaminhar à secretaria do Colegiado do Programa, com a anuência do orientador, no mínimo 1 (um) exemplar impresso e 1 (um) exemplar eletrônico da dissertação no prazo máximo de 30 (trinta) dias.

Documento assinado digitalmente
 **JANAÍNA TELES DE FÁRIA**
Data: 20/02/2024 08:09:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Janaína Teles de Faria
Coorientadora

Documento assinado digitalmente
 **WILLIAM JAMES NOGUEIRA LIMA**
Data: 19/02/2024 23:05:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

William James Nogueira Lima
Membro

Documento assinado digitalmente
 **JULIANA PINTO DE LIMA**
Data: 19/02/2024 20:07:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Juliana Pinto de Lima
Orientadora

Documento assinado digitalmente
 **HUGO CALIXTO FONSECA**
Data: 19/02/2024 20:46:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Hugo Calixto Fonseca
Membro

Montes Claros, 19 de fevereiro de 2024.

Dedico aos meus queridos pais Alfredo e Rosilene por todo amor e aprendizado a mim concedido, aos meus irmãos Patrícia, Tatiane e Alisson pelo incentivo e carinho.

AGRADECIMENTOS

Expresso minha humildade e gratidão a Deus, reconhecendo que Ele é a fonte de toda a sabedoria e força que tornaram possível a realização deste trabalho.

Agradeço a toda família Xavier e Silva em especial, aos meus queridos avós Olíria e Nei, cuja sabedoria e amor incondicional sempre foram a minha fonte de inspiração. Saibam que este trabalho é uma homenagem ao legado de perseverança e determinação que vocês me transmitiram.

Aos meus pais Alfredo e Rosilene, que sempre acreditaram em mim e me encorajaram a seguir os meus sonhos. Obrigado por todo o apoio emocional, financeiro e moral que me concederam ao longo destes anos.

Aos meus irmãos, Patrícia, Tatiane e Alisson e meu primo Josimárcio que considero como irmão. O apoio de vocês foi fundamental para que eu chegasse até aqui. A jornada teria sido muito mais difícil sem a presença de vocês ao meu lado.

A minha companheira Luisa Maria, que sempre esteve ao meu lado, me apoiando nos momentos difíceis e compartilhando comigo os momentos de alegria. Seu amor e compreensão tornaram essa jornada mais leve e significativa.

Ao professor Max pela liberação da utilização do laboratório de Produção Animal e por sempre se mostrar solícito.

Aos técnicos de laboratório do Instituto de Ciências Agrárias da UFMG.

Aos meus orientadores, Professora Juliana e Professora Janaina, pela confiança, ensinamentos e compreensão. Vocês foram fundamentais para que eu concluísse mais essa etapa da minha vida.

A Pró-reitoria de Pesquisa - UFMG.

Ao Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais (ICA/UFMG) pela oportunidade de realização do mestrado e infraestrutura disponibilizada.

À CAPES pelo auxílio financeiro, permitindo a condução desta pesquisa.

À FAPEMIG pelo financiamento da pesquisa (APQ 1384-18).

Por fim, a todos aqueles que colaboraram para a conclusão deste trabalho.

Muito obrigado!

“Confia no Senhor de todo o teu coração e não te estribes no teu próprio entendimento;
reconhece o Senhor em todos os teus caminhos, e ele endireitará as tuas veredas”.

Provérbios 3: 5-6

Resumo

Durante o processamento de frutas para a produção de diversos produtos, como polpas, sucos, doces, geleias e sorvetes, surgem resíduos, como cascas e sementes, frequentemente subutilizados. Uma alternativa interessante para a utilização desses resíduos é a extração de compostos bioativos, como as saponinas (SAP). As SAP apresentam propriedades surfactantes, com capacidade emulsificante e espumante, além de possuírem atividades biológicas diversas, como antimicrobiana, hipocolesterolêmica, hemolítica, antioxidante e pesticida. Apesar de muitos estudos avaliarem a obtenção de SAP a partir de diferentes fontes vegetais, ainda não há resultados divulgados sobre a potencialidade dos resíduos da agroindústria de frutos do Cerrado e Caatinga. Diante do exposto, este estudo buscou avaliar a potencialidade dos resíduos de frutos do Cerrado e Caatinga, do Norte mineiro, para a obtenção de SAP. Além disso, avaliou e otimizou o processo de extração por maceração a partir dos resíduos, bem como avaliou as propriedades funcionais e biológicas dos extratos com maior teor de SAP. As condições otimizadas para a extração a partir dos resíduos foram: temperatura de 35 °C durante 4 h, com concentração de etanol de 80% para macaúba e umbu, e 45 °C por 2,5 h e 80% de etanol para buriti e pequi. Nessas condições de extração, as concentrações de saponina nos extratos de resíduos de macaúba, umbu, buriti e pequi corresponderam a 2,58; 2,50; 2,28 e 2,21 mg/mL, respectivamente. Na avaliação da partição de saponinas dos extratos dos resíduos de umbu e macaúba em sistema aquoso bifásico, não foi obtido efeito significativo das variáveis estudadas (composição do sistema e temperatura). A capacidade emulsificante e de formação de espuma, assim como a estabilidade desses sistemas, foi baixa. No entanto, esses extratos mostraram atividade antimicrobiana ao inibir o crescimento de *Salmonella Typhimburium*, *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus*.

Palavras-chave: Composto bioativo. Extração. Otimização. Saponinas.

Abstract

During fruit processing for the production of various products, such as pulps, juices, sweets, jams, and ice creams, residues such as peels and seeds are generated, which are often underutilized. An interesting alternative for the use of these residues is the extraction of bioactive compounds, such as saponins (SAP). SAP exhibit surfactant properties, with emulsifying and foaming capacity, in addition to possessing various biological activities, such as antimicrobial, hypocholesterolemic, hemolytic, antioxidant, and pesticide effects. Although many studies have evaluated the extraction of SAP from different plant sources, no results have yet been published on the potential of residues from the agroindustry of fruits from the Cerrado and Caatinga biomes. In light of this, this study aimed to evaluate the potential of fruit residues from the Cerrado and Caatinga regions of Northern Minas Gerais for the extraction of SAP. In addition, it evaluated and optimized the maceration extraction process from the residues, as well as assessed the functional and biological properties of the extracts with the highest SAP content. The optimized extraction conditions from the residues were: 35 °C for 4 h, with 80% ethanol concentration for macaúba and umbu, and 45 °C for 2.5 h with 80% ethanol for buriti and pequi. Under these extraction conditions, the concentrations of saponins in the extracts from macaúba, umbu, buriti, and pequi residues were 2.58, 2.50, 2.28, and 2.21 mg/mL, respectively. In the evaluation of saponin partitioning in extracts from umbu and macaúba residues using an aqueous two-phase system, no significant effect of the studied variables (system composition and temperature) was observed. The emulsifying and foaming capacity, as well as the stability of these systems, was low. However, these extracts demonstrated antimicrobial activity by inhibiting the growth of *Salmonella Typhimurium*, *Escherichia coli*, and *Staphylococcus aureus*.

Keywords: Bioactive compound. Extraction. Optimization. Saponins.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Representações esquemáticas (I) de diversas configurações de surfactantes e (II) das interações interfaciais desses surfactantes em sistemas que envolvem água e ar, água e íons, bem como gotículas de óleo contendo água (lado direito)	25
Figura 2. Estrutura representativa de saponinas triterpênicas (a) e esteroidais (b).....	32
Figura 3. Técnicas atuais de extração empregadas na extração de saponinas de materiais vegetais	36
Figura 4. Representação do Sistema Aquoso Bifásico (ABS)	41
Figura 5. Diagrama esquemático representando vários desenvolvimentos recentes do ABS. ABS, sistema bifásico aquoso	43
Figura 6. Superfícies de resposta para a concentração de saponina total (Y, mg·mL ⁻¹) em função das variáveis tempo (x ₁), temperatura (x ₂) e concentração de etanol (x ₃) para as extrações a partir dos resíduos de buriti (A), umbu (B), macaúba (C) e pequi (D)	58
Figura 7. Formação de espuma e estabilidade da formação de espuma de resíduos de frutos	65
Figura 8. Estabilidade das de emulsões dos resíduos de umbu e macaúba. Emulsão com umbu - Tempo inicial (A), após 1 hora (B) e após 24 horas (C). Emulsão com macaúba - Tempo inicial (D), após 1 hora (E) e após 24 horas (F)	67
Figura 9. Microscopia ótica das emulsões recém preparadas com extratos não concentrados de umbu (A) e macaúba (B). Escala bar 10 µm	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais propriedades dos tensoativos.....	26
Tabela 2. Planejamento experimental do delineamento de Box Behnken Planejamento experimental do delineamento de Box Behnken para avaliação dos efeitos das variáveis tempo (x_1), temperatura (x_2) e concentração de etanol (x_3) sobre a extração de saponinas a partir de resíduos de frutos do Cerrado e Caatinga	46
Tabela 3. Matriz do delineamento experimental utilizado para avaliação dos efeitos das variáveis concentração de etanol (x_1), concentração de sulfato de amônio (x_2) e temperatura (x_3) sobre a partição de saponinas obtidas a partir de resíduos de umbu e macaúba	49
Tabela 4. Planejamento experimental e resultados da extração de saponinas a partir de resíduos de frutos do Cerrado e da Caatinga	53
Tabela 5. Resultado da ANOVA para o modelo de regressão ajustado aos dados de extração de saponinas a partir dos diferentes resíduos estudados	54
Tabela 6. Estimativa dos coeficientes da análise de regressão realizada para os resultados de extração de saponinas a partir dos resíduos avaliados e sua respectiva significância estatística	56
Tabela 7. Condições dos parâmetros para máxima extração de saponinas definidas pelos modelos e respectivos resultados preditos e experimentais ($\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$)	60
Tabela 8. Planejamento experimental e resultados do coeficiente de partição de saponinas totais do delineamento de face composto de face centrada	62
Tabela 9. Capacidade de formação de espuma (FC) e estabilidade de espuma (FS) de extratos de saponinas (ajustados para 2,0 mg/mL) obtidos a partir de resíduos de umbu e macaúba	64
Tabela 10. Atividade antimicrobiana dos extratos de saponina frente a microrganismos patogênicos Escherichia coli, Sthapylococcus aureus e Salmonella Typhimurium pelo método de difusão em ágar	70

LISTA DE ABREVIATURAS

BOD	Demanda bioquímica de oxigênio
CDs	Pontos quânticos de carbono
CMC	Concentração micelar crítica
CLSI	<i>Clinical & Laboratory Standards Institute</i>
DCC	Delineamento composto central
DCCR	Delineamento composto central rotacional
DES	<i>Deep eutectic solvents</i>
DIC	Delineamento inteiramente casualizado
DUFR	Dietética de resíduo seco de polpa de umbu
EMC	Extrato de macaúba concentrado
EMN	Extrato de macaúba não concentrado
EUC	Extrato de umbu concentrado
EUN	Extrato de umbu não concentrado
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
CLAE	Cromatografia líquida de alta eficiência
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MAE	Extração assistida por micro-ondas
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NaCl	Cloreto de sódio
pH	Potencial de hidrogênio
RSM	Metodologia de Superfície de Resposta
SAB	Sistema aquoso bifásico
SAP	Saponina
SAS	<i>Statistical Analysis System</i>
UFC/mL	Unidades Formadoras de Colônia por mililitro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS GERAL	18
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	18
3.1 Resíduos agroindustriais	18
3.1.1 Aproveitamento de resíduos de frutos do Cerrado e Caatinga	20
3.2 Surfactantes.....	23
3.2.1 Surfactantes Naturais.....	28
3.3 Saponinas	30
3.4.1 Métodos de extração de saponinas.....	35
3.4.2 Quantificação de saponinas	38
3.5 Sistema aquoso bifásico (SAB)	40
4. MATERIAL E MÉTODOS	42
4.1. Material.....	42
4.1.1. Solventes, reagentes e produtos químicos	42
4.1.2. Resíduos de frutos do Cerrado e Caatinga.....	43
4.1.3 Cominuição e análise granulométrica dos resíduos de frutos do Cerrado e Caatinga	43
4.2 Métodos	44
4.2.1. Avaliação do processo de extração de saponinas.....	44
4.2.2 Quantificação de saponinas totais	45
4.2.3 Análise estatística.....	46
4.2.4 Partição de saponina em sistema aquoso bifásico.....	47
4.2.5 Delineamento experimental e análise estatística.....	47
4.2.6 Obtenção dos extratos concentrados de umbu e macaúba	48
4.2.7 Determinação da estabilidade da emulsão	49
4.2.8 Determinação da capacidade de formação de espuma e estabilidade de espuma	49
4.2.9 Avaliação da atividade antibacteriana.....	50
4.2.10 Análise estatística	51
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
5.1 Extração de saponinas totais a partir de resíduos da agroindústria.....	51
5.2 Partição de saponinas em Sistema Aquoso Bifásico.....	60
5.3 Propriedade de espuma	62

5.4 Propriedade emulsificante.....	65
5.5 Análise antimicrobiana	68
6. CONCLUSÃO	71
7. REFERÊNCIAS	71

1. INTRODUÇÃO

As saponinas constituem uma ampla e diversificada classe de metabólitos secundários de origem vegetal, caracterizadas por sua estrutura anfifílica, composta por uma fração hidrofóbica geralmente um aglicone triterpenoide ou esteroide conjugada a cadeias hidrofílicas de açúcares. Essa configuração confere a essas moléculas propriedades tensioativas naturais, permitindo sua atuação como emulsificantes, espumantes e estabilizantes de interfaces (OSBOURN *et al.*, 2011; PIORKOWSKI & MCCLEMENTS, 2014; BUSTOS *et al.*, 2024). As saponinas ocorrem em distintas partes das plantas, incluindo raízes, sementes, folhas, cascas e frutos, com variações expressivas em composição e concentração em função da espécie, estágio de desenvolvimento e tecido vegetal (XU *et al.*, 2021; ADENUTSI *et al.*, 2023).

Do ponto de vista ecológico, as saponinas atuam como mecanismos de defesa contra insetos, fungos, bactérias e herbívoros, interferindo na permeabilidade de membranas celulares e inibindo o crescimento microbiano (SHARMA *et al.*, 2020; WEI *et al.*, 2021). No entanto, suas funções vão além do papel protetivo na fisiologia vegetal, despertando interesse crescente nos setores farmacêutico, alimentício, cosmético e agrícola. Isso se deve às suas diversas atividades biológicas, como ação antioxidante, anti-inflamatória, antiviral, antiparasitária e, notavelmente, antimicrobiana com destaque para a capacidade de atuar sinergicamente com antibióticos, inclusive frente a microrganismos multirresistentes (SANTANA *et al.*, 2021; AGRAWAL *et al.*, 2023).

O uso industrial das saponinas, sobretudo como adjuvantes vacinais, substituintes de surfactantes sintéticos e bioativos multifuncionais, impulsionou a extração em larga escala, com foco predominante na casca da árvore *Quillaja saponaria*, nativa da América do Sul. Essa fonte, embora eficaz, enfrenta críticas pela insustentabilidade ecológica: a extração destrutiva, o longo ciclo de crescimento da espécie e a sobrecarga dos ecossistemas naturais colocam em risco sua disponibilidade futura (CIBULSKI *et al.*, 2022; LAZO *et al.*, 2025; TIMILSENA *et al.*, 2023).

Nesse contexto, a busca por fontes renováveis e sustentáveis de saponinas tornou-se uma diretriz estratégica na bioeconomia e na promoção da economia circular. Dentre as alternativas estudadas, destacam-se resíduos agroindustriais ricos em compostos bioativos. Esses resíduos, muitas vezes subvalorizados ou descartados, representam uma oportunidade para recuperação de moléculas de alto valor agregado, ao mesmo tempo que

contribuem para a redução de impactos ambientais e aumento da eficiência nas cadeias produtivas (NGUYEN *et al.*, 2021; PIKHTIROVA *et al.*, 2023; SAMTYA *et al.*, 2020).

O Brasil, por sua vez, figura como um dos principais protagonistas nessa agenda sustentável. Como terceiro maior produtor mundial de frutas, o país gera grandes volumes de resíduos ao longo da cadeia hortifrutícola, com perdas que podem alcançar até 75% da matéria-prima no processamento industrial, dependendo da espécie e do método utilizado (PEREIRA *et al.*, 2022; Anuário Horti&Fruti, 2024). Tais perdas representam não apenas um desafio ambiental, mas também uma oportunidade tecnológica de revalorização de subprodutos.

Frutos nativos dos biomas Cerrado e Caatinga como buriti (*Mauritia flexuosa*), umbu (*Spondias tuberosa*), macaúba (*Acrocomia aculeata*) e pequi (*Caryocar brasiliense*) apresentam-se como candidatos promissores para a extração de saponinas. Seus resíduos (casca, polpa residual, caroços e sementes) apresentam composição química complexa e bioatividade documentada, mas ainda são pouco explorados pela indústria e pela academia (SILVA *et al.*, 2021; ALMEIDA *et al.*, 2022). Estudos iniciais demonstram presença de triterpenoides e glicosídeos em suas matrizes, sugerindo elevado potencial para aplicações funcionais e tecnológicas.

Embora o potencial dessas matérias-primas alternativas esteja evidenciado, os métodos de extração ainda requerem aprimoramento. Técnicas como maceração, extração assistida por ultrassom, micro-ondas e enzimas têm sido investigadas quanto à eficiência, seletividade e impacto ambiental. A escolha do método influencia diretamente o rendimento, a integridade estrutural das saponinas e as propriedades físico-químicas do extrato obtido (JIANG *et al.*, 2016; EL-HAMAMSY & EL-KHAMISSI, 2020; ZHANG *et al.*, 2020). A otimização dessas condições é, portanto, essencial para viabilizar a aplicação industrial dos extratos de saponinas oriundos de resíduos.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo principal avaliar e otimizar a extração de saponinas por maceração a partir de resíduos de frutos nativos do Cerrado e da Caatinga, com ênfase nos resíduos de buriti, umbu, macaúba e pequi. A proposta visa a obtenção de extratos ricos em saponinas com propriedades funcionais e tecnológicas adequadas para aplicações como surfactantes naturais, fomentando uma alternativa viável e sustentável à dependência de fontes tradicionais e contribuindo com a valorização da biodiversidade brasileira.

2.1. OBJETIVOS GERAL

Avaliar a potencialidade dos resíduos de frutos do cerrado da agroindústria do Norte mineiro para obtenção de saponina (SAP), um surfactante natural.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a presença de SAP nos resíduos agroindustriais de buriti, macaúba, umbu e pequi.
- Avaliar o processo de extração de SAP a partir de dois resíduos em termos dos parâmetros de processo: teor de etanol no solvente, temperatura e tempo de contato sólido-líquido.
- Avaliar a partição de SAP em sistema aquoso bifásico em função das concentrações de sal e álcool, e da temperatura de partição.
- Avaliar as propriedades de formação de espuma, emulsão, antioxidante e antimicrobiana de extratos de saponinas obtidos a partir dos dois resíduos escolhidos.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Resíduos agroindustriais

A produção de frutas no Brasil é um setor de grande importância econômica e social, com impacto significativo na geração de renda e na segurança alimentar do país. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020), a produção brasileira de frutas alcançou a marca de 47,5 milhões de toneladas, com destaque para culturas como banana, laranja, melancia, uva e maçã. É imprescindível ressaltar que essa produção é vital para a economia do país, sendo que cerca de 60% dela é destinada ao mercado interno, abastecendo a população brasileira, enquanto o restante é exportado, gerando divisas para o país (IBGE, 2020). É evidente, portanto, a relevância do setor frutícola para o desenvolvimento sustentável do Brasil.

Em contrapartida, uma quantidade significativa de alimentos de origem vegetal é desperdiçada, o que dificulta o acesso ao consumo de frutas e vegetais (ESPARZA *et al.*, 2020; OSORIO, LOPEZ e TOVAR 2021). Quanto às frutas, o maior problema ocorre,

principalmente, devido ao alto grau de perecibilidade, que pode ser avaliada a 10% apenas na fase da colheita. Nos processos de transporte e industrialização pode chegar até 50%, proporcionando no final uma perda de até 25% da produção total (ELIK *et al.*, 2019; AMORIM, 2016).

Os setores agroindustriais e de alimentos são responsáveis pela produção de grandes volumes de resíduos, tanto líquidos quanto sólidos, o que tem gerado preocupações significativas em relação aos potenciais riscos de poluição e à dificuldade no descarte adequado desses materiais nas cidades (ABDEL-SHAFY e MANSOUR, 2018). No entanto, observa-se uma crescente adoção de abordagens que visam minimizar, recuperar, aproveitar e realizar a bioconversão desses resíduos no contexto agroindustrial (RAVINDRAN *et al.*, 2018; MADEIRA JR *et al.*, 2017).

Segundo dados da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), aproximadamente um terço dos alimentos que poderiam ser destinados ao consumo humano acabam sendo desperdiçados, seja na fase de produção ou na forma de resíduos. Estima-se que anualmente mais de 1 bilhão de toneladas de resíduos agroindustriais são gerados. Esses números evidenciam a importância de se adotar medidas para reduzir o desperdício de alimentos, visando a segurança alimentar e a sustentabilidade ambiental. De acordo com Agilah *et al.* (2023), é de extrema importância discutir o impacto ambiental decorrente das atividades agroindustriais, uma vez que a produção e o processamento em grande escala dessas indústrias podem agravar os problemas ambientais.

O conceito de aproveitamento de resíduos encontra-se muito presente no cenário brasileiro atual, cujo objetivo é minimizar os impactos ambientais oriundos do descarte incorreto dessas substâncias no ambiente (COELHO e LANGE, 2018; DE CAMPOS *et al.*, 2021). Além disso, esses resíduos podem transformar-se em matérias-primas interessantes para a fabricação de outros produtos (CLAUSER *et al.*, 2021; FREITAS *et al.*, 2021; AWASTHI *et al.*, 2020). Esses ideais estimulam a chamada biotecnologia sustentável que, por sua vez, impulsionam o desperdício zero, além de colaborarem expressivamente para a economia, pois, estrategicamente, induzem a utilização desses resíduos para produção de itens de alto valor (DOS SANTOS *et al.*, 2019; ROSA *et al.*, 2020; RAVINDRAN *et al.*, 2018).

Gómez-García *et al.* (2021) citam como benefícios do aproveitamento de resíduos agroindustriais os seguintes itens: diminuição do desperdício, desenvolvimento de subprodutos, agregação do valor perdido de um produto, sustentabilidade, entre outros. Além do mais, percebe-se que inúmeras indústrias passaram a dar mais atenção à agregação

de valor que o aproveitamento de resíduos fornece aos produtos (CAMPOS *et al.*, 2020; SINDHU *et al.*, 2019; OSORIO, LOPEZ e TOVAR 2021). Utiliza-se como exemplo, as indústrias sucroalcooleiras que utilizam o bagaço da produção de etanol para fornecimento de energia nos fornos industriais das usinas (CARVALHO *et al.*, 2019; FORMANN *et al.*, 2020).

3.1.1 Aproveitamento de resíduos de frutos do Cerrado e Caatinga

O bioma Cerrado é reconhecido devido a sua flora bem diversificada, que abrange desde os campos às florestas bem densas. É o segundo maior bioma brasileiro e a sua flora representa cerca de 30% das riquezas naturais do país. A sua extensão ocupa pouco mais de 20% do território nacional e apresenta clima quente, semiúmido e sazonal. Um fator muito característico do bioma está relacionado à grande diversidade de formas, cores, aromas e sabores, além dos frutos marcantes (FILARDI *et al.*, 2018; ROCHA *et al.*, 2011).

A Caatinga, um bioma brasileiro, ocupa cerca de 11% do território nacional, abrangendo os estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Piauí, Sergipe e a porção norte de Minas Gerais. Este bioma, caracterizado por sua rica biodiversidade, oferece um notável potencial para a preservação de serviços ambientais, práticas de uso sustentável e oportunidades de bioprospecção. Se adequadamente explorado, esse potencial pode ser um fator decisivo para o desenvolvimento da região e do país (XAVIER *et al.*, 2022; MMA, 2020).

De Castro *et al.* (2023) e Xavier *et al.* (2022) destacam as possibilidades de utilização de resíduos dos biomas Cerrado e Caatinga, pois as plantas nativas apresentam grande potencial dentro do cenário socioeconômico e podem ser utilizadas como matéria-prima para obtenção de bioprodutos de valor agregado.

Existem muitos estudos relacionados ao aproveitamento dos resíduos e/ou subprodutos que relatam redução do desperdício dos alimentos e, por conseguinte, economia nos gastos com alimentação, bem como aprimoramento de novas tecnologias relacionadas. Esse aproveitamento é de suma importância pois aplica sustentabilidade ao processo, reduz a produção de lixo, além do potencial de gerar renda extra. Esses resíduos podem ser utilizados, por exemplo, na fabricação de farinhas, biscoitos, óleos, bolos, entre outros (VIANA *et al.*, 2023; XAVIER *et al.*, 2022; DAMIANI *et al.*, 2013).

Dentre os frutos com grandes potenciais e que despertam interesse em produtores e consumidores está a mangaba (*Hancornia speciosa*). O fruto possui muitas características

que atraem o seu consumo, como alto valor nutricional e substâncias bioativas (VASCONCELOS *et al.*, 2021). Lima *et al.* (2022) destacaram os compostos fenólicos e a atividade antioxidante da casca de mangaba, um subproduto que geralmente é descartado na produção de polpa de frutas. Além dos compostos fenólicos, os resultados mostraram que a casca de mangaba é rica em ácido gálico, ácido elágico e quercetina, que possuem atividade antioxidante significativa. A atividade antioxidante foi avaliada por meio dos métodos ABTS (2,2'-Azinobis (3-etilbenzotiazolina-6-sulfonato) e DPPH (1,1-difenil-2-picril-hidrazil), e os resultados indicaram que a casca de mangaba tem potencial para ser utilizada como fonte de antioxidantes naturais.

Ghesti *et al.* (2022) investigaram o potencial da valorização energética das sementes de *Caryocar brasiliense* (pequi) por meio de processos termoquímicos, incluindo pirólise, gaseificação e transesterificação, visando à produção de biocarvão, gás de síntese e biodiesel. As sementes de pequi foram submetidas à pirólise em diferentes condições de temperatura (300-700 °C) em atmosfera de nitrogênio, tanto com seus extrativos (PS) quanto sem eles (PSWE), resultando em biocarvão. Em seguida, as sementes sem extrativos (PSWE) foram gaseificadas sob diferentes atmosferas, incluindo O₂/N₂, O₂/CO₂/N₂ e O₂/H₂O/N₂, para avaliar as características do gás de síntese gerado. Os extrativos das sementes de pequi foram transesterificados e caracterizados para a produção de biodiesel. Uma análise de decisão com múltiplos critérios foi realizada para avaliar o potencial dos produtos obtidos nas rotas termoquímicas. Os resultados demonstraram que a pirólise das sementes de pequi sem extrativos (PSWE) resultou em biocarvão de maior qualidade, com aumento no poder calorífico e rendimento, tornando-o adequado para aplicações como biocombustível e melhoramento do solo. A gaseificação sob atmosfera O₂/H₂O/N₂ apresentou-se promissora como biocombustível, com alto poder calorífico e eficiência. Além disso, a transesterificação dos extrativos mostrou potencial para ser usado como matéria-prima na geração de energia in situ ou na produção de biodiesel. Esses resultados fornecem informações valiosas sobre a economia circular em comunidades agroextrativistas e podem atender às necessidades energéticas de pequenas e médias indústrias agroalimentares no Brasil.

Santos *et al.* (2021) conduziram uma avaliação abrangente do potencial energético das sementes de buriti (*Mauritia flexuosa* L. f.) e inajá (*Attalea maripa* Aubl. Mart.) em relação à pirólise, com foco especial no buriti. O buriti é uma palmeira comum nas regiões tropicais da América do Sul, incluindo a Amazônia. As sementes de buriti são uma fonte significativa de biomassa e, portanto, oferecem uma oportunidade valiosa para

aproveitamento sustentável de recursos naturais e produção de energia. As sementes de buriti foram submetidas a análises termogravimétricas em uma ampla faixa de temperaturas e diferentes taxas de aquecimento. Os resultados mostraram que as sementes de buriti possuem um alto teor de materiais orgânicos, com poder calorífico superior comparável ao de biomassas lignocelulósicas. Isso indica que o buriti é uma fonte promissora de biomassa para produção de energia por meio da pirólise. Além disso, foram empregados métodos isoconversionais para determinar os parâmetros cinéticos e termodinâmicos da pirólise das sementes de buriti. Essas análises detalhadas forneceram informações cruciais sobre o processo de pirólise e o comportamento das sementes de buriti sob diferentes condições de aquecimento. Outro aspecto importante deste estudo é o desenvolvimento de um catalisador de carbono sulfonado a partir do resíduo da casca do caroço de murumuru, que foi utilizado para otimizar a produção de biodiesel. Esse enfoque no aproveitamento de resíduos agroindustriais para a produção de catalisadores sustentáveis e eficientes destaca a importância da economia circular e da utilização de recursos renováveis na indústria de biocombustíveis.

No estudo, conduzido por Rios *et al.* (2023), investigou-se a influência da modificação superficial do carvão ativado granular, obtido a partir da macaúba, na capacidade de sorção de metais pesados em soluções aquosas. O carvão ativado granular derivado da macaúba foi escolhido devido ao seu potencial como uma alternativa de baixo custo para tratar poluentes de metais pesados na água. Diferentemente do carvão ativado em pó, o carvão granular facilita todas as etapas de uso, recuperação e reaproveitamento. Os materiais foram submetidos a modificações na superfície, e técnicas de análise revelaram a funcionalização dessa superfície. Os resultados mostraram que esses materiais apresentaram uma capacidade notável de adsorção de íons de Zn, Cd e Pb em comparação com outros estudos na literatura. Além disso, destacou-se a capacidade de reaproveitamento, com remoção eficiente dos metais pesados após múltiplos ciclos de uso. Em resumo, a pesquisa enfatiza a viabilidade do carvão ativado granular derivado da macaúba, após modificações superficiais, como um adsorvente eficaz na remoção de metais pesados em soluções aquosas. Isso representa uma contribuição valiosa para o desenvolvimento de soluções econômicas e sustentáveis no tratamento de poluentes de metais pesados.

No estudo conduzido por Mazza *et al.* (2022), os autores tiveram como objetivo central avaliar os efeitos da inclusão dietética de resíduo seco de polpa de umbu (DUFRR) na dieta de cordeiros. Este resíduo foi utilizado como substituto do milho moído em

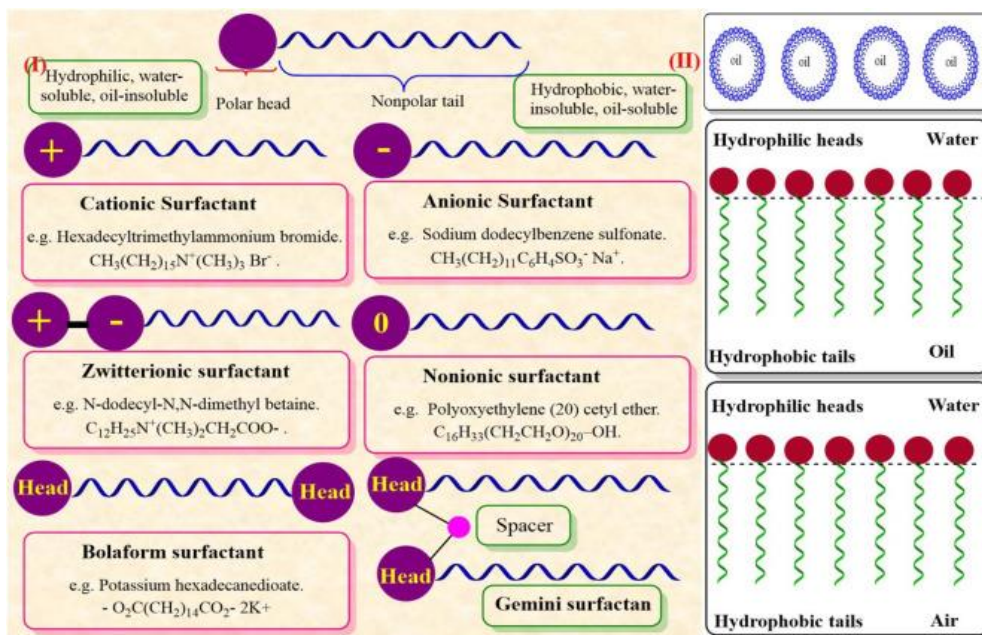
diferentes proporções na dieta, variando de 0% a 32%. A pesquisa se desdobrou ao longo de 21 dias e contou com a participação de vinte e cinco cordeiros machos não castrados, cujo peso médio era de $40,8 \pm 4,17$ kg. Os resultados do estudo apontaram para mudanças significativas no comportamento ingestivo e nas características digestivas dos cordeiros à medida que a quantidade de DUFR na dieta aumentava. Notou-se um aumento linear no tempo despendido em alimentação e ruminação, juntamente com um aumento no número de bolos mastigados por dia. O pH ruminal também foi afetado pelo aumento da inclusão de DUFR. Entretanto, a inclusão de DUFR na dieta também trouxe consigo efeitos adversos, tais como a redução da digestibilidade de nutrientes e impactos negativos no balanço de nitrogênio. Estes resultados sugerem que, embora a inclusão de DUFR possa estimular comportamentos alimentares, não é recomendada em altas concentrações como fonte concentrada de alimento, uma vez que isso pode afetar negativamente o desempenho dos animais.

3.2 Surfactantes

Os surfactantes, também denominados tensoativos, são caracterizados como uma substância cuja constituição se dá através de moléculas anfifílicas estruturadas com uma parte apolar e outra polar. O grande objetivo dessas substâncias é a atuação na união entre compostos que não possuem afinidade para modificação das suas propriedades (FARIAS *et al.*, 2021; JOHNSON *et al.*, 2021; MASSARWEH e ABUSHAIKHA, 2020; SHABAN *et al.*, 2019; YEKEEN *et al.*, 2017).

A ação de um detergente de louças, por exemplo, demonstra bem o funcionamento dos surfactantes, em que a limpeza ocorre da seguinte maneira: a parte hidrofóbica da molécula interage com a sujeira e a gordura, e a parte polar com a água, formando assim uma micela esférica. A sujeira fica concentrada no interior e as forças eletrostáticas fazem com que a água seja mantida na parte externa. Desse modo, ao enxaguar a louça, a micela é arrastada acabando com a sujeira (JOHNSON *et al.*, 2021; ATKINS, JONES, 2012). A Figura 1 demonstra, de modo figurativo, estrutura orgânica de um surfactante.

Figura 1. Representações esquemáticas (I) de diversas configurações de surfactantes e (II) das interações interfaciais desses surfactantes em sistemas que envolvem água e ar, água e íons, bem como gotículas de óleo contendo água (lado direito).



Fonte: Verma *et al.* (2022).

Quanto a classificação, os surfactantes podem ser separados em: aniônicos (carga negativa, usados em detergentes); catiônicos: carga positiva (usado como condicionante e lubrificante; não iônicos: carga neutra (muito usado como emulsionante); e anfotérico (depende do pH) (JOHNSON *et al.*, 2021; REBELLO *et al.*, 2014; PAN *et al.*, 2020).

Nos surfactantes aniônicos a interação com a água ocorre com uma parte da molécula que possui carga negativa. Estes, por sua vez, formam a maior classe e encontram-se entre os mais utilizados pelas empresas, pois devido as suas características, são utilizados em detergentes, sabões, sabonetes (PAN *et al.*, 2020; DALTIM, 2011).

Por sua vez, os surfactantes catiônicos possuem um radical com carga positiva, sendo assim, a interação com a água ocorre com uma parte da molécula de caráter positivo (KACZEREWKA *et al.*, 2020; MITRU *et al.*, 2020).

Os surfactantes não iônicos são aqueles que não possuem radicais com cargas elétricas e sua interação com a água se dá através de ligações de hidrogênio. Esse tipo de tensoativo apresenta elevada resistência a eletrólitos e águas duras, além de poder ser utilizado tanto em meio ácido quanto alcalino (NOROUZPOUR *et al.*, 2023; CHOWDHURY *et al.*, 2019).

A Tabela 1 apresenta, de forma resumida, as principais características dos tensoativos conforme as propriedades relacionadas.

Tabela 1 - Principais propriedades dos tensoativos.

PROPRIEDADE	DESCRIÇÃO
Formação de Micelas	É verificada no momento da saturação do surfactante na interface do fluido e pode ser observada a partir da Concentração Micelar Crítica
Concentração Micelar Crítica (CMC)	Com base na mudança súbita da propriedade físico-químicas (como condutividade, tensão interfacial, tensão superficial, pressão osmótica, etc.) do surfactante, indicada através dos gráficos, verifica-se a CMC. Os três fatores que a influenciam são a natureza do surfactante, a sua temperatura e força iônica.
Tensão Superficial e Interfacial	Ao adicionar água ao tensoativo, as suas moléculas tendem a se agrupar, o que diminui a repulsão entre os fluidos. Isso só é possível devido as características hidrofílicas e hidrofóbicas da substância.
Balanco Hidrofílico-Lipofílico (BHL)	A noção semi-empírica do BHL foi introduzida com a intenção de selecionar o melhor surfactante para formulação de uma emulsão. Os valores variam de 1 a 18, aumentando à medida que a substância se torna mais hidrófila.

Fonte: Adaptado – Santos e Oliveira (2018).

Os surfactantes anfóteros possuem na mesma molécula grupos hidrófilos positivo e negativo. Devido ao alto custo destes, são os menos utilizados pelas indústrias, mas ainda assim são aplicados na produção de cosméticos e xampus (SARKAR *et al.*, 2021; CHOWDHURY *et al.*, 2019).

As micelas são estruturas constituídas por agregados moleculares que, por sua vez, são compostas por duas regiões, sendo uma hidrofílica e outra hidrofóbica. A extremidade apolar é hidrófoba e a polar é hidrófila, ou seja, a parte apolar interage com a gordura enquanto a parte polar reage com a água, e então as micelas, que são mini partículas, são formadas. As micelas atuam no processo de solubilização de gorduras e os surfactantes se encontram na forma de monômero antes da CMC. Quando agregados moleculares de grandes dimensões são formados, dá-se o nome de Concentração Micelar Crítica (CMC) (FENG *et al.*, 2020; QI e ZHOU, 2019).

A determinação da CMC é de extrema importância para qualquer situação relacionada aos surfactantes, pois o efeito dessas substâncias é proporcional à quantidade de micelas presentes. A formação das micelas não é estática e a concentração em que ocorre a Concentração Crítica Micelar, numa dada temperatura, é uma característica de cada surfactante. A CMC pode ser verificada por experimentos a partir da descontinuidade no comportamento de algumas propriedades físico-químicas da solução em função da

concentração do surfactante (PERINELLI *et al.*, 2020; MAJEED, SOLING e KAMAL, 2020).

No geral, as principais aplicações dos surfactantes são na preparação de emulsões e a detergência. Contudo, essas duas características dessas substâncias induzem também a formação de espumas (MAJEED, SOLING e KAMAL, 2020; DALVIN, 2011). As emulsões, definidas como a dispersão de uma fase líquida imiscível em uma segunda fase líquida hospedeira, encontram aplicação em diversos setores, abrangendo desde a indústria petrolífera até a produção de tintas, produtos cosméticos, fármacos e alimentos (HAGAR *et al.*, 2023; NG *et al.*, 2023; NG *et al.*, 2022; SANKARAN *et al.*, 2012).

Entretanto, devido à sua intrínseca instabilidade, surge a necessidade de um agente estabilizador para prevenir a separação entre as fases aquosa e oleosa durante o armazenamento. Essa separação é, muitas vezes, ocasionada pela coalescência das gotículas de óleo, daí a importância do estabilizador, o qual forma uma camada protetora na interface óleo/água. Essa camada estabelece uma barreira energética capaz de resistir à aglomeração das gotículas e à coalescência (HAGAR *et al.*, 2023; KUMAR e FOROOZESH, 2021).

Esse papel é tradicionalmente desempenhado por surfactantes sintéticos, conhecidos por induzir diversos efeitos, tais como a redução da tensão superficial para facilitar o processo de emulsificação, a criação de uma barreira eletrostática ou estérica para contrabalançar as forças atrativas, e o aumento da elasticidade dilatacional da interface óleo/água (HAGAR *et al.*, 2023; GEORGIEVA *et al.*, 2009). Alternativamente, partículas sólidas possuem a capacidade de adsorver na interface entre óleo e água, conferindo estabilidade através do fenômeno conhecido como efeito Pickering. Esse tipo de emulsão apresenta vantagens notáveis ao mitigar algumas das fraquezas associadas aos surfactantes sintéticos, como a sensibilidade à água, irritação cutânea em produtos cosméticos, efeitos ópticos em revestimentos, toxicidade para ecossistemas aquáticos e questões de biocompatibilidade em aplicações médicas (HAGAR *et al.*, 2023; DICKINSON, 2009).

A formação de espuma está intrinsecamente relacionada à estrutura do surfactante, em particular, à presença de uma longa cadeia apolar. O alongamento dessa "cauda de hidrocarboneto" resulta em uma espuma de maior volume e maior estabilidade (LEE *et al.*, 2019). A avaliação da capacidade de um surfactante em gerar espuma frequentemente se baseia na sua habilidade de formação de espuma (FC) sob diferentes condições (WANG *et al.*, 2016; WANG e CHEN, 2013). Por outro lado, a estabilidade da espuma (FS) está diretamente relacionada à longevidade e à resistência da espuma, sendo influenciada pelas

propriedades da película líquida que a compõe. É relevante destacar que a viscosidade da película líquida desempenha um papel fundamental na determinação da estabilidade da espuma, sendo que maior viscosidade contribui para maior robustez e durabilidade (WANG *et al.*, 2017).

Múltiplos aspectos, como o movimento browniano, a CMC e a viscosidade, apresentam uma notável sensibilidade à temperatura. Especificamente, a viscosidade da película líquida inicialmente aumenta com o aumento da temperatura da fase líquida, para posteriormente declinar. Portanto, a temperatura na qual ocorre a formação da espuma desempenha um papel crucial na determinação tanto da capacidade de formação de espuma (FC) quanto da estabilidade da espuma (FS). A geração de espuma está intrinsecamente vinculada à estrutura do surfactante, mais precisamente à presença de uma extensa cadeia apolar. O alongamento dessa "cauda de hidrocarboneto" resulta em uma espuma de maior volume e notável estabilidade (WANG *et al.*, 2017).

Quanto aos impactos, há uma certa preocupação quanto ao descarte dos surfactantes, pois podem afetar o meio ambiente. Como a grande maioria tem origem sintética derivados do petróleo, o descarte ocorre muitas vezes na água. Sendo assim, o excesso dessa substância na natureza pode acarretar sérios danos, inclusive toxicidade aos mamíferos e bactérias (JOHNSON *et al.*, 2021; YING, 2006).

Pal *et al.* (2018) destacaram os desafios e perspectivas futuras para técnicas de recuperação avançada de petróleo baseadas em surfactantes e, para tanto, foram apresentados diversos mecanismos, como alteração de molhabilidade, tensão interfacial, redução, comportamento da fase de microemulsão, entre outros. Para obtenção dos resultados, os autores utilizaram experimentos de laboratório, bem como estudo de campo e dados obtidos usando vários surfactantes. Como conclusão, eles finalizaram ressaltando a importância do estudo para que pesquisadores e profissionais da área compreendam a situação atual e planejem futuros empreendimentos de acordo com o apresentado.

Yang, Zhao e Lai (2023) exploraram a síntese e as propriedades dos "pontos quânticos de carbono" (CDs) anfífilos, destacando sua importância como nanomateriais. Os CDs anfífilos foram sintetizados de forma eficiente, com C12-CDs e C12-SCDs sendo os principais focos. A caracterização abrangente desses materiais revelou que os C12-CDs apresentam maior atividade superficial em comparação com surfactantes convencionais, como lauril glucosídeo APG12 e dodecilbenzenossulfonato de sódio (SDBS). Os C12-CDs foram encontrados formando micelas de aproximadamente 100 nm de diâmetro em solução. As curvas de tensão superficial evidenciaram o impacto do pH, temperatura e sais

inorgânicos nas propriedades superficiais dos CDs. Os C12-SCDs, com grupos sulfonato adicionados, mostraram uma notável resistência a cloreto de sódio “NaCl” e cloreto de cálcio “CaCl₂”. Além disso, os CDs anfífilicos demonstraram uma eficiência superior na remoção de películas de óleo e uma notável alternância de molhabilidade em comparação com surfactantes tradicionais, graças aos seus grupos funcionais variados. As emulsões Pickering estabilizadas por C12-SCDs revelaram um desempenho reversível em resposta ao pH e dióxido de carbono (CO₂), sugerindo potenciais aplicações em sistemas sensíveis ao pH e dióxido de carbono (CO₂). Quando se tratou da dispersão de nanotubos de carbono, os CDs superaram surfactantes tradicionais. Sua capacidade de dispersão foi atribuída ao efeito hidrofóbico e ao empilhamento π - π . Os C12-SCDs, em particular, com grupos sulfonato, exibiram um desempenho ainda melhor devido à resistência estérica e à repulsão eletrostática.

3.2.1 Surfactantes Naturais

Os surfactantes naturais são obtidos diretamente de fontes naturais sem sínteses orgânicas, aonde o produto vem de algum processo de separação (FARIAS *et al.*, 2021; PRADHAN e BHATTACHARYYA, 2017; HOLMBERG, 2001). Diante disso, verifica-se uma certa dificuldade quanto a essa substância devido a sua escassez, que não se resume à falta de produtos, mas sim pelo custo elevado de produção. O aprimoramento de processos fermentativos com rendimentos adequados seria uma alternativa para reverter a situação desfavorável relacionada a esse custo. De forma mais ampla, seria possível considerar também os surfactantes cujas matérias-primas têm origem natural (BANAT *et al.*, 2021; BRUMANO, SOLER e DA SILVA 2016).

Com a crescente preocupação com o estado do meio ambiente e as novas regulamentações, tem havido um aumento gradual na busca por produtos menos prejudiciais ao meio ambiente e mais naturais. Essa tendência também se reflete no uso de surfactantes, uma vez que a demanda por tensoativos naturais está em ascensão. No entanto, a principal dificuldade está relacionada ao fato de que a maioria dos surfactantes ainda é derivada do petróleo (DIAS e NITSCHKE, 2023; NITSCHKE e PASTORE, 2002). Existem diversos compostos com propriedades surfactantes que são produzidos por organismos vivos, sendo os biossurfactantes um dos principais da classe (BRAZ *et al.*, 2023; BEZERRA *et al.*, 2018)

Nitschke e Pastore (2002) e Nagtode *et al.* (2023) listam os principais grupos de tensoativos de origem natural utilizados comercialmente: Alquil poliglicosídeos; Biotensoativos; Amidas de ácidos graxos; Aminas de ácidos graxos; Glucamidas; Lecitinas; Derivados de proteínas; Saponinas; Sorbitol e ésteres de sorbitan; Ésteres de sacarose; Sulfatos de álcoois graxos naturais.

Norouzpour *et al.* (2023) destacaram o uso de um surfactante natural derivado da planta de beterraba vermelha (RB) para aplicações de recuperação avançada de petróleo (EOR) em reservatórios carbonáticos. A saponina extraída da RB foi caracterizada por meio de análises de TGA, FT-IR, ¹H NMR e FESEM, e revelou ser um surfactante não iônico. A CMC do surfactante RB foi de 2.500 ppm, e a tensão interfacial medida (IFT) no ponto CMC foi de 9,92 mN/m para água deionizada. O estudo de inundação com diferentes concentrações de NaCl, usando o surfactante RB, mostrou aumento significativo na recuperação terciária, com acréscimo de 26,29% no óleo original *in situ* (OOIP). Isso foi atribuído a uma redução considerável no ângulo de contato de 151,4° para 42,14° e uma diminuição nos valores de IFT de 33,87 para 9,27 mN/m. O uso desse surfactante natural, juntamente com a "água inteligente", demonstrou ser uma abordagem ecologicamente correta e eficaz para EOR em reservatórios carbonáticos, proporcionando uma recuperação aprimorada de petróleo de até 80,40%. Essa abordagem é vantajosa por sua sustentabilidade e menor custo em comparação com surfactantes comerciais.

Smulek *et al.* (2023) realizaram um estudo sobre emulsões carregadas de vitaminas em matriz de hidrogel de ágar dispersa com surfactantes vegetais. Neste estudo foi desenvolvido um sistema multifásico que combina um gel à base de ágar com emulsões contendo vitaminas A e E. Saponinas de *Sapindus mukorossi* foram usadas como emulsificantes para essas vitaminas. O foco da pesquisa incluiu a avaliação da estabilidade dos sistemas multifásicos, a cinética de liberação e a eficiência das vitaminas. Essa pesquisa inovadora buscou aplicar saponinas na formulação de produtos alimentares e suplementos. O estudo demonstrou que as saponinas de *Sapindus mukorossi* são eficazes emulsificantes para as vitaminas A e E em água, permitindo a criação de emulsões estáveis com gotículas muito pequenas. Essas emulsões serviram como base para a produção de hidrogéis de ágar. A presença das vitaminas e do surfactante não teve impacto significativo nas propriedades dos hidrogéis, incluindo sua cor. Os testes realizados, como LF-RMN e microscopia, confirmaram o sucesso na preparação de sistemas multifásicos. Este estudo representa um avanço na criação de novos sistemas para a entrega controlada de agentes ativos. Além disso, a adição das vitaminas não afetou substancialmente as propriedades

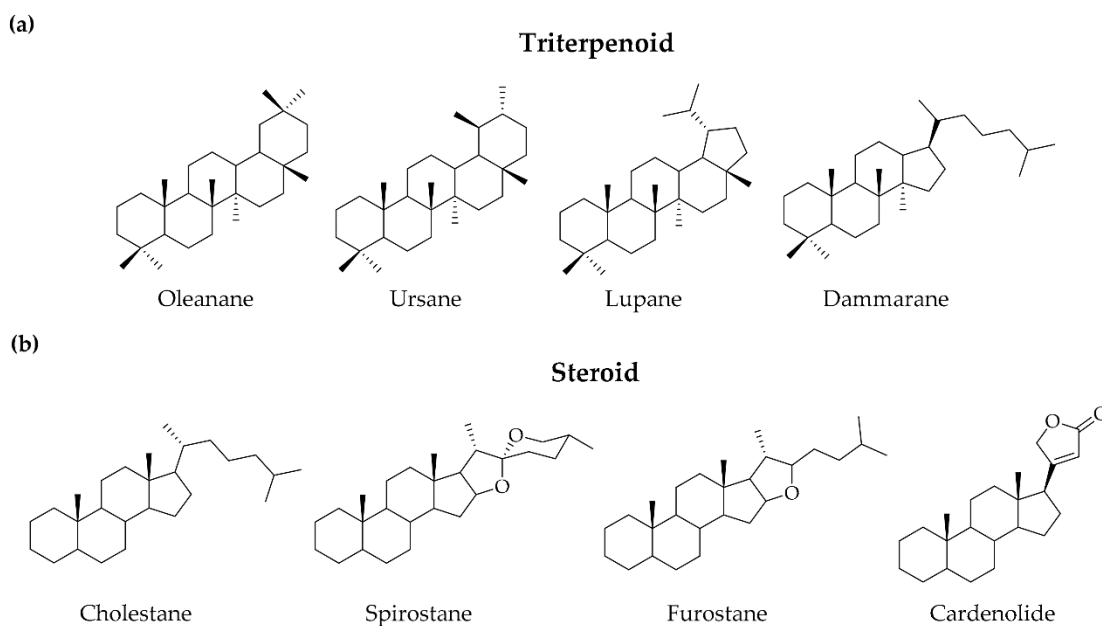
mecânicas dos hidrogéis, enquanto a concentração de ágar teve impacto mais significativo. Em particular, os hidrogéis mais estáveis continham 24 mg/mL de ágar. Em resumo, o estudo alcançou com sucesso seu objetivo, mostrando que os hidrogéis de ágar, formados a partir de emulsões de vitaminas A e E estabilizadas por saponinas, têm propriedades físico-químicas que os tornam promissores para aplicações em medicina e cosmetologia

3.3 Saponinas

As saponinas compõem um grupo de glicosídeos de terpenos policíclicos ou esteróides presentes em plantas, cuja principal característica é a formação de espuma quando agitadas em soluções aquosas. Seu sabor atípico amargo justifica sua ampla ocorrência no reino vegetal e, por sua vez, a proteção destas contra o meio. Diante disso, foram consideradas por muito tempo como ingredientes indesejáveis pelo sabor e pelos efeitos prejudiciais ao sistema gastrointestinal caso consumida em grandes quantidades. São também caracterizadas como fitoquímicos naturais, e ocorrem em entre três e quatro espécies de plantas (CHIGWEDERE, WANASUNDARA e SHAND, 2022; DAWID e HOFMAN, 2012).

Em relação à estrutura, as saponinas podem ser classificadas em triterpênicas, apresentando um núcleo composto por cinco anéis e 30 átomos de carbono, e esteroidais, cuja aglicona é constituída por 27 carbonos. Quanto à porção glicosídica, as saponinas são classificadas como monodesmosídicas, quando a aglicona é substituída por um açúcar ou uma única cadeia de açúcares, ou bidesmosídicas, quando possuem dois açúcares ou duas cadeias de açúcares ligadas à aglicona (YANG, LAVAL e YU, 2021; EL AZIZ, ASHOUR e MELAD, 2019; CHEIKH-ALI *et al.*, 2019; VINCKEN *et al.*, 2007). Na Figura 2 são apresentadas estruturas de saponinas esteroidais e triterpênicas.

Figura 2. Estrutura representativa de saponinas triterpênicas (a) e esteroidais (b).



Fonte: Juang e Liang (2020).

Sua estrutura química complexa composta por um núcleo lipofílico (esteróide ou triterpeno) e uma porção hidrofílica (formada por uma ou mais cadeias laterais de açúcares) (LIAO *et al.*, 2021; FARIAS *et al.*, 2021) confere o caráter anfifílico às moléculas.

As saponinas são ingredientes interfaciais ativos em plantas em que a formação é composta por uma estrutura hidrofóbica de aglicona com resíduos hidrofílicos de açúcar. Podem ocorrer determinadas variações na estrutura da aglicona, bem como no tipo e quantidade de resíduos de açúcar conforme a origem botânica. As saponinas são uma classe heterogênea e ampla de substâncias naturais e, portanto, a relação entre estrutura molecular e propriedades interfaciais é complexa e, ainda, não completamente compreendida (XU, WAN e YANG, 2021; SÁNCHEZ e PATINO, 2021; BÖTTCHER, DRUSCH, 2017).

As saponinas são compostos altamente solúveis em água e, quando dissolvidas, os resíduos hidrofílicos de açúcar são amplamente hidratados. Além disso, devido às suas propriedades surfactantes, ou seja, sua capacidade de reduzir a tensão superficial, são amplamente utilizadas na indústria cosmética para a produção de batons e xampus, bem como na indústria alimentícia como flavorizante e agente espumante (RAI *et al.*, 2021; SCHREINER *et al.*, 2021). As espécies vegetais mais utilizadas comercialmente na extração desses compostos são *Yucca schidigera* e *Quillaja saponaria* (DE SOUZA *et al.*, 2019).

Estudos têm demonstrado a atividade imunomodulatória das saponinas como adjuvantes em vacinas. A descoberta dessa propriedade ocorreu na década de 1920, e a primeira utilização como adjuvante em vacinas ocorreu em 1951 (SHARMA *et al.*, 2020; SONG e HU, 2009). Desde então, muitas pesquisas têm sido realizadas com base na utilização da saponina como adjuvante em vacinas de uso veterinário, sendo a espécie *Q. saponaria* a mais utilizada e de maior destaque (CHEN *et al.*, 2023; DE PAULA, 2014).

As espécies de saponinas de maior utilização são *Quillaja* e seus derivados QS-21, isolados da casca de *Quillaja saponaria* Molina. Estas possuem grande potencial de estimulação do sistema imune e, diante disso, são de grande importância no uso para produção de alguns tipos de vacina, pois melhoram a eficácia das mesmas e facilitam a absorção intestinal de grandes moléculas. Porém, um aspecto negativo que pode ser relatado é a grande toxicidade das saponinas *Quillaja* e hemolítico indesejável (TUCKER *et al.*, 2022; SCHREINER *et al.*, 2021; GUERRA e SEPÚLVEDA, 2020; FLECK *et al.*, 2019).

A espécie *Quillaja* saponária tem sido estudada para o desenvolvimento de atividades hipercolesterêmicas, bem como para estimular a absorção de antibióticos e peptídeos através das vias nasal e ocular outro dado interessante é que foi detectada a existência de saponinas em folhas de *Quillaja brasiliensis*, a qual destaca-se a importância de ser uma fonte renovável, pois não é necessário derrubar as árvores para obter o produto. No entanto, o que dificulta a ampliação do uso dessa substância para escala industrial é o tempo para sua obtenção, pois a retirada ocorre em espécies com idade superior a 30 anos (DEL HIERRO *et al.*, 2021; FLECK *et al.*, 2019).

Espumas são dispersões de gases, geralmente constituídas por células de ar em uma fase contínua, frequentemente líquida. Em produtos como cerveja, mousse de chocolate, tiramisu, preparações de café com espuma de leite, merengue, bolos e pão, as espumas desempenham papéis essenciais em termos de textura e estrutura (HU e MENG, 2023; ZHAN *et al.*, 2022; FAMEAU e BRINKS, 2021; DAMODARAN, 2005; FOEGEDING e DAVIS, 2011).

A produção de espuma demanda gasto de energia, uma vez que ampliar interfaces ar-água é um processo termodinamicamente instável, sendo as interações entre as moléculas de água consideravelmente mais favorecidas em comparação com as interações entre as moléculas de água e ar (HU e MENG, 2023; CAO *et al.*, 2023).

Nesse contexto, é importante destacar que a adição de um surfactante desempenha um papel significativo nesse processo, pois reduz a tensão interfacial, facilitando assim a

formação de espuma. Vale ressaltar que a própria estrutura do surfactante, com uma parte apolar (aglicona) e outra polar (glicona), contribui para essa capacidade, estabelecendo uma conexão direta com a necessidade de superar as barreiras energéticas inerentes ao processo de formação de espuma (FARIAS *et al.*, 2021; JOHNSON *et al.*, 2021).

A produção de espuma por saponinas está diretamente relacionada à combinação de uma sapogenina lipossolúvel (hidrofóbica) com componentes de açúcares solúveis em água (hidrofílico), conforme observado por Bezerra *et al.* (2018). Essas sapogeninas podem ser categorizadas em diosgenina e hecogenina, ambas consideradas componentes bioativos com valor farmacêutico significativo, como destacado por Gitanjai *et al.* (2023).

Estudos têm investigado as propriedades emulsificantes das saponinas, surfactantes naturais encontrados em diversas fontes vegetais. Esses compostos, devido à sua estrutura anfipática, são capazes de reduzir a tensão superficial entre fases imiscíveis, como óleo e água, facilitando a formação e estabilização de emulsões (HONG *et al.*, 2023 (CAI *et al.*, 2023; LIU *et al.*, 2023).

As emulsões óleo em água são a base de diversos produtos de grande relevância comercial na indústria alimentícia, abrangendo bebidas, cremes, sobremesas, molhos, temperos e sopas (MCCLEMENTS, 2004). Essas dispersões coloidais compreendem minúsculas gotículas de óleo dispersas em um meio aquoso. Emulsões são sistemas instáveis do ponto de vista termodinâmico e se desestabilizam com o tempo por meio de mecanismos como cremação, floculação, coalescência e amadurecimento de Ostwald, culminando na separação de fases (LI *et al.*, 2016).

Os emulsificantes desempenham uma função crucial ao facilitar a formação e manutenção de emulsões, que consistem em sistemas nos quais duas fases, como água e óleo, são uniformemente misturadas. Esses agentes surfactantes desempenham a função de reduzir a tensão superficial entre as fases, viabilizando a criação de pequenas gotículas dispersas e impedindo a fusão destas (MCCLEMENTS, BAI e CHUNG, 2017; RAVERA *et al.*, 2021; OZTURK e MCCLEMENTS, 2016).

A atividade antimicrobiana das saponinas de diversas fontes foi relatada na literatura (SANTANA *et al.*, 2021, FLECK *et al.*, 2019, SEN *et al.*, 1998). Esses surfactantes naturais apresentam efeito sinérgico notável quando combinados com antibióticos sintéticos, incluindo tetraciclina, eritromicina e ciproflaxina, anteriormente considerados ineficazes devido à resistência desenvolvida por alguns patógenos (SEM *et al.*, 1998; WEI *et al.*, 2021).

Fleck *et al.* (2019) afirmam que a ação antimicrobiana das saponinas resulta de suas propriedades detergentes, as quais conduzem à degradação dos lipídios da membrana celular bacterianas, tornando-as permeáveis. Esse processo facilita consideravelmente a passagem de moléculas através da parede bacteriana, incluindo agentes antibióticos. A importância desse mecanismo de ação torna-se evidente no contexto da busca por alternativas antimicrobianas, uma vez que a capacidade das saponinas de alterar a integridade da membrana bacteriana contribui significativamente para a eficácia no controle de infecções (Khan *et al.*, 2018).

A metodologia de difusão em ágar é amplamente empregada na avaliação da atividade antimicrobiana de extratos. A técnica consiste em impregnar discos de papel estéreis com os extratos e colocá-los sobre o meio inoculado com microrganismos em uma placa de Petri. Após incubação da placa, observa-se a formação de uma zona de inibição ao redor dos discos, a qual indica a capacidade do extrato em inibir o crescimento bacteriano ou fúngico. Essa técnica é valiosa na triagem de extratos naturais em busca de agentes antimicrobianos, contribuindo para a identificação de compostos bioativos em um contexto de crescente preocupação com resistência bacteriana (CLSI, 2015).

Dong *et al.* (2020) examinaram saponinas em bactérias de origem alimentar e observaram a degradação da parede celular, juntamente com a ruptura da membrana citoplasmática e das proteínas de membrana, resultando no vazamento do conteúdo celular. Além disso, Zaynab *et al.* (2021) destacaram que as saponinas são altamente eficazes contra bactérias Gram-positivo e demonstram uma eficácia moderada contra bactérias Gram-negativo.

Em seu estudo, Böttcher e Drusch (2017) fizeram uma revisão sobre como a estrutura da saponina afeta as propriedades interfaciais através de determinados conhecimentos recentes sobre características estruturais. Os autores inferiram que a configuração interfacial pode diferir dependendo da origem botânica e, portanto, da estrutura das saponinas. A formação de fortes filmes interfaciais visco elásticos por algumas saponinas foi atribuída a ligações de hidrogênio entre os resíduos de açúcar vizinhos. Poucos estudos analisaram a relação entre plantas origem e reologia interfacial. Foi demonstrado ainda que as saponinas de *Quillaja* podem formar micelas carregadas com substâncias hidrofóbicas, nanoemulsões e espumas estáveis. A combinação de proteínas não só resultou em um aumento no filme interfacial e na observação de maior estabilidade, mas também pode desencadear fenômenos adversos, como a agregação de gotículas de óleo em emulsões.

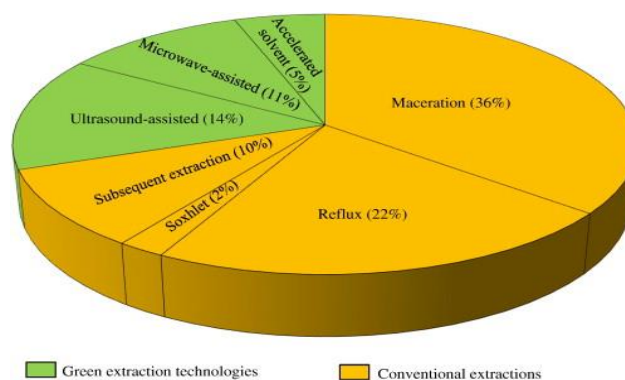
El Aziz, Ashour e Melad (2019) relataram que a saponina das plantas medicinais é uma molécula bioorgânica de ocorrência natural com alto peso molecular. A complexidade química da saponina pode ser considerada, em muitos casos, como uma barreira para muitos cientistas e pesquisadores entenderem a relação entre a estrutura química e seu comportamento médico ou farmacêutico. Contudo, com a crescente demanda de aplicações de saponinas, os autores desenvolveram um trabalho de revisão demonstrando informações detalhadas sobre a química da saponina, principalmente a saponina triterpenóide. Os resultados apresentaram as classificações, estrutura química, as possíveis formas tradicionais de isolamento, qualitativas, e determinação quantitativa de saponinas, as diferenças estruturais entre os glicosídeos triterpenóides, esteróides e alcaloides.

3.4.1 Métodos de extração de saponinas

A extração das saponinas pode ser dividida em duas categorias: os métodos tradicionais e as tecnologias sustentáveis. Entre os métodos convencionais, encontram-se o Soxhlet, a extração por refluxo térmico e a maceração. Por outro lado, as tecnologias sustentáveis abrangem a extração assistida por micro-ondas, a extração assistida por ultrassom e a extração acelerada por solvente (VELÁSQUEZ-FLÓREZ e VÉLEZ-SALAZAR, 2020; CHEOK, SALMAN e SULAIMAN, 2014; HENG *et al.*, 2013).

Segundo Velásquez-Flórez e Vélez-Salazar (2020), a extração de saponinas por meio de métodos tradicionais corresponde a aproximadamente 70% das práticas adotadas por pesquisadores. A Figura 3 representa os métodos de extrações mais empregados.

Figura 3. Técnicas atuais de extração empregadas na extração de saponinas de materiais vegetais.



Fonte: Cheok, Salman e Sulaiman, 2014.

A extração convencional tradicionalmente se apoia na capacidade de solubilização do soluto presente nos materiais vegetais por meio de um solvente, com frequente necessidade de consideráveis volumes de solvente para garantir a eficácia da extração do composto desejado. Muitas vezes, esse método envolve o aquecimento e a agitação mecânica em temperaturas elevadas. Em contraste, as técnicas de extração sustentável, também conhecidas como extração verde, promovem abordagens químicas mais seguras e empregam produtos químicos menos prejudiciais. Elas também buscam maior eficiência energética e fazem uso de matérias-primas renováveis, enquanto minimizam o impacto ambiental (AZMIR *et al.*, 2013).

O desenvolvimento de tecnologias de extração sustentável segue esses princípios, que incluem a adoção da água como solvente de extração e o controle preciso das variáveis de pressão e temperatura no processo, como é o caso da extração líquida pressurizada. A técnica de extração por maceração é uma abordagem no processo de extração sólido-líquido em que o material vegetal é submerso em um solvente específico por um período predefinido (TAKEUCHI *et al.*, 2009). A efetividade desse método é predominantemente influenciada por dois fatores fundamentais: a solubilidade e a difusão eficaz. A solubilidade segue a premissa essencial de "substâncias semelhantes dissolvem-se mutuamente", indicando que compostos com características polares se dissolvem em solventes de natureza polar, ao passo que compostos apolares se dissolvem em solventes apolares (REICHARDT e WELTON, 2011).

Não é preciso recorrer a utensílios e equipamentos complexos para estabelecer um sistema de extração por maceração, o que o torna uma opção amplamente adotada por pesquisadores. O único aspecto crucial a ser considerado para otimizar a extração é o entendimento da correspondência entre a afinidade do composto bioativo e a polaridade do solvente (CHEOK, SALMAN e SULAIMAN, 2014).

Cheok, Salman e Sulaiman (2014) conduziram uma revisão abrangente sobre o processo de maceração de saponina vegetal. Os pesquisadores ressaltaram que os solventes mais amplamente utilizados para a extração de saponinas de material vegetal são o etanol e o metanol, com preferência pelo etanol, possivelmente devido a preocupações ambientais. O método de extração por maceração é reconhecido por demandar um período prolongado, por vezes estendendo-se por semanas. Para otimizar essa abordagem, frequentemente, a extração é facilitada por meio de agitadores mecânicos (CHENG *et al.*, 2011; HUHMAN *et al.*, 2005; LEE *et al.*, 2009; SYLWIA *et al.*, 2006) ou agitação magnética (VERZA *et al.*, 2012), buscando reduzir o tempo necessário para a extração.

O método Soxhlet é uma técnica de extração por lixiviação empregada para isolar compostos solúveis de um sólido insolúvel, baseando-se no princípio de movimento ascendente e descendente do solvente. O processo inicia-se com o aquecimento do solvente em um balão de destilação. O vapor resultante sobe pelo condensador, onde se condensa, formando o solvente coletado. Em seguida, desce pelo tubo de descida, entrando em contato com o sólido para dissolver os compostos solúveis presentes. O solvente, agora saturado com os compostos solúveis, retorna ao balão, reiniciando o ciclo, que se repete até que a extração esteja completa. As vantagens do método Soxhlet residem em sua eficácia na extração de compostos solúveis de sólidos não solúveis, aliada à sua relativa simplicidade. No entanto, as desvantagens incluem a possibilidade de o processo ser lento e a necessidade de uma quantidade considerável de solvente. O método Soxhlet encontra aplicação em diversas áreas, como a extração de óleos essenciais, cafeína, flavonoides e vitaminas. Também é utilizado na extração de compostos tóxicos, exigindo precauções de segurança, como a utilização de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs).

Devido à semelhança no princípio de operação entre as extrações Soxhlet e de refluxo, a discussão é conduzida sob o mesmo subtítulo. A única distinção entre o refluxo e o Soxhlet reside no fato de que o aparato Soxhlet inclui um dedal para acomodar o material vegetal. Tanto a extração por refluxo quanto a Soxhlet empregam um processo de destilação amplamente utilizado em laboratórios, bem como nas indústrias alimentícias e não alimentícias. O procedimento implica aquecer uma solução até a ebulição e, em seguida, redirecionar os vapores condensados de volta ao recipiente original (BART, 2011). Uma desvantagem comum nas extrações por refluxo e Soxhlet é a sua demora, uma vez que é necessário pelo menos uma hora para realizar uma extração (CHEOK, SALMAN e SULAIMAN, 2014). Na extração por refluxo e Soxhlet o solvente mais utilizado continua sendo o etanol, conforme mencionado por Cheok, Salman e Sulaiman (2014).

As micro-ondas são ondas eletromagnéticas não ionizantes que operam dentro de uma faixa de frequência de 0,3 a 300 GHz (HENG *et al.*, 2013; TAKEUCHI *et al.*, 2009). Recentemente, o método de extração assistida por micro-ondas (MAE) tem se destacado na obtenção de compostos bioativos a partir de material vegetal devido ao seu rápido processo de extração, ao uso mínimo de solvente e ao mecanismo de aquecimento peculiar associado (HENG *et al.*, 2013). Além disso, aplicações recentes do MAE para a extração de metabólitos secundários de plantas, como flavonoides, quinonas, fenilpropanoides, terpenoides, alcaloides e saponinas, foram examinadas (ZHANG, YANG e WANG, 2011).

A extração assistida por ultrassom é uma técnica eficaz que utiliza ondas ultrassônicas para aprimorar a extração de compostos de matrizes sólidas ou líquidas. O procedimento envolve a preparação da amostra, adição do solvente e aplicação de ultrassom, gerando cavitação que intensifica a transferência de massa e calor. O processo é realizado em ciclos e visa evitar superaquecimento. Após a filtragem da amostra, o líquido contendo os compostos extraídos pode passar por etapas de purificação ou análise. Essa técnica é aplicada em diversos setores, oferecendo vantagens como tempos de extração reduzidos, menor consumo de solventes e capacidade de extrair compostos termossensíveis. Há dois tipos principais de sistemas de ultrassom, sendo eles a sonda de ultrassom, mais potente, e banho de ultrassom, eficaz para processar grandes volumes, embora possa ter eficiência ligeiramente inferior, requerendo, por vezes, um sistema de resfriamento (CHEOW *et al.*, 2021; CHEOK *et al.*, 2013).

Poucos estudos abordaram o impacto do ultrassom nas propriedades tecnológicas e na bioatividade dos alimentos (SORIA e VILLAMIEL, 2010), bem como as implicações da extração assistida por ultrassom nos princípios bioativos de ervas (VINATORU, 2001), na indústria alimentícia e em processos (VILKHU *et al.*, 2008). Embora a extração assistida por ultrassom seja amplamente utilizada na extração de diversos compostos bioativos (CHEOK *et al.*, 2013; DE KONING *et al.*, 2009; JADHAV *et al.*, 2009; ZHANG *et al.*, 2008).

A extração acelerada por solvente é um método de separação de substâncias de uma matriz, como plantas ou alimentos. Esse processo inclui a escolha de um solvente adequado para dissolver seletivamente os elementos desejados da amostra. Após o contato entre a amostra e o solvente, a mistura é segregada, a solução é concentrada e os elementos extraídos podem ser analisados ou aplicados para diferentes propósitos. A aceleração do procedimento é obtida através de condições como alta pressão e temperatura. Esse método é extensamente empregado em diversas áreas, abrangendo a química analítica e a farmacologia (HENG *et al.*, 2013; MUSTAFA e TURNER, 2011).

3.4.2 Quantificação de saponinas

Antes de proceder à quantificação das saponinas totais de uma fonte vegetal, é apropriado realizar um método simples para verificar a presença dessas substâncias. Isso pode ser realizado colocando o material vegetal em um tubo de ensaio contendo água destilada e agitando vigorosamente por 2 minutos (NCUBE *et al.*, 2011). A observação de

espuma estável e persistente na superfície do líquido por 15 minutos indica a presença de saponinas. A quantificação das saponinas vegetais é comumente conduzida por métodos espectrofotométricos e cromatográficos. A diferença fundamental entre a expressão quantitativa desses dois métodos é que a espectrofotometria fornece um valor de saponina total, ao passo que a cromatografia quantifica a presença de uma saponina específica (CHEOK, SALMAN e SULAIMAN, 2014).

A técnica espectrofotométrica tornou-se uma escolha popular para a quantificação de saponinas em materiais vegetais devido à sua simplicidade, rapidez e baixo custo operacional. O método mais frequentemente escolhido na quantificação de saponinas vegetais por espectrofotometria é o ensaio de ácido vanilina-sulfúrico, que permite a determinação das saponinas totais (DINI, TENORE E DINI, 2009; CHEOK, SALMAN e SULAIMAN, 2014). Entretanto, é essencial levar em consideração alguns fatores, como a escolha de padrões, o comprimento de onda e outros, antes de aplicar este método. O princípio fundamental dessa abordagem baseia-se na reação de saponinas triterpênicas oxidadas com vanilina (WU *et al.*, 2019). Neste processo, o ácido sulfúrico atua como agente oxidante, e a coloração distintiva resultante dessa reação é de tonalidade roxa, podendo, por vezes, ser empregado ácido perclórico (ONIHA, AHUEKWE e AKINPELU, 2023; ZHANG *et al.*, 2023; CHEOK, SALMAN e SULAIMAN, 2014)

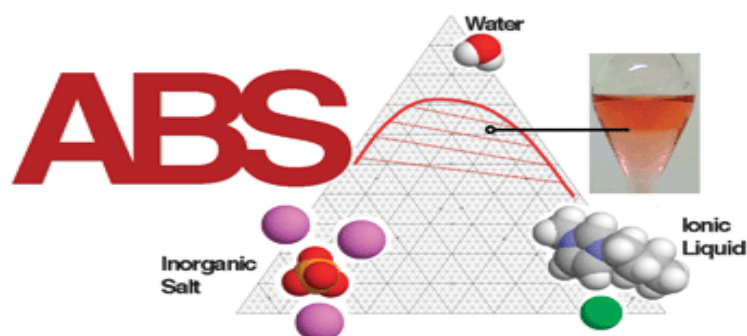
As saponinas são isoladas e purificadas de materiais vegetais em diversos estudos utilizando métodos cromatográficos para a identificação de compostos saponínicos específicos (LIGOR *et al.*, 2018; EL AZIZ, ASHOUR e MELAD, 2019) e para investigar suas propriedades farmacêuticas (JOLLY *et al.*, 2023). Entre os métodos cromatográficos mais frequentemente empregados estão a cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE) (BI *et al.*, 2012, HE *et al.*, 2012, MOSTAFA *et al.*, 2013) e a cromatografia em camada delgada (TLC) (ADÃO *et al.*, 2011, PATEL *et al.*, 2012). Além disso, a quantificação de saponinas também foi realizada por meio da cromatografia líquida de ultrapressão (UPLC) (VERZA *et al.*, 2012, SERVENTI *et al.*, 2013, HA *et al.*, 2014, FOUBERT *et al.*, 2010).

É notável que a maioria dos estudos que aplicam o método HPLC tem como objetivo principal a quantificação de um composto saponínico específico. O conteúdo específico de saponina detectado não apenas serve como uma valiosa referência de dados para pesquisas futuras, mas também constitui uma sólida base científica para fabricantes de medicamentos interessados em processar a fonte vegetal específica (CHEOK, SALMAN e SULAIMAN, 2014).

3.5 Sistema aquoso bifásico (SAB)

Os Sistemas Aquosos Bifásicos (SABs) são métodos de extração líquido-líquido amplamente utilizados em processos de concentração, isolamento e purificação de substâncias (SILVEIRA-LEITE *et al.*, 2019; YU *et al.*, 2019; HAMTA e DEGHANI, 2017; WU *et al.*, 2017). Em condições específicas de concentração, pH, pressão e temperatura, as duas substâncias hidrofílicas que compõem o SAB formam duas fases que não se misturam. Ademais, os sistemas podem ser compostos por dois polímeros, polímero e sal, líquido iônico e sal, ou álcool e sal (DARADMARE e LEE, 2022; PEREIRA, FREIRE e COUTINHO, 2020; DIMITRIJEVIC *et al.*, 2019; CHAKRABORTY e SEN, 2016). A Figura 4 abaixo representa o sistema.

Figura 4. Representação do Sistema Aquoso Bifásico (SAB).



Fonte: Freire *et al.* (2012).

Esses sistemas consistem em duas fases líquidas em equilíbrio termodinâmico, com diferentes propriedades, como índice de refração, composição e densidade, embora não haja troca de matéria ou energia entre elas (DARADMARE e LEE, 2022; FREIRE *et al.*, 2012).

Os SABs têm se mostrado eficazes na partição e purificação de biomateriais devido à baixa tensão interfacial em relação a uma fase aquosa e uma fase não aquosa. Além disso, são amplamente utilizados na separação, concentração e purificação de moléculas bioativas, proporcionando estabilidade e facilidade de reciclagem dos reagentes (EBRAHIMI *et al.*, 2023; SILVEIRA-LEITE *et al.*, 2019).

Entre as vantagens dos SABs estão alto rendimento, reciclagem de polímeros, rápida operação, redução da desnaturação de proteínas e facilitação da separação de materiais particulados (FERNANDES *et al.*, 2020; KLANOVICZ *et al.*, 2021; DARADMARE e LEE, 2022;). Eles são particularmente úteis na concentração de

proteínas, permitindo o controle do volume de cada fase (BELCHIOR *et al.*, 2020; MENG *et al.*, 2019). Outro grande benefício encontrado na utilização do SAB para purificação das proteínas, além do alto teor de água e a seletividade dos sistemas, é a facilidade de aumento de escala e o baixo tempo de operação (SAHA, SARKAR e SEN, 2022; ASENJO, ANDREWS, 2012).

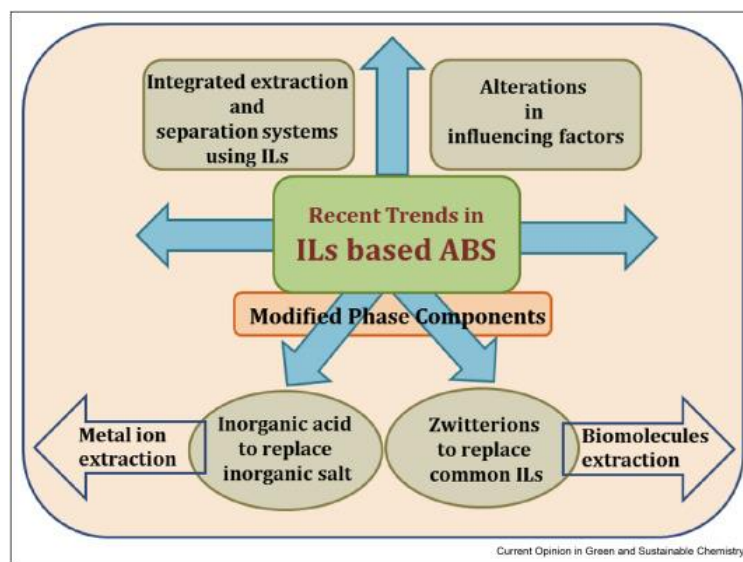
Alves *et al.* (2022) investigaram a extração e purificação da protease a partir da planta ora-pro-nóbis (*Pereskia aculeata* Miller). Diversos parâmetros, como o pH da solução extratora, o tempo de extração e a relação sólido/líquido, foram avaliados para determinar as melhores condições de extração. Além disso, foram empregados sistemas bifásicos aquosos (SAB) formados por polietilenoglicol e fosfato de sódio como parte do processo de purificação da protease. Os resultados mais eficazes foram alcançados em condições específicas, com fosfato de sódio a pH 7,0, 60 min de tempo de extração e uma relação líquido/sólido de 21 mL/g. Observou-se que o aumento da massa molar dos componentes do sistema bifásico aquoso resultou na expansão da região bifásica, do volume de exclusão e do volume livre da fase superior. As proteases foram preferencialmente particionadas para a fase superior, e a análise da energia livre indicou que esse processo é espontâneo. Os sistemas estudados demonstraram alta seletividade, recuperação da atividade da protease e um fator de purificação significativo. Isso sugere que esses sistemas bifásicos aquosos podem ser uma alternativa eficaz para a purificação da protease obtida da ora-pro-nóbis, com implicações práticas na indústria alimentícia e em processos relacionados.

Zhuang *et al.* (2023) desenvolveram um estudo sobre a extração da ficocianina, uma proteína intracelular produzida em *Spirulina sp.* e amplamente utilizada na indústria de cosméticos, alimentos e suplementos como corante natural. No entanto, a extração da ficocianina enfrentou limitações devido às propriedades das proteínas e às tecnologias tradicionais de extração. A inovação deste estudo reside na utilização de solventes eutéticos profundos (*Deep Eutectic Solvents* - DES) como um método eficaz de extração, eliminando a necessidade de solventes orgânicos prejudiciais. Em particular, o sistema bifásico líquido DES/K₂HPO₄ (LBS) foi explorado como meio de extração. Neste sistema, a ficocianina é extraída das células para a fase aquosa de fosfato inferior e, em seguida, transferida seletivamente para a fase DES superior. Dentre os diversos DES testados, o ChCl-Ureia e o ChCl-Glicerol se destacaram, proporcionando as maiores eficiências e rendimentos de extração. No entanto, o DES sintetizado com glicerol enfrentou problemas de difusão de massa. Após uma otimização contínua, o estudo alcançou uma eficiência de extração de

94,2% e um rendimento de 92,0% usando o sistema ChCl-Ureia/K₂HPO₄. Essa solução inovadora apresenta potencial para produção em larga escala e é ecologicamente correta, contribuindo para a extração sustentável da ficocianina.

Basaiahgari e Gardas, (2021) procuraram oferecer uma síntese dos principais temas de pesquisa e progressos recentes na área de Sistemas de Polímeros Reforçados (ABS) que fazem uso de Líquidos Iônicos (ILs), contribuindo para a exploração de aplicações. Na Figura 5 é possível observar os principais avanços do Sistema Aquoso Bifásico aplicado a Líquidos Iônicos.

Figura 5. Diagrama esquemático representando vários desenvolvimentos recentes do SAB. Sistema Aquoso Bifásico (SAB).



Fonte: Basaiahgari e Gardas (2021).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Material

4.1.1. Solventes, reagentes e produtos químicos

A saponina da casca de *Quillaja saponaria* Molina (QBS – *Quillaja Bark Saponin*), com pureza de 32%, composta por uma mistura de glicosídeos triterpênicos cíclicos extraídos da casca da referida árvore, foi adquirida da Sigma-Aldrich Co. (St. Louis, MO, EUA). Os solventes utilizados incluíram etanol (pureza > 99,5%), adquirido da Merck

(Darmstadt, Alemanha), ácido sulfúrico da NEON Comercial Ltda. (São Paulo, Brasil), e hexano da Dinâmica Química Contemporânea Ltda. (São Paulo, Brasil). Demais reagentes empregados incluíram vanilina e sulfato de amônio (pureza > 99%), fornecidos pela Synth (São Paulo, SP, Brasil). O óleo de soja foi obtido no comércio local de Montes Claros – MG. O corante Sudan III foi adquirido da Sigma-Aldrich Co. (St. Louis, MO, EUA).

A água destilada foi utilizada em todas as etapas experimentais, exceto nos testes de partição em sistemas aquosos bifásicos (SABs), para os quais empregou-se água deionizada.

Esta pesquisa foi registrada no Sistema Nacional de Gestão do Patrimônio Genético e do Conhecimento Tradicional Associado (SisGen), sob o número de registro A900788.

4.1.2. Resíduos de frutos do Cerrado e Caatinga

Resíduos de buriti (epicarpo fibroso e endocarpo lenhoso), pequi (epicarpo), macaúba (epicarpo e mesocarpo fibroso residual) e umbu (epicarpo e endocarpo lenhoso) foram doados pela Cooperativa dos Agricultores Familiares e Agroextrativistas Grande Sertão Ltda, entidade de direito privado com sede em Montes Claros, MG. Os resíduos foram recebidos previamente secos e, em seguida, foram identificados e acondicionados em embalagens plásticas lacradas a vácuo e armazenadas a -18 °C até o uso.

4.1.3 Cominuição e análise granulométrica dos resíduos de frutos do Cerrado e Caatinga

Antes da moagem, os resíduos armazenados foram descongelados à temperatura ambiente. O resíduo de umbu, devido à sua estrutura lenhosa, foi previamente fragmentado manualmente para viabilizar a etapa de cominuição. A determinação granulométrica foi realizada em conjunto de peneiras ASTM e o diâmetro médio dos resíduos (dm_g) foi determinado segundo o método proposto pela ASAE Standarts (ASAE, 1998), conforme Equação 1:

$$dm_g = \exp \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n \log [w_i \log(d_i \times d_{i+1})^{0.5}]}{\sum_{i=1}^n w_i} \right\} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde: d_i é a abertura nominal da i -ésima peneira (mm); d_{i+1} é a abertura nominal da peneira ($i+1$) (mm) e w_i é a massa de material retido na i -ésima peneira.

4.2 Métodos

PARTE 1 – Triagem dos resíduos de frutos do Cerrado e Caatinga

4.2.1. Avaliação do processo de extração de saponinas

Foi avaliado o processo de extração, avaliando-se os efeitos dos fatores: tempo (1 a 4 h), temperatura (25 a 45 °C) e concentração de etanol no solvente extrator (20 a 80%). Para isso, aplicou-se o delineamento fatorial Box-Behnken com 3 fatores em 3 níveis e 3 repetições no ponto central, totalizando 15 experimentos, conforme matriz apresentada na Tabela 2. Os experimentos foram realizados de forma aleatória e no mesmo dia.

Tabela 2 – Planejamento experimental do delineamento de Box Behnken para avaliação dos efeitos das variáveis tempo (x_1), temperatura (x_2) e concentração de etanol (x_3) sobre a extração de saponinas a partir de resíduos de frutos do Cerrado e Caatinga

Ensaio	Fatores e níveis codificados			Fatores e níveis reais		
	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3
1	-1	-1	0	1,0	25	50
2	1	-1	0	4,0	25	50
3	-1	1	0	1,0	45	50
4	1	1	0	4,0	45	50
5	-1	0	-1	1,0	35	20
6	1	0	-1	4,0	35	20
7	-1	0	1	1,0	35	80
8	1	0	1	4,0	35	80
9	0	-1	-1	2,5	25	20
10	0	1	-1	2,5	45	20
11	0	-1	1	2,5	25	80
12	0	1	1	2,5	45	80
13	0	0	0	2,5	35	50
14	0	0	0	2,5	35	50
15	0	0	0	2,5	35	50

Fonte: Do autor, 2023.

Nota: x_1 = tempo (horas); x_2 = temperatura (°C); x_3 = etanol %m/m.

O processo de extração seguiu o método de Le *et al.* (2018) com algumas adaptações. As extrações foram realizadas em frascos Erlenmeyer de 250 mL contendo 1,5 g de resíduo em pó e 30 mL de solvente extrator, sob agitação contínua de 250 rpm em incubadora refrigerada com agitação orbital (6430B Touch, Thoth Equipamentos, Brasil). Após a extração, os resíduos sólidos foram removidos por filtração e os extratos obtidos foram mantidos em frascos de vidro tampados a -18 °C até serem utilizados.

4.2.2 Quantificação de saponinas totais

A concentração de saponinas totais foi determinada de acordo com o método colorimétrico de vanilina-ácido sulfúrico, seguindo o protocolo de Dini, Tenore e Dini

(2009), com algumas modificações. Inicialmente, em tubos de vidro, 250 µL da amostra (extratos de umbu, macaúba, pequi e buriti) foram misturados com 250 µL de solução alcoólica de vanilina a 1% (m/V), seguidos da adição de 2,5 mL de ácido sulfúrico a 72% (V/V). As tampas foram levemente rosqueadas aos tubos e após homogeneização, a mistura foi aquecida a 60 °C por 15 minutos e, em seguida, resfriada em banho de gelo por 10 minutos. A absorvância foi medida em um espectrofotômetro a 546 nm e a concentração de saponina total (mg/mL) foi estimada a partir de uma curva padrão previamente preparada utilizando saponina de Quillaja. Para o branco, utilizou-se água no lugar da amostra (extrato).

4.2.3 Análise estatística

A fim de avaliar o efeito dos fatores tempo, temperatura e concentração de etanol sobre a extração de saponinas, os resultados no delineamento Box-Behnken foram submetidos à análise de variância e uma análise de regressão foi realizada com o objetivo de obter um modelo matemático para prever a variável resposta Y (teor de saponina), conforme Equação 2:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j=1}^3 \beta_{ij} x_i x_j \quad (\text{Eq. 2})$$

Sendo β_0 , β_i , β_{ii} e β_{ij} os efeitos global, linear, quadrático e de interação entre as variáveis, respectivamente; x_i e x_j representam as variáveis independentes não codificadas (isto é, em termos dos valores reais).

Os modelos foram avaliados em termos de sua significância e a adequação, avaliada pela falta de ajuste do modelo e pelo coeficiente de determinação (R^2). Apenas os termos significativos foram mantidos no modelo, exceto quando necessário manter a hierarquia. As análises foram realizadas ao nível de significância de 5%, utilizando o *software* SAS University.

PARTE 2 – Avaliação da partição de saponina em sistema aquoso bifásico composto por etanol e sulfato de amônio

Os extratos obtidos dos resíduos de umbu e macaúba apresentaram concentrações mais elevadas de saponina, sendo, portanto, utilizados etapas seguintes.

4.2.4 Partição de saponina em sistema aquoso bifásico

A partição de saponina em sistema aquoso bifásico (SAB) composto por etanol e sulfato de amônio foi avaliada em diferentes concentrações de sal e álcool, e temperatura de partição, conforme delineamento experimental adotado (item 4.2.5, Tabela 3). Para isso, sistemas com massa total de 5 g foram preparados em tubos graduados de 15 mL providos de tampa a partir de soluções estoque de etanol (80% m/m) e sulfato de amônio (40% m/m), nas concentrações pré-definidas. A todos os sistemas foram adicionados 100 µL de extrato de saponina (obtido conforme descrito no item 4.2.2, Parte 1). Os tubos foram tampados, agitados vigorosamente e mantidos em repouso por 1 h em incubadora BOD nas diferentes temperaturas de trabalho para permitir a separação de fases. Decorrido esse intervalo, o volume das fases superior e inferior foi registrado e as fases resultantes foram cuidadosamente separadas para avaliação da concentração de saponinas totais.

O coeficiente de partição (k_s) foi determinado pela razão entre a concentração de saponinas totais nas fases superior ($[sap]_{sup}$) e inferior ($[sap]_{inf}$), conforme Equação 3:

$$k_s = \frac{[sap]_{sup}}{[sap]_{inf}} \quad (\text{Eq. 3})$$

A determinação da concentração de saponinas totais nas fases foi realizada conforme descrito no item 4.2.2. Como branco, foram utilizadas as respectivas fases provenientes de SAB preparados sem adição do extrato de saponina.

4.2.5 Delineamento experimental e análise estatística

Visando verificar a influência das variáveis teor de sal (17 a 19% m/m), teor de álcool (26 a 28% m/m) e temperatura (25 a 45 °C), realizou-se um delineamento composto central de face centrada para 3 fatores (x_1 , concentração de etanol; x_2 , concentração de sulfato de amônio; x_3 , temperatura) em 3 níveis, com 3 repetições no ponto central, totalizando 17 experimentos, conforme matriz apresentada na Tabela 3. A análise estatística a partir dos resultados obtidos foi realizada conforme descrito no item 4.2.3.

Tabela 3 – Matriz do delineamento experimental utilizado para avaliação dos efeitos das variáveis concentração de etanol (x_1), concentração de sulfato de amônio (x_2) e temperatura (x_3) sobre a partição de saponinas obtidas a partir de resíduos de umbu e macaúba

Ensaio	Fatores e níveis codificados			Fatores e níveis reais		
	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3
1	-1	-1	-1	26	17	25
2	1	-1	-1	28	17	25
3	-1	-1	1	26	17	45
4	1	-1	1	28	17	45
5	-1	1	-1	26	19	25
6	1	1	-1	28	19	25
7	-1	1	1	26	19	45
8	1	1	1	28	19	45
9	-1	0	0	26	18	35
10	1	0	0	28	18	35
11	0	0	-1	27	18	25
12	0	0	1	27	18	45
13	0	-1	0	27	17	35
14	0	1	0	27	19	35
15	0	0	0	27	18	35
16	0	0	0	27	18	35
17	0	0	0	27	18	35

Fonte: Do autor, 2023.

Nota: x_1 , x_2 e x_3 representam as concentrações (% m/m) de etanol e de sulfato de amônio, e a temperatura (°C) de partição, respectivamente.

Etapa 3 - Caracterização dos extratos de saponina obtidos a partir de resíduos de frutos do Cerrado e Caatinga

4.2.6 Obtenção dos extratos concentrados de umbu e macaúba

Os extratos de umbu e macaúba foram concentrados utilizando evaporador rotativo (LGI-52CS-1, LGI Scientific, Brasil). Inicialmente, 500 mL de cada amostra foram

transferidos para um balão de fundo redondo, o qual foi mantido sob aquecimento a 50 °C em banho termostático para evaporação do solvente (etanol) sob vácuo. O procedimento de concentração do extrato foi interrompido após uma redução de 5 vezes do volume inicial das amostras. Em seguida, as soluções resultantes foram transferidas para frascos de vidro cobertos com papel alumínio perfurado e mantidas em repouso na capela de exaustão, possibilitando a evaporação do solvente remanescente nas amostras.

4.2.7 Determinação da estabilidade da emulsão

A estabilidade da emulsão (ES) corresponde à capacidade da emulsão de manter suas propriedades estruturais ao longo do tempo, resistindo à separação de fases e à formação de coalescência ou creme (Schreiner *et al.*, 2021).

Para a avaliação da estabilidade, foram utilizados os extratos concentrados de umbu e macaúba, previamente ajustados para uma concentração final de 0,35 mg/mL, utilizando água destilada como diluente.

As emulsões foram preparadas na proporção óleo/água de 33:67 (m/m), empregando óleo de soja como fase oleosa. A mistura das fases foi realizada em homogeneizador do tipo Turrax (modelo T-18, IKA, Alemanha) a 2.000 rpm durante 3 minutos, para adequada dispersão da fase oleosa na fase aquosa.

A estabilidade foi avaliada por meio de análise visual da emulsão durante um período de 24 horas, com registros fotográficos dos sistemas imediatamente após a homogeneização e, posteriormente, após 1 hora e 24 horas de repouso em temperatura ambiente (25 ± 2 °C), conforme metodologia adaptada de Schreiner *et al.* (2021).

Além disso, a avaliação da morfologia das emulsões foi realizada por microscopia óptica (Nikon Eclipse 50i, Pol Polarizing Microscope, Estados Unidos) após o processo de homogeneização, permitindo uma análise qualitativa das características estruturais das emulsões.

4.2.8 Determinação da capacidade de formação de espuma e estabilidade de espuma

A formação de espuma pode ser avaliada com base em dois parâmetros: a capacidade de formação de espuma (*FC*) e a estabilidade de espuma (*FS*). Os extratos

concentrados e não concentrados de umbu e de macaúba foram ajustados com água destilada para concentração de saponina total de 0,2 mg/mL.

O procedimento para determinação de *FC* e *FS* seguiu a metodologia empregada por Schreiner *et al.* (2021), com modificações. Resumidamente, 3 mL de cada uma dessas soluções foram transferidos para tubos graduados de 15 mL, os quais foram tampados e agitados manual e vigorosamente por 30 s. A altura inicial da amostra (antes da agitação) e a altura total da amostra após a formação de espuma (após agitação) foram medidas e utilizadas para calcular a *FC* (Equação 5). E para a determinação da *FS*, após a agitação, os tubos foram mantidos em repouso em incubadora BOD por 1 hora a 30 °C. Após esse tempo, a altura total da amostra foi registrada e o valor de *FS* foi calculado conforme a Equação 4. As avaliações de *FC* e *FS* foram realizadas sem ajuste do pH das amostras.

$$FC \text{ (ou } FS) = \frac{\text{Altura total da amostra espumada (cm)}}{\text{Altura inicial (cm)}} \times 100\% \quad (\text{Eq. 4})$$

4.2.9 Avaliação da atividade antibacteriana

A atividade antimicrobiana dos extratos de resíduo de macaúba e de umbu (concentrados e não concentrados), foi avaliada contra *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 (bactéria Gram-positivo), *Salmonella* Typhimurium e *Escherichia coli* ATCC 25922 (bactérias Gram-negativo). As bactérias foram ativadas e cultivadas em caldo BHI a 35°C por 18 h, em aerobiose. Subsequente, as culturas recém crescidas foram centrifugadas e as células bacterianas foram ressuspensas em solução salina estéril a 0,85% e sua densidade foi ajustada com turvação correspondentes ao tubo 0,5 na escala de McFarland.

A avaliação da suscetibilidade antimicrobiana ocorreu por meio do teste de disco-difusão em ágar, seguindo as orientações do Instituto de Padrões Clínicos e Laboratoriais (CLSI, 2023). Alíquotas de 30 µL de extrato de umbu concentrado (EUC), extrato de umbu não concentrado (EUN), extrato de macaúba concentrado (EMC), extrato de macaúba não concentrado (EMN), e álcool 80% foram aplicadas em discos de papel filtro estéreis (diâmetro de 6 mm). Estes discos foram então colocados sobre placas de Petri contendo meio Mueller-Hinton (MH), que previamente haviam sido inoculadas com os microrganismos de interesse. As placas foram incubadas a 35 °C por 24 horas.

Os extratos dos resíduos foram testados em diferentes concentrações de saponina (0,02, 0,1 e 0,8 mg/mL), utilizando o mesmo solvente das amostras para diluição). O controle positivo para os patógenos em questão foi realizado utilizando o antibiótico vancomicina (30 µg) para *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli*, enquanto para *Salmonella typhimurium* foi utilizado cloranfenicol (30 µg). A atividade inibitória foi determinada pela presença de halos com diâmetro superior a 6 mm, medidos com o auxílio de um paquímetro. Cada teste com as diferentes cepas foi conduzido em triplicata.

4.2.10 Análise estatística

Para as análises de propriedades de espuma e de emulsões, bem como para a avaliação da atividade antimicrobiana, os experimentos foram realizados segundo o delineamento inteiramente casualizado (DIC) com três repetições para cada tratamento. Os resultados foram expressos como média e desvio padrão. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando pertinente, ao teste de Tukey para comparação de médias com intervalos de confiança de 95% ($p \leq 0,05$), utilizando-se o *software* SISVAR versão 5.6.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Parte 1

5.1 Extração de saponinas totais a partir de resíduos da agroindústria

A tabela 4 exibe os valores de concentração de saponinas totais (CST) obtidos em diversas condições de extração para os resíduos de buriti, umbu, macaúba e pequi. As concentrações oscilaram de 0,12 a 2,62 mg/mL para o buriti, 0,15 a 2,33 mg/mL para o umbu, 0,16 a 2,57 mg/mL para a macaúba e 0,45 a 2,53 mg/mL para o pequi. Quando expressos em relação à massa seca do resíduo, esses valores equivalem respectivamente, a intervalos de 2,44 a 52,48 mg/g, 3,06 a 46,59 mg/g, 3,21 a 51,39 mg/g e 9,10 a 50,62 mg/g.

A extração de saponinas mostrou-se diretamente proporcional a concentração de etanol utilizada como solvente (Tabela 4). A maior concentração de etanol (80% m/m) resultou em uma extração mais eficiente, gerando maiores concentrações de saponinas em todas as faixas de tempo (1 a 4 horas) e temperatura (25 a 45 °C) avaliadas. Por outro, a

menor concentração de etanol (20% m/m) demonstrou menor eficiência de extração, obtendo-se as menores concentrações de saponinas mesmo sob condições de extração mais extremas. É importante ressaltar que não foi identificada uma correlação clara entre o aumento da temperatura ou do tempo de extração e a concentração final de saponinas nos extratos. Esses resultados sugerem que, dentre as variáveis analisadas, a concentração do solvente foi o fator mais determinante para a extração desses compostos.

Tabela 4 - Planejamento experimental e resultados da extração de saponinas a partir de resíduos de frutos do Cerrado e da Caatinga.

Ensaio	Variáveis independentes*			Variável dependente (resposta)			
	Tempo	Temperatura	Etanol	Concentração de saponinas totais (mg·mL ⁻¹)			
	x_1	x_2	x_3	Buriti	Umbu	Macaúba	Pequi
1	1,0 (-1)	25 (-1)	50 (0)	1,051	1,059	0,687	1,005
2	4,0 (+1)	25 (-1)	50 (0)	1,477	1,005	1,710	0,989
3	1,0 (-1)	45 (+1)	50 (0)	1,090	0,819	1,245	1,206
4	4,0 (+1)	45 (+1)	50 (0)	1,718	1,749	1,671	1,230
5	1,0 (-1)	35 (0)	20 (-1)	0,718	0,664	0,834	0,680
6	4,0 (+1)	35 (0)	20 (-1)	0,501	0,153	0,858	0,393
7	1,0 (-1)	35 (0)	80 (+1)	1,826	1,400	1,764	1,555
8	4,0 (+1)	35 (0)	80 (+1)	2,624	2,329	1,934	2,570
9	2,5 (0)	25 (-1)	20 (-1)	0,161	0,594	0,455	0,161
10	2,5 (0)	45 (+1)	20 (-1)	0,122	0,401	0,501	0,439
11	2,5 (0)	25 (-1)	80 (+1)	2,469	1,888	2,531	2,322
12	2,5 (0)	45 (+1)	80 (+1)	2,058	2,136	2,213	2,097
13	2,5 (0)	35 (0)	50 (0)	0,827	1,090	1,872	0,858
14	2,5 (0)	35 (0)	50 (0)	1,137	1,431	1,059	1,028
15	2,5 (0)	35 (0)	50 (0)	1,501	1,501	1,896	1,803

Fonte: Do autor, 2023.

Nota: Variáveis em valores reais (e codificados). Tempo em h, temperatura em °C e concentração de etanol em %m·m⁻¹.

Considerando não apenas a análise do impacto das variáveis do processo de extração, mas também a busca por condições ideais, foi empregada a metodologia de superfície de resposta ferramenta estatística robusta amplamente utilizada para modelagem

e otimização de processos (Box e Wilson, 1951). Os valores de concentração de saponinas totais (CST), definidos como variável dependente no delineamento experimental, foram submetidos a análises de regressão com base no modelo matemático descrito na Equação 6, utilizando-se as variáveis independentes em seus valores codificados. Os coeficientes de determinação (R^2) obtidos para os resíduos de buriti, umbu, macaúba e pequi foram de 84,84%, 94,93%, 88,39% e 70,45%, respectivamente. Esses resultados indicam elevado grau de ajuste entre os dados experimentais e os valores previstos, evidenciando a capacidade dos modelos de explicar grande parte da variabilidade observada. Como apresentado na Tabela 5, todos os modelos de regressão mostraram-se estatisticamente significativos (p -valor $< 0,05$) e não apresentaram falta de ajuste (p -valor $> 0,05$), confirmando sua adequação para representar os efeitos das variáveis independentes sobre a extração de saponinas.

Tabela 5 - Resultado da ANOVA para o modelo de regressão ajustado aos dados de extração de saponinas a partir dos diferentes resíduos estudados.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F-valor	Pr > F
<i>Buriti</i>					
Modelo	1	6,98445	6,98445	72,75	<0,0001
Resíduo	13	1,24808	0,09601		
Falta de ajuste	11	1,02046	0,09276	0,82	0,670
Erro puro	2	0,22762	0,11381		
Total	14	8,23253			
<i>Umbu</i>					
Modelo	5	5,42076	1,84153	33,67	<0,0001
Resíduo	9	0,28979	0,03220		
Falta de ajuste	7	0,19309	0,02758	0,57	0,759
Erro puro	2	0,09670	0,04835		
Total	14	5,71056			
<i>Macaúba</i>					
Modelo	3	6,39284	2,13095	27,91	<0,0001
Resíduo	11	0,83998	0,07636		
Falta de ajuste	9	0,33246	0,03694	0,15	0,985
Erro puro	2	0,50752	0,25376		

Total	14	7,23282			
.....					
		<i>Pequi</i>			
.....					
Modelo	1	4,19630	4,19630	30,99	<0,0001
Resíduo	13	1,76031	0,13541		
Falta de ajuste	11	1,30628	0,11875	0,52	0,806
Erro puro	2	0,45404	0,22702		
Total	14	5,95662			

Fonte: Do autor, 2023.

Legenda: GL = grau de liberdade, SQ = soma de quadrados, QM = quadrado médio.

A análise detalhada das estimativas dos coeficientes dos modelos ajustados, estão apresentados na Tabela 6, revelou que o termo linear da concentração de etanol foi a variável mais determinante na extração de saponinas, sendo estatisticamente significativa ($p\text{-valor} < 0,05$) para todos os resíduos avaliados (buriti, umbu, macaúba e pequi). Esse achado é particularmente relevante, pois confirma a predominância da afinidade entre o solvente e o soluto, como já sugerido pelos resultados experimentais.

Para os resíduos de buriti e pequi, a concentração de etanol foi a única variável a exercer uma influência significativa sobre a extração de saponinas. No entanto, para os resíduos de macaúba e umbu, a interação entre as variáveis mostrou-se crucial. Na macaúba, observou-se um efeito significativo da interação entre o tempo e a concentração de etanol, indicando que a eficiência do solvente é modulada pela duração da extração. Por sua vez, a extração de saponinas do resíduo de umbu foi a mais complexa, sendo influenciada não apenas pela concentração de etanol, mas também pelo termo linear de tempo e pelas interações entre tempo e temperatura, e entre tempo e concentração de etanol. Tais interações sugerem que o processo de extração de umbu é um fenômeno mais complexo, no qual a combinação de diferentes fatores tem um impacto direto e significativo na quantidade de saponinas extraídas.

Os modelos de regressão foram construídos com base nos coeficientes estatisticamente significativos, respeitando o princípio da hierarquia (MONTGOMERY, 2001). Esse princípio exige que, mesmo que um termo de ordem inferior não seja significativo, ele deve ser mantido no modelo se um termo de ordem superior for considerado significativo. As equações de 5 a 8 representam os modelos matemáticos ajustados para os resíduos de buriti, umbu, macaúba e pequi, respectivamente. Elas

descrevem a relação entre a concentração de saponinas totais (CST) e as variáveis independentes codificadas do processo de extração.

Os modelos de regressão foram constituídos pelos coeficientes significativos, mas mantendo-se o princípio da hierarquia (MONTGOMERY, 2001), segundo o qual um termo de ordem inferior não significativo deve ser mantido no modelo quando o termo de ordem superior for significativo. As Equações 6 a 9 correspondem aos modelos ajustados para as extrações com os resíduos de buriti, umbu, macaúba e pequi, respectivamente, mostrando a relação entre a CST e as variáveis independentes codificadas.

Tabela 6 – Estimativa dos coeficientes da análise de regressão realizada para os resultados de extração de saponinas a partir dos resíduos avaliados e sua respectiva significância estatística.

Resíduo avaliado	Termo	Coefficiente	Erro padrão	t-valor	Pr > t
Buriti	x_3	0,9344	0,1096	8,53	< 0,0001*
Umbu	x_1	0,1618	0,0634	2,55	0,0312 *
	x_2	0,0699	0,0634	1,10	0,2993
	x_3	0,7426	0,0634	11,71	< 0,0001*
	x_1x_2	0,2460	0,0897	2,74	0,0228 *
	x_1x_3	0,3600	0,0897	4,01	0,0031*
Macaúba	x_1	0,0920	0,0977	0,94	0,3666
	x_3	0,8589	0,00977	8,79	< 0,0001 *
	x_1x_3	0,3255	0,1382	2,36	0,0381 *
Pequi	x_3	0,7243	0,1301	5,57	< 0,0001 *

Fonte: Do autor, 2023.

Nota: * termos significativos a 5% de significância.

$$Y = 1,2853 + 0,9344 x_3 \quad (\text{Eq. 5})$$

$$Y = 1,2146 + 0,1618 x_1 + 0,0699 x_2 + 0,7426 x_3 + 0,2460 x_1x_2 + 0,3600x_1x_3 \quad (\text{Eq. 6})$$

$$Y = 1,2224 + 0,0920 x_1 + 0,8589 x_3 + 0,3255 x_1x_3 \quad (\text{Eq. 7})$$

$$Y = 1,4153 + 0,7243 x_3 \quad (\text{Eq. 8})$$

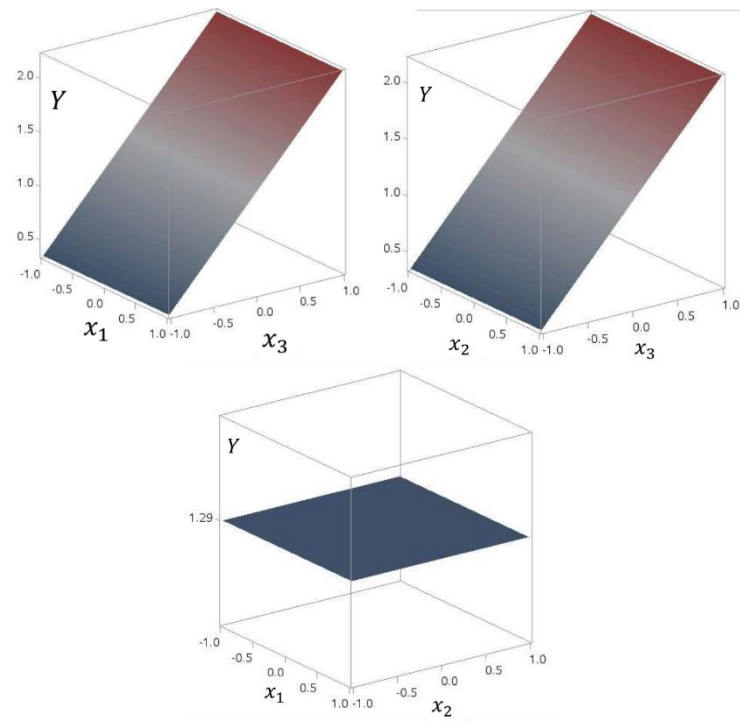
sendo Y a concentração de saponinas totais ($\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$), x_1 , x_2 e x_3 as variáveis tempo, temperatura e concentração etanol, respectivamente, em termos dos valores codificados.

Todos os termos estatisticamente significativos (p -valor $< 0,05$) identificados nos modelos (Tabela 6) exerceram um efeito positivo sobre a extração de saponinas. Isso significa que, dentro da região experimental avaliada, o aumento nos valores dessas variáveis resultou em uma maior extração do composto. A concentração de etanol se destacou como a variável de maior influência em todos os modelos, exibindo o maior coeficiente linear. Adicionalmente, a interação entre a concentração de etanol e o tempo de extração, quando significativo (como nos modelos para umbu e macaúba - Eq. 6 e 7), apresentou o segundo maior coeficiente, reforçando o papel central da concentração do solvente no processo. Esses achados corroboram estudos prévios que investigaram a extração de saponina a partir de diferentes fontes e com distintos métodos, confirmando a importância da concentração do etanol para a eficiência do processo (KWON et al., 2003; CHENG *et al.*, 2017). A relação entre a concentração de saponinas totais (CST) e as variáveis de processo, tempo, temperatura e concentração de etanol foi visualizada e analisada através das superfícies de resposta tridimensionais, geradas pelos modelos matemáticos ajustados (Equações 5-8) para os extratos dos resíduos de buriti, umbu, macaúba e pequi (Figura 6). É notório que a extração de saponinas aumentou de forma consistente com o incremento da concentração de etanol (x_3) em todos os resíduos avaliados. No entanto, o impacto das outras variáveis demonstrou ser específico para cada extrato. Para os resíduos de buriti e pequi, as superfícies de resposta permaneceram planas em relação ao tempo (x_1) e à temperatura (x_2), indicando que essas variáveis não tiveram um efeito significativo na CST dentro do intervalo experimental estudado (Figura 6A e D).

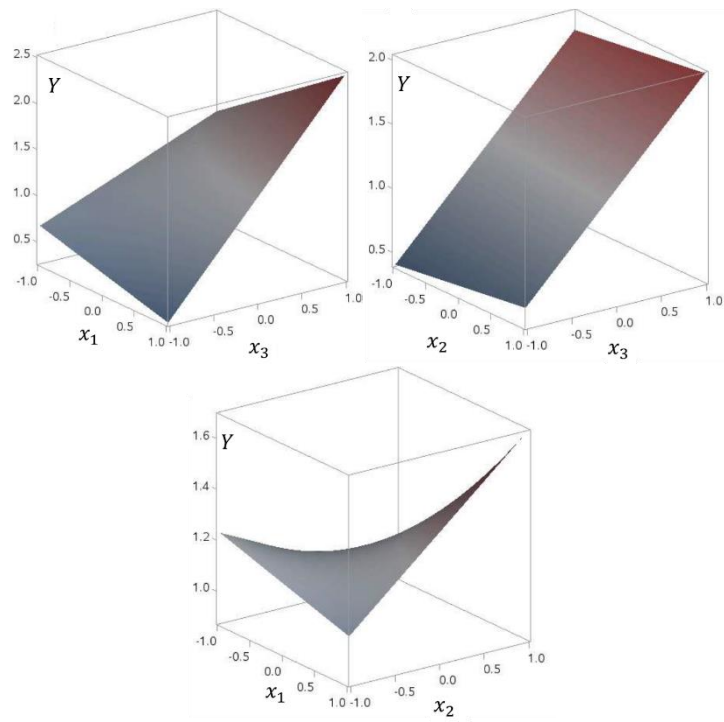
A complexidade do processo foi maior para o resíduo de umbu, embora a temperatura não tenha tido um efeito linear significativo, a sua interação com o tempo de extração foi relevante para a obtenção de saponinas. Além disso, o tempo de extração por si só, juntamente com a interação entre tempo e a concentração do solvente extrator, também impactou a CST (Figura 6B). Por fim, na extração do resíduo de macaúba, a temperatura não afetou significativamente o teor de saponinas, e o tempo de extração não teve um efeito linear. Contudo, a interação entre o tempo e a concentração de etanol foi um fator determinante para a quantidade de saponinas no extrato (Figura 6C).

Figura 6. Superfícies de resposta para a concentração de saponina total (Y , $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$) em função das variáveis tempo (x_1), temperatura (x_2) e concentração de etanol (x_3) para as extrações a partir dos resíduos de buriti (A), umbu (B), macaúba (C) e pequi (D)

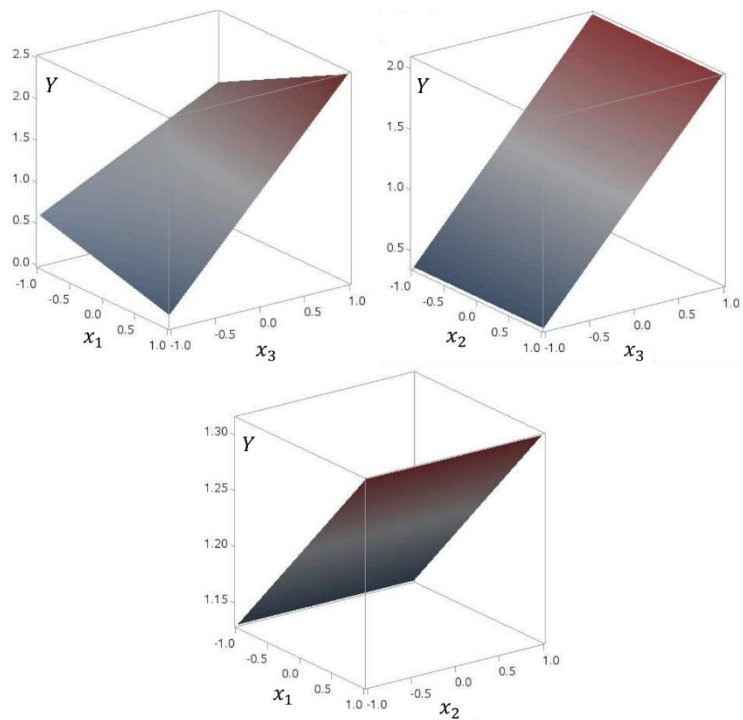
A



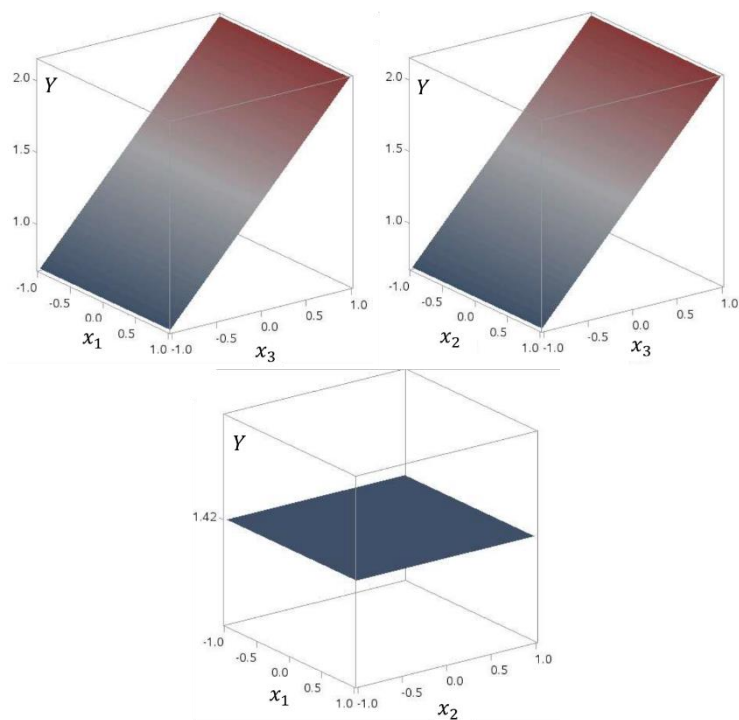
B



C



D



Fonte: Do autor, 2023.

Nota: Cada gráfico foi gerado considerando o nível 0 da terceira variável dependente.

Com base nos modelos ajustados, foram estabelecidas as condições ótimas para a extração máxima de saponinas a partir dos resíduos, conforme a Tabela 7. Essas condições foram posteriormente confirmadas por meio de experimentação, resultando em concentrações de saponinas totais (CST) próximas aos valores previstos, com variações

inferiores a 5,0%. Esses resultados corroboram a precisão e a confiabilidade dos modelos utilizados para a predição do processo de extração. Observa-se que a macaúba e o umbu apresentaram as maiores concentrações de saponinas, com uma média de 2,58 mg/mL e 2,50 mg/mL, respectivamente. O buriti exibiu concentrações intermediárias, com 2,28 mg/mL, enquanto o pequi, as menores concentrações (2,21 mg/mL).

Tabela 7 - Condições dos parâmetros para máxima extração de saponinas definidas pelos modelos e respectivos resultados preditos e experimentais (mg/mL).

Resíduo	Tempo (h)	Temperatura (°C)	Etanol (% m·m ⁻¹)	Predito	Experimental
Buriti	2,5	45	80	2,22	2,28
Umbu	4,0	35	80	2,48	2,50
Macaúba	4,0	35	80	2,50	2,58
Pequi	2,5	45	80	2,14	2,21

Fonte: Do autor, 2023.

As concentrações de saponina obtidas na condição de ótimo, de todos os resíduos deste estudo, apresentaram valores que variaram de 2,44 a 52,48 mg/g. Quando comparados aos resultados de Dahmoune et al. (2020) para a extração de saponinas bioativas de *Echinaster sepositus*, que foram de 60,3 mg/g para extração por micro-ondas, 18,5 mg/g por ultrassom e 7,7 mg/g por extração convencional, verifica-se que os resultados superaram os valores obtidos por ultrassom e extração convencional, mas foram inferiores à extração por micro-ondas. Em comparação com outros estudos, Hu et al. (2018) e Akbari, Abdurahman e Yunus (2019) também obtiveram valores de saponinas totais superiores para *Panax notoginseng* (70,49 mg/g) e feno-grego (172,18 mg/g), respectivamente.

Resultado similar aos obtidos no presente estudo foram reportados por Nguyen et al. (2021), ao investigarem a extração de saponinas de casca de cacau por meio da técnica de extração assistida por micro-ondas, obtiveram concentração máxima de 64,77 mg/g de resíduo seco, valor ligeiramente superior ao observado no presente estudo, no qual as concentrações variaram de 44,2 mg/g para o resíduo de pequi a 51,6 mg/g para o resíduo de macaúba, na condição ótima.

A determinação das condições ideais de extração é frequentemente conduzida por meio da metodologia de superfície de resposta, que possibilita a avaliação sistemática de variáveis independentes como tempo, temperatura e concentração do solvente (BEZERRA *et al.*, 2021; NIZIOŁ-ŁUKASZEWSKA e BUJAK, 2018; OJHA *et al.*, 2020). Santos-Zea, Gutierrez-Uribe e Benedito (2021) destacam que parâmetros como tempo, temperatura e concentração de etanol exercem papel determinante na extração de saponinas, enquanto Hu *et al.* (2018) reforçam a influência marcante do tempo e da proporção de etanol no rendimento do processo.

Comparar os resultados da quantificação de saponinas é desafiador devido à variedade de métodos empregados, à falta de padronização nos protocolos laboratoriais e à heterogeneidade das próprias saponinas. Além disso, a escassez de padrões de referência comerciais disponíveis adiciona dificuldades à comparação entre diferentes estudos (Bezerra *et al.*, 2021).

ETAPA 2

5.2 Partição de saponinas em Sistema Aquoso Bifásico

A partição de biomoléculas entre as fases do sistema depende de diversos fatores/propriedades, como ponto isoelétrico, hidrofobicidade e hidrofiliabilidade da molécula, pH, temperatura e interações hidrofóbicas (GRILO, ARIES-BARROS e AZEVEDO, 2016; MORADI e SHAHROUZI, 2020; RAJA *et al.*, 2011) de modo que a partição é o resultado de diversos parâmetros de processo e característicos da molécula. Assim, a partição de macromoléculas em sistema aquoso bifásico (SAB) é normalmente influenciada por diversos parâmetros, os quais podem ser avaliados e otimizados.

Neste estudo, os efeitos da composição dos sistemas (concentração de etanol e de sulfato de amônio) e da temperatura sobre o coeficiente de partição (k_p) foram avaliados segundo delineamento composto de face centrada. Os fatores e seus níveis codificados e reais avaliados no processo de partição do surfactante natural, assim como as respostas obtidas para as respectivas condições experimentais são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Planejamento experimental e resultados do coeficiente de partição de saponinas totais do delineamento de face composta de face centrada.

Ensaio	Fatores e níveis codificados			Fatores e níveis reais			Coeficiente de partição (k_p)	
	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	Umbu	Macaúba
1	-1	-1	-1	26	17	25	6,3	5,9
2	+1	-1	-1	28	17	25	2,8	5,4
3	-1	-1	+1	26	17	45	1,6	2,2
4	+1	-1	+1	28	17	45	1,7	2,3
5	-1	+1	-1	26	19	25	3,6	3,8
6	+1	+1	-1	28	19	25	2,3	2,5
7	-1	+1	+1	26	19	45	3,3	1,7
8	+1	+1	+1	28	19	45	1,2	2,2
9	-1	0	0	26	18	35	3,5	6,7
10	+1	0	0	28	18	35	3	2
11	0	0	-1	27	18	25	1,5	1,6
12	0	0	+1	27	18	45	3,6	2,5
13	0	-1	0	27	17	35	13,4	4,9
14	0	+1	0	27	19	35	3,7	2,3
15	0	0	0	27	18	35	2	2,2
16	0	0	0	27	18	35	2	2,5
17	0	0	0	27	18	35	1,9	2,6

Fonte: Do autor, 2023.

Nota: x_1 = %m/m etanol; x_2 = %m/m sulfato de amônio; x_3 = temperatura (°C).

Conforme apresentado na Tabela 9 nota-se que os valores de k_p variaram de 1,2 a 13,4 para o extrato de umbu e de 1,6 a 6,7 para o extrato de macaúba. Essa variação sugere uma preferência na migração da saponina para a fase superior, rica em álcool. Essa maior concentração de saponina na fase superior pode estar relacionada a maior afinidade entre as moléculas do surfactante e o etanol, que pode envolver ligações de hidrogênio e interações hidrofóbicas, uma vez que as moléculas de saponina são formadas por uma porção policíclica apolar e por cadeias de açúcar (KEZWON e WOJCIECHOWSKI, 2014). Além disso, a fase inferior contém maior quantidade de íons de sal, os quais competem com a molécula de saponina pela água. Devido à intensidade da interação íon-água, ocorre a transferência da saponina para a fase superior (WEI *et al.*, 2021; JIANG *et al.*, 2021).

A condição que resultou em maior valor de k_p para as saponinas do extrato de umbu corresponde ao SAB composto por 27% m/m de etanol e 17% m/m de sulfato de amônio, a 35 °C (ensaio 13), e para as saponinas do extrato de macaúba, o SAB composto por 26% m/m de etanol e 18% m/m de sulfato de amônio, a 35 °C (ensaio 9). Contudo, não foi observado efeito significativo ($p > 0,05$) das variáveis avaliadas (concentração de etanol,

concentração de sulfato de amônia e temperatura) sobre a partição de saponinas provenientes dos extratos de resíduos de umbu e macaúba, nas condições avaliadas.

Liang *et al.* (2019) investigaram a extração e separação de oito ginsenosídeos provenientes de botões florais de *Panax Ginseng*, utilizando um método de extração assistida por ultrassom baseado em líquido iônico aquoso, acoplado a um sistema aquoso bifásico e reportaram valores de coeficientes de partição máximo inferiores aos obtidos no presente estudo. Liang *et al.* (2019) reportaram valores de k_p igual a 1,97 para os sistemas compostos por líquido iônico/sulfato de amônio e igual a 3,04 para sistema composto por líquido iônico/fosfato monossódico.

ETAPA 3

5.3 Propriedade de espuma

A avaliação de agentes formadores de espuma envolve a análise de dois parâmetros: a capacidade de formação de espuma (*FC*) e a estabilidade de espuma (*FS*). O primeiro refere-se à porcentagem de formação inicial da espuma, enquanto o segundo representa a porcentagem de retenção dessa espuma ao longo do tempo (HO *et al.*, 2019; RUEGG *et al.*, 2022). Os resultados desses parâmetros obtidos para os extratos concentrados e não concentrados de umbu e de macaúba (UEN, UEC, MEN e MEC, respectivamente), ajustados para concentração de saponina igual 0,2 mg/mL, são apresentados na Tabela 9.

Observa-se que o extrato de macaúba não concentrado (MEN) apresentou maior valor de *FC* (18,4%), diferindo estatisticamente dos demais ($p < 0,05$). A maior *FS* foi observada nos extratos não concentrados de macaúba (3,50%) e umbu (3,00%), sem diferença significativa entre si ($p > 0,05$). Em contrapartida, os extratos concentrados apresentaram valores de *FS* praticamente nulos, evidenciando que o processo de concentração reduziu de forma expressiva essa propriedade.

Possivelmente, o processo de concentração pode ter ocasionado a degradação de saponinas termossensíveis, comprometendo, por conseguinte, a capacidade de formação de espuma e a estabilidade da mesma nos extratos em questão (JIMÉNEZ-MORENO *et al.*, 2020; MISHRA *et al.*, 2023).

Tabela 9 - Capacidade de formação de espuma (*FC*) e estabilidade de espuma (*FS*) de extratos de saponinas obtidos a partir de resíduos de umbu e macaúba

Extratos (0,2 mg/mL de saponina)	FC (%)	FS (%)
UEN	10,40±1,67 ^b	3,00±0,30 ^a
UEC	8,00±1,0 ^b	0,00±0,0 ^b
MEN	18,4±2,69 ^a	3,50±0,95 ^a
MEC	11,3±1,20 ^b	0,01±0,0 ^b

Letras diferentes na mesma coluna indicam médias estatisticamente diferentes pelo teste de Tukey (p – valor < 0,05).

Fonte: Do autor, 2023.

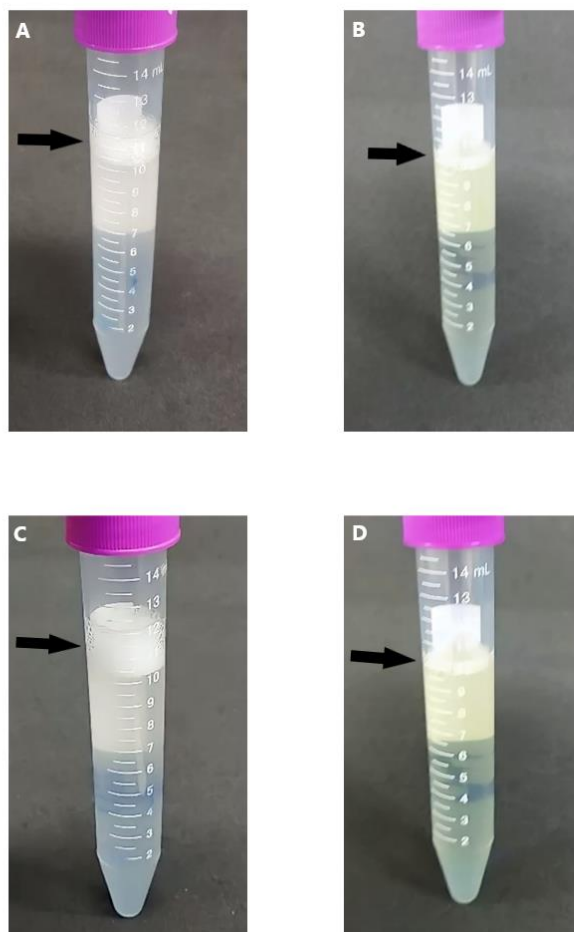
Nota: FC: Capacidade de formação de espuma, FS: Estabilidade de formação de espuma.

Legenda: UEN: Umbu extrato não concentrado, UEC: Umbu extrato concentrado, MEN: Macaúba extrato não concentrado, MEC: Macaúba extrato concentrado.

Espumas geradas por meio de agitação mecânica caracterizam-se como sistemas termodinamicamente instáveis, e, ao longo do tempo, permanecendo em repouso, tendem a se desfazer naturalmente. Essa instabilidade termodinâmica resulta da ampliação da interface entre o ar e a água durante o processo de formação da espuma (HILL e EASTOE, 2017; DEOTALE *et al.*, 2020).

Os resultados da análise de estabilidade de espuma produzida a partir dos extratos avaliados podem ser observados na Figura 7, bem como na Tabela 9. O resultado quanto à estabilidade de espuma, avaliado após 1 h em repouso à 30 °C, revelou que restaram apenas as espumas produzidas com os extratos não concentrados, sendo a espuma obtida com o extrato de umbu mais resistente do que a obtida com o extrato de macaúba, uma vez que aproximadamente 27% e 18% do volume dessas espumas, respectivamente, permaneceram após o intervalo de 1 h. Para os extratos concentrados, nenhuma espuma remanescente foi observada após o intervalo de 1 h a 30 °C.

Figura 7. Formação de espuma e estabilidade da formação de espuma de resíduos de frutos.



Fonte: Do autor, 2023.

Legenda: Espuma com amostra de Umbu- Tempo inicial (a) e após 1 h (b); Espuma com amostra de Macaúba- Tempo inicial (c) e após 1 h (d).

Diversos estudos têm investigado as propriedades de formação e estabilidade de espuma de saponinas provenientes de diferentes fontes de vegetais, evidenciando variações importantes em função da concentração utilizada, da composição química e das condições do sistema. Diferente dos resultados apresentados neste estudo, demais trabalhos obtiveram resultados satisfatórios quanto a formação de espuma e estabilidade, como por exemplo,

Jurado e Sorensen (2020), que avaliaram as propriedades de espuma de saponina obtida da raiz de *Saponaria officinalis* e verificaram elevada estabilidade de espuma com concentração de saponina entre 1,6 e 2,7 g/L. Os autores relatam que 85% e 76% da espuma continuaram presente após 1 e 3 h de repouso, respectivamente, à temperatura ambiente (22 °C).

De forma semelhante Chen *et al.* (2010) verificaram que o extrato bruto de 0,5% saponinas de *Camellia oleifera* apresentou capacidade de formação de espuma moderada, com altura de espuma produzida correspondente a 37,1% e 51,3% da altura de espuma obtida com soluções de lauril sulfato de sódio (SLS) e de monooleato de polioxietileno-80-sorbitano (Tween 80), respectivamente, na mesma concentração (0,5%). Os autores reportaram que o extrato de saponinas testado apresentou boa estabilidade de espuma (avaliada após 5 min), assim como as soluções dos surfactantes sintéticos utilizados (SLS e Tween 80).

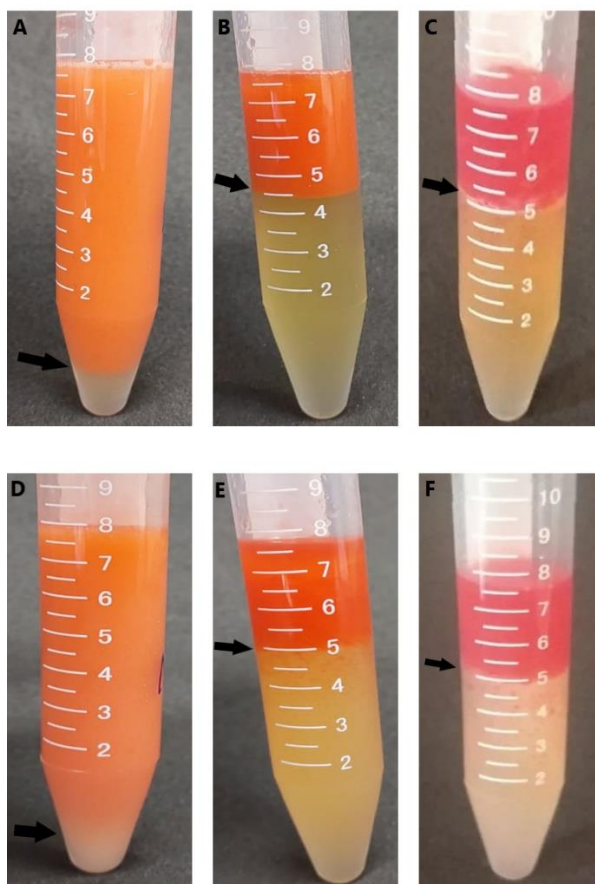
Canto *et al.* (2010) avaliaram as propriedades de espuma de saponinas extraídas de erva mate (*Ilex paraguariensis* A. St. Hil.) e verificaram que a fração enriquecida desses surfactantes (1,5 mmol/L) levou à formação de espuma abundante e persistente, embora sua capacidade de formação de espuma e estabilidade sejam afetadas negativamente pela presença de eletrólitos no meio.

Apesar dos resultados pouco expressivos, é importante notar que a comparação de resultados sobre formação e estabilidade de espumas e emulsões exige cautela, pois critérios e métodos de avaliação podem variar significativamente entre os estudos. No entanto, o fator mais provável para o desempenho limitado dos nossos extratos é a baixa concentração de saponinas obtida (0,2 mg/mL), que é consideravelmente inferior às concentrações utilizadas em estudos da literatura que obtiveram resultados satisfatórios.

5.4 Propriedade emulsificante

As emulsões óleo em água formuladas com os extratos dos resíduos de umbu e macaúba (concentração de saponinas de 0,35 mg/mL) demonstraram alta instabilidade, conforme ilustrado na Figura 8. O processo de separação de fases foi rápido e progressivo, caracterizado pela cremeação inicial e pela baixa estabilidade ao longo do tempo. Para o resíduo de umbu, a estabilidade de 44% após 1h (Figura 8B) reduziu para 38% após 24h (Figura 8C). Já para o extrato de macaúba, a estabilidade de 38% foi mantida nos tempos de 1h (Figura 8E) e 24h (Figura 8F), confirmando a baixa resistência das emulsões.

Figura 8: Emulsões obtidas a partir dos extratos dos resíduos de umbu (A, B, C) e macaúba (D, E, F) após homogeneização (A e D) e sua estabilidade após 1 h (B e E) e 24 h (C e F)



Fonte: Do autor, 2023.

A estabilidade da emulsão diz respeito à capacidade de manter as propriedades físico-químicas inalteradas ao longo do tempo, resistindo a quaisquer mudanças (HU *et al.*, 2017; MCCLEMENTS, 2007; MCCLEMENTS, 2004).

Diferentemente dos resultados obtidos no presente estudo, cujas soluções obtidas a partir dos extratos apresentaram desempenho insatisfatório para a formação e estabilidade de emulsões, outros estudos reportam resultados positivos para saponinas provenientes de outras fontes e, principalmente, empregadas em concentrações muito superiores à adotada no presente estudo. Xu, Sun e McClements (2018) verificaram que a combinação de *hydrolyzed rice glutelin* (HRG) e saponina de *Quillaja* resultou em emulsões com maior estabilidade frente a condições de alta salinidade e temperatura, efeito atribuído à formação de uma película interfacial mais espessa, capaz de promover repulsão estérica mais intensa. Embora não tenham realizado comparações diretas com saponinas isoladas, o uso de um

sistema combinado de emulsificantes diferentes do adotado neste estudo pode ter contribuído para a estabilidade superior observada.

Corroborando a importância da concentração, Jarzębski et al. (2020) demonstraram que a utilização de extratos de *Quillaja saponaria* e *Saponaria officinalis* em emulsões de óleo de cânhamo resultou na formação de gotículas de menor tamanho e maior estabilidade. Eles destacam que emulsões preparadas com concentrações acima do ponto crítico micelar (CMC) apresentaram maior estabilidade ao longo do tempo. Esse achado sugere que a baixa concentração de saponinas obtida no presente estudo pode ter sido um fator limitante para a capacidade emulsificante, uma vez que não foi suficiente para promover um efeito comparável.

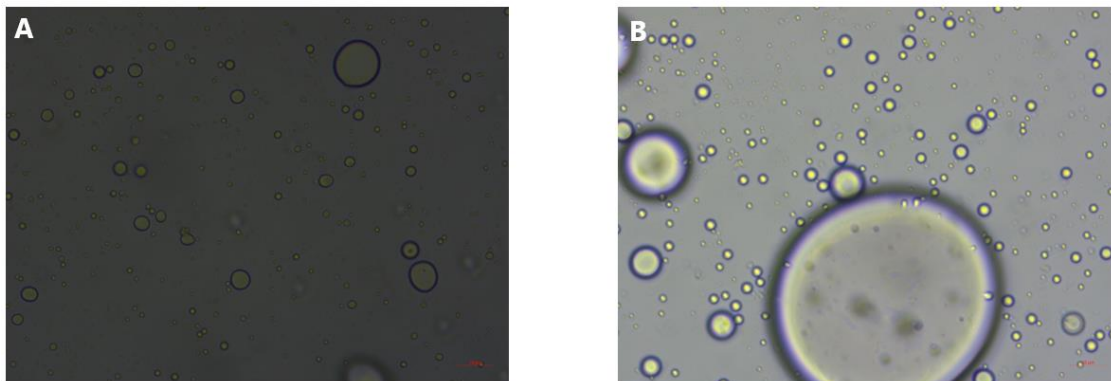
Resultados análogos foram descritos por Faria et al. (2017), que demonstraram que a mistura de saponina de casca de *Quillaja* e β -lactoglobulina, na proporção 1:1 (1,2 mmol/L de cada), promoveu a formação de emulsões com gotículas de menor tamanho (236–491 nm) e maior estabilidade em relação ao uso isolado de cada componente. Esse efeito foi atribuído à atuação sinérgica entre estabilização eletrostática e estérica, indicando que, além da concentração, a associação com outros emulsificantes pode potencializar a estabilidade fator não explorado no presente estudo.

Bouhoute et al. (2020) também observaram resultados expressivos ao elaborar extratos de casca de argan com teores de saponina variando de 10,4% a 39,1%. Todos os extratos apresentaram capacidade de gerar emulsões com gotículas submicrométricas e elevada estabilidade física por 30 dias de armazenamento, tanto a 5 °C quanto a 25 °C. Embora os autores ressaltem que a funcionalidade emulsificante não dependa exclusivamente do teor de saponinas, mas também da composição química do extrato, o fato de trabalharem com concentrações superiores às deste estudo pode explicar parte da diferença nos resultados obtidos.

Dessa forma, a principal hipótese para a instabilidade das emulsões observada no presente estudo está relacionada à baixa concentração de saponinas utilizada, possivelmente insuficiente para reduzir a tensão interfacial e formar uma camada adsorvida robusta ao redor das gotículas. Esse fator, associado à elevada polidispersidade (Figura 9) das emulsões obtidas, pode ter favorecido a coalescência, levando ao aumento do tamanho das gotas e conseqüente separação de fases (HU *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2020; FU *et al.*, 2022; KUNDU *et al.*, 2013). Além disso, outros aspectos também podem ter contribuído a o baixo desempenho, como uma possível carga elétrica superficial (potencial zeta) das gotículas insuficiente para promover repulsão eletrostática efetiva entre as gotas, e a

possível presença de componentes nos extratos brutos capazes de interferir na adsorção das saponinas ou comprometer a estabilidade da camada protetora formada.

Figura 9. Microscopia ótica das emulsões recém preparadas com extratos de umbu (A) e macaúba (B) diluídos (0,35 mg/mL de saponinas). Barra de escala correspondente a 10 μm .



Fonte: Do autor, 2023.

A análise por microscopia ótica oferece uma visão detalhada da morfologia das emulsões. Na Figura 9, observa-se imagens das emulsões obtidas a partir dos extratos de umbu e macaúba (0,35 mg/mL de saponinas). É evidente a presença de gotículas de tamanhos irregulares em ambas as amostras, com predominância de gotículas menores. Vale ressaltar que a formação de gotículas menores geralmente contribui para a estabilidade das emulsões (SCHREINER *et al.*, 2021).

A não uniformidade no tamanho das gotículas pode afetar a estabilidade das emulsões ao longo do tempo. Emulsões com uma distribuição de tamanho de gotículas mais homogênea tendem a ser mais estáveis (ZHANG *et al.*, 2023; HO *et al.*, 2022).

5.5 Análise antimicrobiana

No presente estudo, avaliou-se a atividade antimicrobiana utilizando três cepas bacterianas: duas Gram-negativo (*Salmonella* e *E. coli*) e uma Gram-positivo (*S. aureus*). Foram testados extratos de saponinas em concentrações de 0,02, 0,10 e 0,80 mg/mL, tanto concentrados quanto não concentrados. Além disso, antibióticos sintéticos, vancomicina e cloranfenicol, ambos em uma concentração de 30 (μg) também foram avaliados. E para

assegurar a ausência de influência do solvente dos extratos não concentrados, solução de etanol 80% também foi testada.

Os resultados obtidos para a avaliação da atividade antibacteriana são apresentados

Tabela 10. Atividade antimicrobiana dos extratos de saponina frente aos microrganismos patogênicos *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* e *Salmonella Typhimurium* pelo método de difusão em ágar.

Amostras	Concentração de saponina ou antibiótico (mg/mL)	Diâmetro do halo de inibição (mm)		
		<i>S. Typhimrium</i>	<i>S. aureus</i>	<i>E. coli</i>
UEN	0,8	14,36±1,65 ^b	14,67±1,37 ^b	16,2±0,90 ^b
	0,1	ND	ND	ND
	0,02	ND	ND	ND
UEC	0,8	13,82±1,42 ^b	14,65±1,93 ^b	15,72±2,08 ^b
	0,1	ND	ND	12,29±1,25 ^c
	0,02	ND	ND	9,57±4,50 ^d
MEN	0,8	13,04±1,01 ^b	21,96±2,50 ^a	12,48±0,71 ^c
	0,1	ND	ND	ND
	0,02	ND	ND	ND
MEC	0,8	ND	ND	ND
	0,1	ND	ND	ND
	0,02	ND	ND	ND
Etanol 80%	-	ND	ND	ND
Vancomicina (30 µg)	-	-	21,93±2,08 ^a	25,00±0,89 ^a
Cloranfenicol (30 µg)	-	32,05±3,07 ^a	-	-

Fonte: Do autor, 2023.

Letras diferentes na mesma coluna indicam médias estatisticamente diferentes pelo teste de Tukey (p-valor < 0,05).

Nota: ND = atividade antimicrobiana não detectada (ausência de formação de halo de inibição). Símbolo (-) antibiótico não utilizado. UEN= Umbu extrato não concentrado, UEC= Umbu extrato concentrado, MEN= Macaúba extrato concentrado, MEC= Macaúba extrato não concentrado.

na Tabela 10.

Uma vez que o método de difusão em ágar correlaciona a atividade antimicrobiana à presença e tamanho (diâmetro) do halo de inibição de crescimento microbiano, verificou-se que os controles positivos (antibióticos), assim como os extratos de umbu concentrado e não concentrado e extrato de macaúba não concentrado com concentração de saponina de 0,80 mg/mL, apresentaram ação contra o crescimento de todos os microrganismos avaliados (Tabela 13). Nenhum halo de inibição foi observado para os extratos com concentrações de saponinas de 0,02 e 0,10 mg/mL, exceto para o extrato de umbu concentrado que apresentou inibição contra *E. coli* nessas concentrações. Solução de etanol

80% também não apresentou atividade microbiana frente os microrganismos avaliados, o que exclui possível ação do solvente dos extratos.

Em relação à ação contra *S. Typhimurium*, observou-se maior formação de halo com o uso do antibiótico cloranfenicol ($p < 0,05$), enquanto as amostras UEN, UEC e MEN a 0,8 mg/mL não apresentaram diferença significativa ($p > 0,05$). Não foi observada diferença significativa ($p > 0,05$) entre o extrato MEN (0,8 mg/mL) e o antibiótico vancomicina na formação de halos contra *S. aureus*, sendo os valores superiores aos das amostras de UEN e UEC, ambas a 0,8 mg/mL. E em relação à ação contra *E. coli*, verificou-se que a formação de halo para a vancomicina foi significativamente maior ($p < 0,05$) que os extratos testados. Além disso, extratos de UEN e UEC com a maior concentração de saponinas apresentarem uma maior formação de halos em relação à amostra MEN na mesma concentração ($p < 0,05$).

Resultados semelhantes ao presente estudo para o microrganismo *Staphylococcus aureus* foram relatados por Dong *et al.* (2020). Este último estudo investigou a atividade antimicrobiana e o mecanismo de ação das saponinas provenientes das cascas de *Chenopodium Quinoa Will*, direcionadas contra bactérias patogênicas de origem alimentar. De acordo com os achados de Dong *et al.* (2020), foi observado um tamanho médio de 8,89 mm na formação dos halos inibitórios. Os autores também destacaram que as saponinas testadas não induziram a formação de halos de inibição de crescimento de *Salmonella*, diferente dos resultados aqui expressos.

Fink e Filip (2020) relataram valores superiores para halos de inibição da saponina de *Quillaja*, que demonstrou um potencial antibacteriano superior em comparação com o dodecil sulfato de sódio (SDS), um surfactante sintético. Além disso, exibiu uma zona de inibição mais ampla contra *E. coli* e *S. aureus* em comparação com outros surfactantes testados, todos com uma concentração de 12,5 mg/mL.

Chavasco *et al.* (2014) examinaram a atividade antimicrobiana e citotóxica de saponinas de extratos de plantas do Cerrado do Sul de Minas Gerais (*Bidens pilosa* Linné, *Eugenia pyriformis* Cambess, *Annona crassiflora* Mart, *Plinia cauliflora* Berg) nas concentrações 12,5, 25 e 50 mg/mL, destacando a formação de halos de inibição contra os microrganismos *E. coli*, *Salmonella* e *S. aureus*.

Lyrio (2016) investigou as saponinas do juá não modificadas e não observou a inibição do crescimento das bactérias testadas (*Salmonella choleraesuis* ATCC 10708, *Escherichia coli* ATCC 8739, *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 9027, *Staphylococcus*

aureus ATCC 6538 e *Bacillus subtilis* ATCC 6633) em nenhuma das concentrações avaliadas, que variaram de 0,02 a 40 mg/mL.

6. CONCLUSÃO

Neste estudo, foi demonstrada a viabilidade de extrair saponinas de resíduos de frutos do Cerrado e da Caatinga. As variáveis de processo, como tempo, temperatura e concentração de etanol, foram otimizadas, e os modelos preditivos desenvolvidos se mostraram estatisticamente satisfatórios. Tal abordagem resultou na produção de extratos com uma concentração máxima de saponinas de 2,57 mg/mL.

No que tange à partição das saponinas, a avaliação em um sistema aquoso bifásico (SAB) revelou que as variáveis de concentração de etanol, sulfato de amônia e temperatura não exerceram um efeito significativo nos intervalos investigados, o que impediu a otimização desse processo.

Em relação às propriedades funcionais, os extratos, nas concentrações testadas, apresentaram desempenho limitado em termos de capacidade de formação e estabilização de espuma e emulsão. Entretanto, a atividade biológica foi confirmada, com os extratos demonstrando propriedades antimicrobianas eficazes contra microrganismos de origem alimentar.

7. REFERÊNCIAS

ABDEL-SHAFY, H. I., MANSOUR, M. S. (2018). Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. *Egyptian journal of petroleum*, 27(4), 1275-1290. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.07.003>. Acesso em 03 Fev. 2022.

ADÃO, C. R., DA SILVA, B. P., PARENTE, J. P. (2011). A new steroidal saponin with antiinflammatory and antiulcerogenic properties from the bulbs of *Allium ampeloprasum* var. *porrum*. *Fitoterapia*, 82(8), 1175-1180.

AGILAH, N. M. N., ROVINA, K., FELICIA, W. X. L., VONNIE, J. M. (2023). A Review on the Potential Bioactive Components in Fruits and Vegetable Wastes as Value-Added Products in the Food Industry. *Molecules*, 28(6), 2631. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules28062631>. Acesso em 15 Mai. 2023.

AGRAWAL, RS, RANVEER, RC, RATHOD, NB, E NIRMAL, NP (2023). Fitoquímicos como ingredientes bioativos para alimentos funcionais. Em *Fronteiras Recentes de Fitoquímicos* (pp. 95-108). Elsevier.

AKBARI, S., ABDURAHMAN, NH E YUNUS, RM (2019). Otimização de saponinas, fenólicos e antioxidantes extraídos de sementes de feno-grego usando extração assistida por micro-ondas e metodologia de superfície de resposta como ferramenta de otimização. **Comptes Rendus Chimie**, 22 (11-12), 714-727. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.crci.2019.07.007>. Acesso em: 20 Set. 2023.

ALVES, A. N., NASCIMENTO, P. A., FONTAN, R. D. C. I., DE SOUSA JÚNIOR, E. C., BONOMO, P., VELOSO, C. M., & BONOMO, R. C. F. (2022). Extraction of protease from ora-pro-nobis (*Pereskia aculeata* Miller) and partial purification in polyethylene glycol+ sodium phosphate aqueous two-phase system. **Journal of Food Processing and Preservation**, 46(2), e16266. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/jfpp.16266>. Acesso em: 20 Mar. 2022.

AMORIM, Q. S. **Resíduos da indústria processadora de polpas de frutas: capacidade antioxidante e fatores antinutricionais**. 2016. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Ambientais, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga, 2016. Disponível em: < <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2019v12n2p591-608>>. Acesso em: 01 Fev. 2022

ADENUTSI, C. D. *et al.* Review on potential application of saponin-based natural surfactants for green chemical enhanced oil recovery: perspectives and progresses. **Energy and Fuels**, v. 37, n. 13, p. 8781–8823, 2023.

ANUÁRIO BRASILEIRO DE HORTI&FRUTI 2024. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2023. 94 p.: il. ISSN 2107-0897.

ASAE - American Society of Agricultural Engineers S313.2. St. Joseph: Agricultural Engineers Yearbook of Standards, 1998. p.820-1.

ASENJO, J. A.; ANDREWS, B. A. Aqueous two-phase systems for protein separation: Phase separation and applications. **Journal of Chromatography A**, [s. l.], v. 1238, p. 1–10, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2012.03.049>. Acesso em: 01 Fev. 2022.

ATKINS, P. W.; JONES, L. **Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**, Volume Único. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. Disponível em: <https://docero.com.br/doc/xv5sv0>. Acesso em: 31 Jan. 2022.

AWASTHI, MK, SARSAIYA, S., PATEL, A., JUNEJA, A., SINGH, RP, YAN, B., ... & TAHERZADEH, MJ (2020). Refinação de resíduos de biomassa para energia sustentável e bioprodutos: Uma avaliação da tecnologia, sua importância e aplicações estratégicas na bioeconomia circular. **Avaliações de Energia Renovável e Sustentável**, 127, 109876. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109876>. Acesso em: 24 Fev. 2022.

AZMIR, J., ZAIDUL, I. S. M., RAHMAN, M. M., SHARIF, K. M., MOHAMED, A., SAHENA, F., ... & OMAR, A. K. M. (2013). Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: A review. **Journal of food engineering**, 117(4), 426-436. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.01.014>. Acesso em: 20 Jun. 2023.

BANAT, IM, CARBOUE, Q., SAUCEDO-CASTANEDA, G., DE JESUS CAZARES-MARINERO, J. (2021). Biossurfactantes: A geração verde de especialidades químicas e produção potencial usando tecnologia de fermentação em estado sólido (SSF). **Tecnologia**

de recursos biológicos, 320, 124222. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124222>. Acesso em: 16 Mar. 2022.

BART, H. J. (2011). Extraction of natural products from plants—An introduction. **Industrial scale natural products extraction**, 1-25. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9783527635122.ch1>. Acesso em: 10 de Maio. 2023.

BASAI AHGARI A, GARDAS RL. Ionic liquid-based aqueous biphasic systems as sustainable extraction and separation techniques. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**. 2021 Feb 1;27:100423. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.100423>. Acesso em: 14 Mar. 2023.

BELCHIOR, DC, QUENTAL, MV, PEREIRA, MM, MENDONÇA, CM, DUARTE, IF, FREIRE, MG (2020). Desempenho de líquidos iônicos à base de tetraalquilamônio como constituintes de sistemas aquosos bifásicos na extração de ovalbumina e lisozima. **Tecnologia de Separação e Purificação**, 233, 116019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116019>. Acesso em: 20 Mar. 2022.

BEZERRA, K. G. O., RUFINO, RD, LUNA, JM e SARUBBO, LA (2018). Saponinas e biossurfactantes microbianos: Matérias-primas potenciais para formulação de cosméticos. **Progresso da biotecnologia**, 34 (6), 1482-1493. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/btpr.2682>. Acesso em 12 Mar. 2022.

BEZERRA, K. G., SILVA, I. G., ALMEIDA, F. C., RUFINO, R. D., & SARUBBO, L. A. (2021). Plant-derived biosurfactants: Extraction, characteristics and properties for application in cosmetics. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, 34, 102036. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102036>. Acesso em: 20 Out. 2023.

BI, L., TIAN, X., DOU, F., HONG, L., TANG, H., WANG, S. (2012). New antioxidant and antiglycation active triterpenoid saponins from the root bark of *Aralia taibaiensis*. *Fitoterapia*, 83(1), 234-240. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2011.11.002>. Acesso em: 30 Mai. 2023.

BÖTTCHER, S.; DRUSCH, S. Saponins - Self-assembly and behavior at aqueous interfaces. **Advances in Colloid and Interface Science** e 243 (2017) 105–113. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cis.2017.02.008>>. Acesso em: 08 Fev. 2022.

BOUHOUTE, M., TAARJI, N., VODO, S., KOBAYASHI, I., ZAHAR, M., ISODA, H., NEVES, M. A. (2020). Formation and stability of emulsions using crude extracts as natural emulsifiers from Argan shells. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, 591, 124536. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124536>. Acesso em: 20 Nov. 2023.

BOX, G. E. P.; WILSON, K. B. On the experimental attainment of optimum conditions. In: KOTZ, S.; JOHNSON, N. L. (Org.). *Breakthroughs in Statistics*. New York: Springer, 1992. p. 270-310.

BRASIL. Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 12 jun. 2022.

BRAZ, LM, SALAZAR-BRYAM, AM, ANDRADE, GSS, TAMBOURGI, EB (2023). Otimização e caracterização de ramnolipídeos produzidos por *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 9027 utilizando melão como substrato. *Jornal Mundial de Microbiologia e Biotecnologia*, 39 (2), 51. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11274-022-03494-z>. Acesso em: 15 Out. 2023.

BRUMANO, L.P.; SOLER, M.F.; DA SILVA, S.S. Recent advances in sustainable production and application of biosurfactants in Brazil and Latin America. **Industrial Biotechnology** v. 12, n. 1, p. 31-39, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1089/ind.2015.0027>>. Acesso em: 03 Fev. 2022.

BUSTOS, K. A. G., MUÑOZ, S. S., DA SILVA, S. S., ALARCON, M. A. F., DOS SANTOS, J. C., ANDRADE, G. J. C., & HILARES, R. T. (2024). Saponin Molecules from Quinoa Residues: Exploring Their Surfactant, Emulsifying, and Detergent Properties. *Molecules*, 29(20), 4928.

CAMPOS, DA, GÓMEZ-GARCÍA, R., VILAS-BOAS, AA, MADUREIRA, AR, & PINTADO, MM (2020). Gestão de subprodutos industriais de frutas – Um estudo de caso sobre abordagem de economia circular. **Moléculas**, 25 (2), 320. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules25020320>. Acesso em: 05 Mar. 2022

CAMPOS, J. M., STAMFORD, T. L., SARUBBO, L. A. (2014). Production of a bioemulsifier with potential application in the food industry. **Applied biochemistry and biotechnology**, 172, 3234-3252. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12010-014-0761-1>. Acesso em 15 Abr. 2022.

CAO, X., XIA, W., ZHAO, T., LI, X., ZHANG, P., QIN, X., BIAN, J. (2023). Study on the Dual Effects of MgCl₂ on the Characteristics of Foams Stabilized by Sodium Dodecyl Sulfate. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 62(42), 16977-16989. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c00633>. Acesso em: 30 Nov. 2023.

CARVALHO, M., SEGUNDO, VBDS, MEDEIROS, MGD, SANTOS, NAD, JUNIOR, LMC (2019). Pegada de carbono da geração de bioeletricidade a partir do bagaço de cana em uma indústria sucroalcooleira. **Jornal Internacional de Aquecimento Global**, 17 (3), 235-251. Disponível em: <https://doi.org/10.1504/IJGW.2019.098495>. Acesso em: 16 Mar. 2022.

CHAKRABORTY, A; SEN, K. Impact of pH and Temperature on Phase Diagrams of Different Aqueous Biphasic Systems. **Journal of Chromatography A**, v. 1433, p. 41-55, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021967316000480>. >Acesso em: 01 Fev. 2022.

CHAVASCO, J. M., FELIPHE, P. E., MUNIZ, B. H., CERDEIRA, C. D., LEANDRO, F. D., COELHO, L. F. L., DIAS, A. L. T. (2014). Evaluation of antimicrobial and cytotoxic activities of plant extracts from southern Minas Gerais cerrado. **Revista do Instituto de Medicina Tropical de São Paulo**, 56, 13-20. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0036-46652014000100002>. Acesso em: 14 Dez. 2023.

CHEIKH-ALI, S., FARMAN, M., LACAILLE-DUBOIS, M. A., SEMMAR, N. (2019). Structural organization of saponins in Caryophyllaceae. *Phytochemistry Reviews*, 18, 405-

441. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11101-019-09600-8>. Acesso em 20 Mar. 2023.

CHENG, T. C., LU, J. F., WANG, J. S., LIN, L. J., KUO, H. I., & CHEN, B. H. (2011). Antiproliferation effect and apoptosis mechanism of prostate cancer cell PC-3 by flavonoids and saponins prepared from *Gynostemma pentaphyllum*. **Journal of agricultural and food chemistry**, 59(20), 11319-11329. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/jf2018758>. Acesso em: 19 Jun. 2023.

CHEN, K., WANG, N., ZHANG, X., WANG, M., LIU, Y. E SHI, Y. (2023). Potenciais de adjuvantes à base de saponinas para vacinas nasais. **Fronteiras em Imunologia**, 14 , 1153042. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2023.1153042>. Acesso em: 25 Mar. 2023.

CHEN, W. C., JUANG, R. S., WEI, Y. H. (2015). Applications of a lipopeptide biosurfactant, surfactin, produced by microorganisms. **Biochemical Engineering Journal**, 103, 158-169. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2015.07.009>. Acessado em: 20 Abr. 2022.

CHEN, Y. F., YANG, C. H., CHANG, M. S., CIOU, Y. P., & HUANG, Y. C. (2010). Foam properties and detergent abilities of the saponins from *Camellia oleifera*. **International Journal of Molecular Sciences**, 11(11), 4417-4425. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijms11114417>. Acesso em 20 Jan. 2024.

CHEOK, C. Y., CHIN, N. L., YUSOF, Y. A., TALIB, R. A., LAW, C. L. (2013). Optimization of total monomeric anthocyanin (TMA) and total phenolic content (TPC) extractions from mangosteen (*Garcinia mangostana* Linn.) hull using ultrasonic treatments. **Industrial crops and Products**, 50, 1-7. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.07.024>. Acesso em: 20 Mai. 2023.

CHEOK, CY, SALMAN, HAK e SULAIMAN, R. (2014). Extração e quantificação de saponinas: uma revisão. **Pesquisa Alimentar Internacional**, 59 , 16-40. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.01.057>. Acesso em: 20 Set. 2023.

CHIGWEDERE, CM, WANASUNDARA, JP e SHAND, PJ (2022). Descritores sensoriais para leguminosas e ingredientes derivados de leguminosas: Rumo a um léxico e roda sensorial padronizados. **Revisões Abrangentes em Ciência Alimentar e Segurança Alimentar**, 21 (2), 999-1023. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12893>. Acesso em: 21 Mar. 2023.

CHOWDHURY, S., RAKSHIT, A., ACHARJEE, A., SAHA, B. (2019). Novos anfifílicos e suas aplicações para diversos fins com especial ênfase em surfactantes poliméricos. **QuímicaSelect** , 4 (23), 6978-6995. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/slct.201901160>. Acesso em: 23 Jul. 2022.

CIBULSKI, S. *et al.* ISCOM-Matrices nanoformulation using the raw aqueous extract of *Quillaja lancifolia* (Q. brasiliensis). **BioNanoScience**, v. 12, n. 4, p. 1166–1171, ago. 2022.

CLAUSER, NM, GONZÁLEZ, G., MENDIETA, CM, KRUYENISKI, J., AREA, MC, VALLEJOS, ME (2021). Resíduos de biomassa como matéria-prima sustentável para

energia e combustíveis. **Sustentabilidade**, 13 (2), 794. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13020794>. Acesso em: 03 Mar. 2022.

CLSI. Clinical and Laboratory Standards Institute. **Performance Standards for Antimicrobial Disk Susceptibility Tests** (2015).

COELHO, LMG e LANGE, LC (2018). Aplicação da avaliação do ciclo de vida para apoiar estratégias de gestão de resíduos ambientalmente sustentáveis no Brasil. **Recursos, Conservação e Reciclagem**, 128, 438-450. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.09.026>. Acesso em 03 Mar. 2022.

CUI, H., CAO, G., ZHU, S., MU, J., LIU, X., CHOU, X. (2022). Foaming performance evaluation of frother emulsions in the slime flotation: Foamability, foam stability, and foam flow. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, 638, 128310. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.128310>. Acesso em: 02 Dez. 2023.

DAHMOUNE, B., HOUMA-BACHARI, F., CHIBANE, M., AKROUR-AISSOU, C., GUÉGAN, JP, VIVES, T., HAUCHARD, D. (2021). Extração assistida por microondas de saponinas bioativas da estrela do mar *Echinaster sepositus*: Otimização por metodologia de superfície de resposta e comparação com ultrassom e extração convencional por solvente. **Engenharia Química e Intensificação de Processos de Processamento**, 163, 108359. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108359>. Acesso em 15 Mar. 2022.

DAMIANI, C.; ALMEIDA, T.L.; COSTA, N.V.; MEDEIROS, N.X.; SILVA, A.G.M.; LAGE, M.E.; BECKER, F.S. Perfil de ácidos graxos e fatores antinutricionais de amêndoas de pequi crua e torrada. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. v.43, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pat/a/LHCw8PV6PkcPvSjstr9rFp/?lang=pt> Acesso em 01 Fev. 2022.

DAMODARAN, S., ARORA, A. (2005). Off-flavor precursors in soy protein isolate and novel strategies for their removal. **Annual Review of Food Science and Technology**, 4, 327-346. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-food-030212-182650>. Acessado em: 20 Nov. 2023.

DARADMARE, S. e LEE, CS (2022). Progresso recente na síntese de gotículas bifásicas totalmente aquosas usando abordagens microfluídicas. **Colóides e Superfícies B: Biointerfaces**, 112795. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2022.112795>. Acesso em 15 Jul. 2022.

DA SILVA, C. G. F. **Estudo de técnicas de extração de saponinas do fruto de erva mate** (*Ilex paraguariensis* St. Hill). p. 107, 2016.

DA SILVEIRA LEITE, D., CARVALHO, PLG, DE LEMOS, LR, MAGESTE, AB, RODRIGUES, GD (2019). Recuperação hidrometalúrgica de Zn (II) e Mn (II) de resíduos de baterias alcalinas empregando sistema aquoso bifásico. **Tecnologia de Separação e Purificação**, 210, 327-334. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.07.038>. Acesso em: 15 Mar. 2022.

DAWID, C. e HOFMANN, T. (2012). Caracterização estrutural e sensorial de saponinas esteróides de sabor amargo de lanças de aspargos (*Asparagus officinalis* L.). **Revista de**

química agrícola e alimentar, 60 (48), 11889-11900. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/jf304085j>. Acesso em: 20 Mar. 2023.

DE CAMPOS, VAF, SILVA, VB, CARDOSO, JS, BRITO, PS, TUNA, CE, & SILVEIRA, JL (2021). Uma revisão da gestão de resíduos no Brasil e em Portugal: a transformação de resíduos em energia como caminho para o desenvolvimento sustentável. **Energia Renovável**, 178, 802-820. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.107>. Acesso em 03 Mar. 2022.

DE CASTRO, T. L. A., DOS SANTOS, J. V. D. A., DE OLIVEIRA, K. M. P., CARDOSO, C. A. L. (2023). Peels of the fruits of *Campomanesia guazumifolia* (cambess) O. berg and *Campomanesia sessiliflora* (O. Berg) mattos: Residues with cosmetic and food potentials. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 35, 101198. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100945>. Acesso em 15 Mai. 2023.

DEL HIERRO, JN, CASADO-HIDALGO, G., REGLERO, G., MARTIN, D. (2021). A hidrólise de extratos ricos em saponinas de feno-grego e quinoa melhora a atividade inibitória da lipase pancreática e o efeito hipocolesterolêmico. **Química Alimentar**, 338, 128113. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128113>. Acesso em: 26 Mar. 2023.

DE KONING, S., JANSSEN, H. G., BRINKMAN, U. A. T. (2009). Modern methods of sample preparation for GC analysis. **Chromatographia**, 69, 33-78. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1365/s10337-008-0937-3>. Acesso em: 18 Mai. 2023.

DE SOUZA, CG, DE MOURA, AKB, DA SILVA, JNP, SOARES, KO, DA SILVA, JVC, VASCONCELOS, PC (2019). Fatores antinutricionais de importância na nutrição animal: Composição e função dos compostos secundários. **Pubvet**, 13, 166. Disponível em: <https://doi.org/10.31533/pubvet.v13n5a327.1-19>. Acesso em: 20 Mar. 2023

DICKINSON, E. (2009). Hidrocolóides como emulsionantes e estabilizadores de emulsões. **Hidrocolóides alimentares**, 23 (6), 1473-1482. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2008.08.005>. Acesso em: 15 Out. 2023.

DINI, I., TENORE, G. C., & DINI, A. (2009). Saponins in Ipomoea batatas tubers: Isolation, characterization, quantification and antioxidant properties. **Food Chemistry**, 113(2), 411-419. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.07.053>. Acesso em: 10 Jan. 2022.

DONG, S., YANG, X., ZHAO, L., ZHANG, F., HOU, Z., & XUE, P. (2020). Antibacterial activity and mechanism of action saponins from *Chenopodium quinoa* Willd. husks against foodborne pathogenic bacteria. **Industrial crops and products**, 149, 112350. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112350>. Acesso em: 15 Dez. 2023.

DOS SANTOS, R. E., DOS SANTOS, I. F. S., BARROS, R. M., BERNAL, A. P., TIAGO FILHO, G. L., DA SILVA, F. D. G. B. (2019). Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: An economic and energy comparative analysis. **Journal of environmental management**, 231, 198-206. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.015>. Acesso em: 03 Mar. 2022.

EBRAHIMI, A., PAZUKI, G., MOZAFFARIAN, M., AHSÁIE, FG E ABEDINI, H. (2023). Separação e purificação de C-ficocianina de *Spirulina platensis* usando sistemas aquosos bifásicos baseados em copolímeros termossensíveis tribloco. **Tecnologia de Alimentos e Bioprocessos**, 1-16. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-023-03057-6>. Acesso em: 24 Mai. 2022.

ELIK, A., YANIK, DK, ISTANBULLU, Y., GUZELSOY, NA, YAVUZ, A., GOGUS, F. (2019). Estratégias para reduzir perdas pós-colheita de frutas e hortaliças. **Estratégias**, 5 (3), 29-39.

EL-HAMAMSY, S.; EL-KHAMISSI, H. Phytochemicals, antioxidant activity and identification of phenolic compounds by HPLC of pomegranate (*Punica granatum* L.) peel extracts. **Journal of Agricultural Chemistry and Biotechnology**, v. 11, n. 4, p. 79–84, 2020.

ELZOGHBIY, A. Sh. *et al.* Phytochemical analysis of pomegranate peel extract (PPE) with the evaluation of its efficacy as anti-rancidity of oils, anti-bacterial and anti-candida agent. **Al-Azhar Medical Journal**, Cairo, v. 51, n. 3, p. 1851–1866, 2022.

ESPARZA, I., JIMÉNEZ-MORENO, N., BIMBELA, F., ANCÍN-AZPILICUETA, C., GANDÍA, LM (2020). Gestão de resíduos de frutas e vegetais: abordagens convencionais e emergentes. *Jornal de gestão ambiental*, 265, 110510. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110510>. Acesso em: 10 Mar. 2022.

FAMEAU, A. L., BINKS, B. P. (2021). Aqueous and oil foams stabilized by surfactant crystals: **New concepts and perspectives**. **Langmuir**, 37(15), 4411-4418. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c00410>. Acesso em: 20 Nov. 2023.

FARIAS, C. B. B., ALMEIDA, F. C., SILVA, I. A., SOUZA, T. C., MEIRA, H. M., RITA DE CÁSSIA, F., SARUBBO, L. A. (2021). Production of green surfactants: Market prospects. **Electronic Journal of Biotechnology**, 51, 28-39. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2021.02.002>. Acesso em: 14 Mar. 2022.

FENG, YH, ZHANG, XP, LI, JY e GUO, XD (2020). Como uma micela é formada a partir de polímeros anfífilos em um processo de diálise: insights de estudos mesoscópicos. **Cartas de Física Química**, 754, 137711. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2020.137711>. Acesso em: 20 Mar. 2023.

FERNANDES, LMG, CARNEIRO-DA-CUNHA, MN, SILVA, JDC, PORTO, ALF, PORTO, TS (2020). "Purificação e caracterização de uma nova protease URM 0269 de *Aspergillus heteromorphus* extraída por sistemas aquosos bifásicos PEG/citrato". **Jornal de Líquidos Moleculares**, 317, 11395. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2020.113957>. Acesso em 28 Mai. 2022.

FILARDI, FLR, BARROS, FD, BAUMGRATZ, JFA, BICUDO, CE, CAVALCANTI, TB, COELHO, MAN, CAVALHEIRO, L. (2018). Flora Brasileira 2020: inovação e colaboração para cumprir a Meta 1 da Estratégia Global para Conservação de Plantas (GSPC). **Rodriguésia**, 69, 1513-1527.

FLECK, JD, BETTI, AH, DA SILVA, FP, TROIAN, EA, OLIVARO, C., FERREIRA, F., VERZA, SG (2019). Saponinas de *Quilaja saponaria* e *Quilaja brasiliensis*:

características químicas e atividades biológicas particulares. *Moléculas*, 24 (1), 171. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules24010171>. Acesso em: 23 Mar. 2023.

FOEGEDING, E. A., DAVIS, J. P. (2011). Food protein functionality: A comprehensive approach. *Food hydrocolloids*, 25(8), 1853-1864. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.05.008>. Acesso em: 20 Nov. 2023.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). **Desperdício de alimentos tem consequências no clima, na água, na terra e na biodiversidade**. Disponível em: <<http://www.fao.org.br/dacatb.asp>> Acesso em: 25 de janeiro de 2022.

FORMANN, S., HAHN, A., JANKE, L., STINNER, W., STRÄUBER, H., LOGROÑO, W., NIKOLAUSZ, M. (2020). Além da produção de açúcar e etanol: oportunidades de geração de valor através dos resíduos da cana-de-açúcar. *Fronteiras na Pesquisa Energética*, 8, 579577. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.579577>. Acesso em: 10 Mar. 2022.

FOUBERT, K., CUYCKENS, F., VLEESCHOUWER, K., THEUNIS, M., VLIETINCK, A., PIETERS, L., APERS, S. (2010). Rapid quantification of 14 saponins of *Maesa lanceolata* by UPLC–MS/MS. *Talanta*, 81(4-5), 1258-1263. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2010.02.018>. Acesso em: 01 Jun. 2023.

FREIRE, M. G., CLAUDIO, A. F. M., ARAUJO, J. M., COUTINHO, J. A., MARRUCHO, I. M., LOPES, J. N. C., REBELO, L. P. N. (2012). Aqueous biphasic systems: a boost brought about by using ionic liquids. *Chemical Society Reviews*, 41(14), 4966-4995. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/C2CS35151J>. Acesso em: 23 Out. 2023.

FREITAS, LC, BARBOSA, JR, DA COSTA, ALC, BEZERRA, FWF, PINTO, RHH, DE CARVALHO JUNIOR, RN (2021). Dos resíduos à indústria sustentável: Como os resíduos agroindustriais podem ajudar no desenvolvimento de novos produtos?. *Recursos, Conservação e Reciclagem*, 169, 105466. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105466>. Acesso em: 20 Fev. 2022.

FU, Y., YAO, J., SU, H., LI, T. (2022). Effects of calcium chelators on colloidal stability and interfacial activity of egg yolk granules. *Food Biophysics*, 17(3), 302-313. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11483-022-09721-2>. Acesso em: 20 Nov. 2023.

GEORGIEVA, D., SCHMITT, V., LEAL-CALDERON, F., LANGEVIN, D. (2009). Sobre o possível papel da elasticidade superficial na estabilidade da emulsão. *Langmuir*, 25 (10), 5565-5573. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/la804240e>. Acesso em: 15 Out. 2023.

GHASEMI, H., DARJANI, S., MAZLOOMI, H., MOZAFFARI, S. (2020). Preparação de emulsões múltiplas estáveis usando emulsificantes de qualidade alimentar: avaliando os efeitos da concentração do emulsificante, proporção de fase A/O e processo de emulsificação. *Ciências Aplicadas SN*, 2, 1-9. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-020-03879-5>. Acesso em: 21 Nov. 2023.

GHESTI, G. F., SILVEIRA, E. A., GUIMARÃES, M. G., EVARISTO, R. B., COSTA, M. (2022). Towards a sustainable waste-to-energy pathway to pequi biomass residues:

Biochar, syngas, and biodiesel analysis. **Waste Management**, 143, 144-156. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.02.022>. Acesso em: 13 Abr. 2022.

GÓMEZ-GARCÍA, R., CAMPOS, D. A., AGUILAR, C. N., MADUREIRA, A. R., PINTADO, M. (2021). Valorisation of food agro-industrial by-products: From the past to the present and perspectives. **Journal of Environmental Management**, 299, 113571. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113571>. Acesso em: 27 Mar. 2022.

GRILO, A. L., RAQUEL AIRES-BARROS, M., & AZEVEDO, A. M. (2016). Partitioning in aqueous two-phase systems: fundamentals, applications and trends. **Separation & Purification Reviews**, 45(1), 68-80. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15422119.2014.983128>. Acesso em: 15 Jan. 2016.

GÜÇLÜ-ÜSTÜNDAĞ, Ö., MAZZA, G. (2007). Saponins: properties, applications and processing. **Critical reviews in food science and nutrition**, 47(3), 231-258.

GUERRA, F., SEPÚLVEDA, S. (2020). Produção de saponinas de espécies do gênero *Quilaja*. Uma visão sobre suas aplicações e biologia. **Ciência Agrícola**, 78. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2019-0305>. Acesso em: 24 Mar. 2023.

HA, T. J., LEE, B. W., PARK, K. H., JEONG, S. H., KIM, H. T., KO, J. M., LEE, J. H. (2014). Rapid characterisation and comparison of saponin profiles in the seeds of Korean Leguminous species using ultra performance liquid chromatography with photodiode array detector and electrospray ionisation/mass spectrometry (UPLC–PDA–ESI/MS) analysis. **Food Chemistry**, 146, 270-277. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.09.051>. Acesso em: 01 Jun. 2023.

HADIDI, M., IBARZ, A. e PAGAN, J. (2020). Otimização e estudo cinético da extração ultrassônica de saponinas totais de alfafa (*Medicago sativa*) e sua bioacessibilidade utilizando a metodologia de superfície de resposta. **Química Alimentar**, 309, 125786. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125786>. Acesso em: 15 Mar. 2022.

HAGAR, H. S., JUFAR, S. R., LEE, J. H., AL-MAHBASHI, N., ALAMEEN, M. B., KWON, S., RATHNAYAKE, U. (2023). Chitin nanocrystals: A promising alternative to synthetic surfactants for stabilizing oil-in-water emulsions. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, 100503. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100503>. Acesso em: 15 Out. 2023.

HAMTA, A., DEHGHANI, M. R. (2017). Application of polyethylene glycol based aqueous two-phase systems for extraction of heavy metals. **Journal of Molecular Liquids**, 231, 20-24. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.01.084>. Acesso em 15 Mai. 2022.

HE, A., DONG, B., FENG, X., & YAO, S. (2018). Extraction of bioactive ginseng saponins using aqueous two-phase systems of ionic liquids and salts. **Separation and Purification Technology**, 196, 270-280. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.05.041>. Acesso em: 20 Jun. 2023.

HE, H., XU, J., XU, Y., ZHANG, C., WANG, H., HE, Y., YUAN, D. (2012). Cardioprotective effects of saponins from *Panax japonicus* on acute myocardial ischemia against oxidative stress-triggered damage and cardiac cell death in rats. **Journal of ethnopharmacology**, 140(1), 73-82. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jep.2011.12.024>. Acesso em: 02 Jun. 2023.

HENG, M. Y., TAN, S. N., YONG, J. W. H., ONG, E. S. (2013). Emerging green technologies for the chemical standardization of botanicals and herbal preparations. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, 50, 1-10. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2013.03.012>. Acesso em: 15 Mai. 2023.

HO, TM, LE, THA, YAN, A., BHANDARI, BR., BANSAL, N. (2019). Propriedades espumantes e estrutura espumosa do leite durante o armazenamento. **Pesquisa alimentar internacional**, 116, 379-386. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.08.051>. Acesso em: 30 Nov. 2023.

HOLMBERG, K. (2001). Surfactantes naturais. **Opinião atual em Colloid & Interface Science**, 6 (2), 148-159. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1359-0294\(01\)00074-7](https://doi.org/10.1016/S1359-0294(01)00074-7). Acesso em: 12 Mar. 2022.

HUHMANN, D. V., BERHOW, M. A., & SUMNER, L. W. (2005). Quantification of saponins in aerial and subterranean tissues of *Medicago truncatula*. **Journal of agricultural and food chemistry**, 53(6), 1914-1920. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/jf0482663>. Acesso em: 18 Out. 2023.

HU, T., GUO, YY, ZHOU, QF, ZHONG, XK, ZHU, L., PIAO, JH., E JIANG, JG (2012). Otimização da extração assistida por ultrassom de saponinas totais de *Eclipta prostrata* L. usando metodologia de superfície de resposta. **Jornal de ciência alimentar**, 77 (9), C975-C982. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2012.02869.x>. Acesso em: 20 Set. 2023.

HU, X., MENG, Z. (2023). An overview of edible foams in food and modern cuisine: Destabilization and stabilization mechanisms and applications. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, 23(1), 1-30. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13284>. Acesso em: 25 Nov. 2023.

HU, Y., CUI, X., ZHANG, Z., CHEN, L., ZHANG, Y., WANG, C., XIONG, Y. (2018). Optimisation of ethanol-reflux extraction of saponins from steamed *Panax notoginseng* by response surface methodology and evaluation of hematopoiesis effect. **Molecules**, 23(5), 1206. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules23051206>. Acesso em: 20 Set. 2023.

HU, Y. T., TING, Y., HU, J. Y., HSIEH, S. C. (2017). Techniques and methods to study functional characteristics of emulsion systems. **Journal of food and drug analysis**, 25(1), 16-26. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2016.10.021>. Acesso em: 20 Nov. 2023

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2019. **Biomass e sistema costeiro-marinho do Brasil**, 45. v. Rio de Janeiro: IBGE, 2019,168p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2020. **Produção agrícola municipal 2020**. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/94/pam_2020_v45_br.pdf. Acesso em: 26 abr. 2023.

JADHAV, D., REKHA, B. N., GOGATE, P. R., RATHOD, V. K. (2009). Extraction of vanillin from vanilla pods: A comparison study of conventional soxhlet and ultrasound assisted extraction. **Journal of food engineering**, 93(4), 421-426. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.02.007>. Acesso em: 20 Mar. 2023.

JIANG, J. *et al.* Separation of soybean saponins from soybean meal by a technology of foam fractionation and resin adsorption. **Preparative Biochemistry and Biotechnology**, v. 46, n. 4, p. 346–353, 2016.

JIMÉNEZ-VELÁZQUEZ, P., VALLE-GUADARRAMA, S., ALIA-TEJACAL, I., SALINAS-MORENO, Y., GARCÍA-CRUZ, L., PÉREZ-LÓPEZ, A., & GUERRA-RAMÍREZ, D. (2020). Separation of bioactive compounds from epicarp of ‘Hass’ avocado fruit through aqueous two-phase systems. **Food and Bioproducts Processing**, 123, 238-250. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.07.004>. Acesso em: 22 Nov. 2023.

JOHNSON, P., TRYBALA, A., STAROV, V., PINFIELD, V. J. (2021). Effect of synthetic surfactants on the environment and the potential for substitution by biosurfactants. **Advances in colloid and interface science**, 288, 102340. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/coatings10020143>. Acesso em: 15 Abr. 2022.

JOLLY, A., KIM, H., MOON, J. Y., MOHAN, A., LEE, Y. C. (2023). Exploring the imminent trends of saponins in personal care product development: **A review. Industrial Crops and Products**, 205, 117489. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117489>. Acesso em: 30 Mai. 2023.

JUANG, Y. P., LIANG, P. H. (2020). Biological and pharmacological effects of synthetic saponins. **Molecules**, 25(21), 4974. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules25214974>. Acesso em: 20 Mar. 2022.

KACZEREWKA, O., MARTINS, R., FIGUEIREDO, J., LOUREIRO, S., & TEDIM, J. (2020). Environmental behaviour and ecotoxicity of cationic surfactants towards marine organisms. **Journal of hazardous materials**, 392, 122299. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122299>. Acesso em: 15 Mar. 2022.

KEE, PE, NG, TC, LAN, JCW E NG, HS (2020). Desenvolvimento recente de sistema bifásico aquoso não convencional: características, mecanismos e aplicações. **Revisões críticas em biotecnologia**, 40 (4), 555-569. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/07388551.2020.1747388>. Acesso em 15 Jan. 2023.

KEZWON, A., & WOJCIECHOWSKI, K. (2014). Interaction of Quillaja bark saponins with food-relevant proteins. **Advances in colloid and interface science**, 209, 185-195. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.04.005>. Acesso em: 20 Set. 2022.

KLANOVICZ, N., WARKEN, A., PALIGA, L., CAMARGO, AF, SCAPINI, T., BUFFON, JG, FONGARO, G., TEIXEIRA, ACSC, TREICHEL, H. (2021). Procedimento de uma etapa para concentração de peroxidase, separação de corante e remoção de cor por sistema aquoso de duas fases. **Ciência Ambiental e Pesquisa sobre Poluição**, 28, 9097-9106. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/S11356-020-11412-9/FIGURAS/6>. Acesso em 23 Mai. 2022.

KÖSE, M. D.; BAYRAKTAR, O. Extraction of saponins from soapnut (*Sapindus mukorossi*) and their antimicrobial properties. **World Journal of Research and Review**, v. 2, n. 5, p. 89–93, maio 2016.

KUMAR, S., FOROOZESH, J. (2021). Chitin nanocrystals based complex fluids: A green nanotechnology. **Carbohydrate polymers**, 257, 117619. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117619>. Acesso em: 15 Out. 2023.

KUNDU, P., AGRAWAL, A., MATEEN, H., MISHRA, IM (2013). Estabilidade da macroemulsão óleo em água com surfactante aniônico: Efeito dos eletrólitos e da temperatura. **Ciência da Engenharia Química**, 102, 176-185. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.07.050>. Acesso em: 21 Nov. 2023.

KWON, J.-H.; BE ÄLANGER, J. M. R.; PARE Ä, J. R. J. Optimization of microwave-assisted extraction (MAP)² for ginseng components by response surface methodology. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, p. 1807–1810, 2003.

LAZO, J., TAPIA, J., & GUERRA, F. P. (2025). Cadmium and Copper Stress Responses in Soapbark Tree (*Quillaja saponaria*): Effects on Growth, Metal Accumulation, Saponin Concentration, and Gene Expression. **Plants**, 14(5), 709.

LEE, N. R., CORTES-CLERGET, M., WOOD, A. B., LIPPINCOTT, D. J., PANG, H., MOGHADAM, F. A., ... & LIPSHUTZ, B. H. (2019). Coolade. A Low-Foaming Surfactant for Organic Synthesis in Water. **ChemSusChem**, 12(13), 3159-3165. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/cssc.201900369>. Acesso em: 20 Jun. 2023.

LEE, S. T., MITCHELL, R. B., WANG, Z., HEISS, C., GARDNER, D. R., & AZADI, P. (2009). Isolation, characterization, and quantification of steroidal saponins in switchgrass (*Panicum virgatum* L.). **Journal of agricultural and food chemistry**, 57(6), 2599-2604. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/jf803907y>. Acesso em: 20 Out. 2023.

LI, X., LI, K., SHEN, Y., NIU, F., FU, Y. (2016). Influence of pure gum on the physicochemical properties of whey protein isolate stabilized oil-in-water emulsions. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, 504, 442-448. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.05.046>. Acesso em: 02 Dez. 2023.

LIAO, Y., LI, Z., ZHOU, Q., SHENG, M., QU, Q., SHI, Y., SHI, X. (2021). Saponin surfactants used in drug delivery systems: A new application for natural medicine components. **International journal of pharmaceutics**, 603, 120709. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2021.120709>. Acesso em 15 Fev. 2022.

LIGOR, M., RATIU, I. A., KIEŁBASA, A., AL-SUOD, H., BUSZEWSKI, B. (2018). Extraction approaches used for the determination of biologically active compounds (cyclitols, polyphenols and saponins) isolated from plant material. **Electrophoresis**, 39(15), 1860-1874. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/elps.201700431>. Acesso em: 01 Jun. 2023.

LIMA, J. P. DE; NUNES, E. E.; BORGES, L. A.; SACZK, A. A.; PINHEIRO, G. L.; BORGES, P. R. S.; VILAS BOAS, E. V. DE B. Physicochemical characteristics and bioactive compounds of three puçá (*Mouriri pusa* Gardner) varieties, an underexploited

fruit from the Brazilian Cerrado. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 45, n. 1, p. e61765, 20 Dec. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v45i1.61765>. Acesso em: 13 Abr. 2023.

LIN, J., HAN, C., WEN, P. (2021). Construction of a novel reversible aqueous biphasic system for water purification. **Separation and Purification Technology**, 255, 117752. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117752>. Acesso em 10 Fev. 2022.

MADEIRA JR, JV, CONTESINI, FJ, CALZADO, F., RUBIO, MV, ZUBIETA, MP, LOPES, DB, DE MELO, RR (2017). Resíduos agroindustriais e enzimas microbianas: um panorama sobre a bioconversão ecologicamente correta em produtos de alto valor agregado. **Biotecnologia de enzimas microbianas**, 475-511.

MAINKAR, & JOLLY. (2000). Evaluation of commercial herbal shampoos. **International journal of cosmetic science**, 22(5), 385-391. Disponível em: <https://doi.org/10.1046/j.1467-2494.2000.00047.x>. Acesso em 20 Jan. 2024.

MAJEED, T., SØLLING, TI e KAMAL, MS (2020). Estabilidade de espuma: A interação entre sal, surfactante e concentração crítica de micelas. **Jornal de Ciência e Engenharia de Petróleo**, 187, 106871. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.petro.2019.106871>. Acesso em 20 Mar. 2022.

MASSARWEH, O. e ABUSHAIKHA, AS (2020). O uso de surfactantes na recuperação avançada de petróleo: uma revisão dos avanços recentes. **Relatórios de Energia**, 6, 3150-3178. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.009>. Acesso em: 15 Mar. 2022.

MAZZA, PHS, JAEGER, SMPL, SILVA, FDL, LIMA, AGVO, DA HORA, DC, BARBOSA, AM., OLIVEIRA, RL (2022). Efeitos da inclusão dietética de resíduo seco de polpa de umbu (*Spondias tuberosa* Arr. Cam) sobre consumo, comportamento ingestivo, digestibilidade, balanço de nitrogênio e pH ruminal em ovinos. **Journal of Animal and Feed Sciences**, 31 (1), 55-64. Disponível em: <https://doi.org/10.22358/jafs/146396/2022>. Acesso em: 12 Mar. 2022.

MCCLEMENTS, D. J. (2007). Critical review of techniques and methodologies for characterization of emulsion stability. **Critical reviews in food science and nutrition**, 47(7), 611-649. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10408390701289292>. Acesso em: 20 Nov. 2023.

McClements, DJ, Bai, L. e Chung, C. (2017). Avanços recentes na utilização de emulsionantes naturais para formar e estabilizar emulsões. Revisão anual de ciência e tecnologia de alimentos, 8, 205-236. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-food-030216-030154>. Acesso em: 14 Jan. 2024

MCCLEMENTS, D. J. (2004). Food emulsions: principles, practices, and techniques. **CRC press**. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9781420039436>. Acesso em: 30 Out. 2023.

MENG, J., WANG, Y., ZHOU, Y., CHEN, J., WEI, X., NI, R., E XU, F. (2019). Desenvolvimento de diferentes sistemas bifásicos aquosos com solvente eutético profundo para a separação de proteínas. *RSC avança*, 9 (25), 14116-14125. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/C9RA00519F>. Acesso em: 12 Abr. 2022.

MIGABO, H., MUNYESHYAKA, E., IZERE, C., YADUFASHIJE, C., NIYONZIMA, F. N., & HABYARIMANA, T. (2023). Evaluation of phytochemical profile and antimicrobial activity of *Tragia brevipes* extracts against pathogenic bacteria. **Journal of Advanced Biotechnology and Experimental Therapeutics**. Disponível em: <https://doi.org/10.5455/jabet.2023.d113>. Acesso em: 14 Dez. 2023.

MITRU, D., LUCACIU, I., NITA-LAZAR, M., COVALIU, CI, NECHIFOR, G., MOGA, IC., PAUN, I. (2020). Impacto de diversas classes de surfactantes na comunidade de microrganismos utilizados no tratamento de biodegradação de ETes. Disponível em: <http://hdl.handle.net/123456789/1694>. Acesso em: 20 Mai. 2023.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. 2020. Biomass/Caatinga . Disponível em: <https://www.mma.gov.br/biomass/caatinga>. Acessado em: 15 Out. 2023

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. John Wiley & Sons, Inc. Arizona State University, 10. ed. Arizona, 2019.

MONTGOMERY, D. C. Design and analysis of experiments. 5. ed. New York: Wiley, 2001. 699 p.

MORADI, F., & SHAHROUZI, J. R. (2020). Phase equilibrium and partitioning of cephalosporins (cephalexin, cefazolin, cefixime) in aqueous two-phase systems based on carbohydrates (glucose, fructose, sucrose, maltose)/acetonitrile. **Fluid Phase Equilibria**, 507, 112388. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2019.112388>. Acesso em: 15 Jan. 2024.

MOSTAFA, A., SUDISHA, J., EL-SAYED, M., ITO, S. I., IKEDA, T., YAMAUCHI, N., SHIGYO, M. (2013). Aginoside saponin, a potent antifungal compound, and secondary metabolite analyses from *Allium nigrum* L. **Phytochemistry Letters**, 6(2), 274-280. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.phytol.2013.03.001>. Acesso em: 03 Jun. 2023.

MUSTAFA, A., & TURNER, C. (2011). Pressurized liquid extraction as a green approach in food and herbal plants extraction: A review. **Analytica chimica acta**, 703(1), 8-18. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2011.07.018>. Acesso em: 25 Mai. 2023.

NAGTODE, VS, CARDOZA, C., YASIN, HKA, MALI, SN, TAMBE, SM, ROY, P., PRATAP, AP (2023). Surfactantes Verdes (Biosurfactantes): Um Substituto Livre de Petróleo para a Sustentabilidade— Comparação, Aplicações, Mercado e Perspectivas Futuras. **ACS ω mega**, 8 (13), 11674-11699. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00591>. Acesso em: 15 Out. 2023.

NAINEGALI, B. S., IYYASWAMI, R., BELUR, P. D. (2019). Simultaneous extraction of four different bioactive compounds from *Garcinia indica* and their enrichment using Aqueous Two-Phase Systems. **Food and bioproducts processing**, 114, 185-195. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.01.002>. Acesso em: 21 Nov. 2023.

NITSCHKE, M.; PASTORE, G. M. **Biosurfactantes: Propriedades e Aplicações**. 2002. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422002000500013&script=sci_arttext. Acesso em 02 Fev. de 2022

NGUYEN, V. T. *et al.* Microwave-assisted extraction for optimizing saponin yield and antioxidant capacity from cacao pod husk (*Theobroma cacao* L.). **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 45, p. e15134, 2021.

NIZIOL-ŁUKASZEWSKA, Z., BUJAK, T. (2018). Saponins as natural raw materials for increasing the safety of bodywash cosmetic use. **Journal of Surfactants and Detergents**, 21(6), 767-776. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jsde.12168>. Acesso em: 15 Set. 2023

NOROUZPOUR, M., AZDARPOUR, A., NABIPOUR, M., SANTOS, RM, MANSHAD, AK, IGLAUER, S., KESHAVARZ, A. (2023). Planta de beterraba vermelha como uma nova fonte de surfactante natural combinada com 'Água Inteligente' para fins de EOR em reservatórios carbonáticos. **Jornal de Líquidos Moleculares**, 370, 121051. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.121051>. Acesso em: 20 Set. 2023.

NCUBE, B., NGUNGE, V. N. P., FINNIE, J. F., & VAN STADEN, J. (2011). A comparative study of the antimicrobial and phytochemical properties between outdoor grown and micropropagated *Tulbaghia violacea* Harv. plants. **Journal of Ethnopharmacology**, 134(3), 775-780. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jep.2011.01.039>. Acesso em: 26 Out. 2023.

OJHA, K. S., AZNAR, R., O'DONNELL, C., TIWARI, B. K. (2020). Ultrasound technology for the extraction of biologically active molecules from plant, animal and marine sources. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, 122, 115663. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.115663>. Acesso em: 10 Set. 2023.

OLKOWSKA, E.; RUMAN, M.; POLKOWSKA, Z. Occurrence of Surface Active Agents in the Environment. **Journal of Analytical Methods in Chemistry**. v. 2014, 2014. Disponível em: < <https://doi.org/10.1155/2014/769708>. Acesso em: 29 Jan. 2022.

ONIHA, M. I., AHUEKWE, E. F., & AKINPELU, S. O. (2023). Phytochemical Contents of Essential Oils from *Cymbopogon* Species: A Tropical Medicinal Plant. In *Tropical Plant Species and Technological Interventions for Improvement*. **IntechOpen**. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/83095>. Acesso em: 20 Out. 2023.

OSBOURN, ANNE; GOSS, REBECCA J M; FIELD, ROBERT A. The saponins-polar isoprenoids with important and diverse biological activities. **Natural Product Reports**, v. 28, n. 7, p. 1261–1268, 2011.

OSORIO, LLDR, FLÓREZ-LÓPEZ, E., GRANDE-TOVAR, CD (2021). O potencial de perdas e desperdícios agroalimentares selecionados para contribuir para uma economia circular: aplicações nas indústrias alimentar, cosmética e farmacêutica. **Moléculas**, 26 (2), 515. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules26020515>. Acesso em: 15 Mar. 2022.

OZTURK, B. e MCCLEMENTS, DJ (2016). Progresso em emulsificantes naturais para utilização em emulsões alimentares. *Opinião Atual em Ciência de Alimentos*, 7, 1-6. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2015.07.008>. Acesso em: 18 Jan. 2024.

PAL, S.; MUSHTAQ, M.; BANAT, F.; AL SUMAITI, A. M. Review of surfactant-assisted chemical enhanced oil recovery for carbonate reservoirs: challenges and future perspectives. **Pet. Sci.** (2018) 15:77–102. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12182-017-0198-6>. Acesso em: 08 Fev. 2022

PAN, F., ZHANG, Z., ZHANG, X., DAVARPANAH, A. (2020). Impacto da tensão interfacial de surfactantes aniônicos e catiônicos na melhoria da recuperação de petróleo. *Tecnologia de Pó*, 373, 93-98. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.06.033>. Acesso em: 15 Mai. 2022.

PATEL, S. B., SANTANI, D., SHAH, M. B., PATEL, V. S. (2012). Anti-hyperglycemic and anti-hyperlipidemic effects of Bryonia laciniosa seed extract and its saponin fraction in streptozotocin-induced diabetes in rats. **Journal of Young Pharmacists**, 4(3), 171-176. Disponível em: <https://doi.org/10.4103/0975-1483.100024>. Acesso em: 03 Jun. 2023.

PEREIRA, L. F. A.; FIRMO, W. C. A.; COUTINHO, D. F. The importance of reusing waste from the food industry: the case of fruit processing. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 12, p. e38111234089, 2022.

PERINELLI, DR, CESPI, M., LORUSSO, N., PALMIERI, GF, BONACUCINA, G., BLASI, P. (2020). Automontagem de surfactantes e concentração crítica de micelas: uma abordagem serve para todos?. **Langmuir**, 36 (21), 5745-5753. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c00420>. Acesso em: 20 Mai. 2022.

PIORKOWSKI, D. T.; MCCLEMENTS, D. J. Beverage emulsions: recent developments in formulation, production, and applications. **Food Hydrocolloids**, v. 42, p. 5–41, 2014.

PIKHTIROVA, A., PECKA-KIEŁB, E., & ZIGO, F. (2023). Atividade antimicrobiana de plantas contendo saponina: revisão. *Journal of dairy, veterinary & animal research*, 12 (2), 121-127.

PRADHAN, A., BHATTACHARYYA, A. (2017). Busca por um surfactante alternativo ecologicamente correto: características de superfície e espuma de surfactantes naturais. **Jornal de Produção Mais Limpa**, 150, 127-134. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.013>. Acesso em: 20 Abr. 2022.

QI, M. E ZHOU, Y. (2019). Mecanismo de agregação multimicela para micelas multimoleculares esféricas: das teorias, características e propriedades às aplicações. **Fronteiras de Química de Materiais**, 3 (10), 1994-2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/C9QM00442D>. Acesso em: 20 Abr. 2023.

RAI, S., ACHARYA-SIWAKOTI, E., KAFLE, A., DEVKOTA, H. P., BHATTARAI, A. (2021). Plant-derived saponins: a review of their surfactant properties and applications. **Sci**, 3(4), 44. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/sci3040044>. Acesso em: 20 Mar. 2022.

RAJA, S., MURTY, V. R., THIVAHARAN, V., RAJASEKAR, V., & RAMESH, V. (2011). Aqueous two phase systems for the recovery of biomolecules—a review. *Science and Technology*, 1(1), 7-16. Disponível em: <http://article.sapub.org/10.5923.j.scit.20110101.02.html#Ref>. Acesso em: 15 Jan. 2023.

RANDRIAMAMONJY, T. H., ONTIVEROS, J. F., ANDRIANJAFY, M. T., SAMIEZ, P., BERLIOZ-BARBIER, A., NARDELLO-RATAJ, V., LEMAIRE, M. (2022). Comparative study on the amphiphilicity, emulsifying and foaming properties of saponins extracted from *Furcraea foetida*. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, 653, 129923. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129923>. Acesso em: 02 Dez. 2023.

RAVERA, F., DZIZA, K., SANTINI, E., CRISTOFOLINI, L., & LIGGIERI, L. (2021). Emulsificação e estabilidade de emulsões: O papel das propriedades interfaciais. *Avanços na Ciência de Colóides e Interface*, 288, 102344. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102344>. Acesso em: 20 Jan. 2023.

RAVINDRAN, R., HASSAN, SS, WILLIAMS, GA E JAISWAL, AK (2018). Uma revisão sobre a bioconversão de resíduos agroindustriais em enzimas industrialmente importantes. **Bioengenharia**, 5 (4), 93. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/bioengineering5040093>. Acesso em 03 Mar. 2022.

REBELLO, S., ASOK, AK, MUNDAYOOR, S., JISHA, MS (2014). Surfactantes: toxicidade, remediação e surfactantes verdes. **Cartas de química ambiental**, 12, 275-287. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-014-0466-2>. Acesso em: 20 Mai. 2022.

REICHARDT, C., WELTON, T. (2011). Solvents and solvent effects in organic chemistry. **John Wiley & Sons**.

RIOS, R. D., BUENO, P. J., TERRA, J. C., MOURA, F. C. (2023). Influence of the surface modification of granular-activated carbon synthesized from macauba on heavy metal sorption. **Environmental Science and Pollution Research**, 30(11), 31881-31894. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-022-23736-9>. Acesso em: 15 Out. 2023.

ROCHA, W. S., LOPES, R. M., SILVA, D. B. D., VIEIRA, R. F., SILVA, J. P. D., AGOSTINI-COSTA, T. D. S. (2011). Compostos fenólicos totais e taninos condensados em frutas nativas do cerrado. **Revista Brasileira de Fruticultura**, 33, 1215-1221. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-29452011000400021>. Acesso em 30 Fev. 2022.

ROK FINK & SEBASTJAN FILIP (2023) Surface-active natural saponins. Properties, safety, and efficacy, *International Journal of Environmental Health Research*, 33:7,639-648. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09603123.2022.2043252>. Acesso em: 20 de Jan. 2023.

ROSA, D., MEDEIROS, ABP, MARTINEZ-BURGOS, WJ, DO NASCIMENTO JUNIOR, JR, DE CARVALHO, JC, SYDNEY, EB, SOCCOL, CR (2020). Produção biológica de hidrogênio a partir de efluentes de fábricas de óleo de palma (POME) por consórcios anaeróbios e *Clostridium beijerinckii*. **Jornal de Biotecnologia**, 323, 17-23. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2020.06.015>. Acesso em: 03 Mar. 2022

RÜEGG, R., SCHMID, T., HOLLENSTEIN, L., MÜLLER, N. (2022). Efeito das características das partículas e dos parâmetros de formação de espuma na qualidade e

estabilidade da espuma resultante. **LWT**, 167, 113859. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113859>. Acesso em: 30 Nov. 2023.

SAHA, N., SARKAR, B., SEN, K. (2022). Aqueous biphasic systems: A robust platform for green extraction of biomolecules. **Journal of Molecular Liquids**, 119882. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.119882>. Acesso em 12 Mar. 2023.

SAMTIYA, M., ALUKO, RE, & DHEWA, T. (2020). Fatores antinutricionais em alimentos vegetais e suas estratégias de redução: uma visão geral. *Produção, Processamento e Nutrição de Alimentos*, 2, 1-14.

SÁNCHEZ, C. C., PATINO, J. M. R. (2021). Contribution of the engineering of tailored interfaces to the formulation of novel food colloids. **Food Hydrocolloids**, 119, 106838. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106838>. Acesso em 22 Mar. 2023.

SANKARAN, R., SHOW, P. L., YAP, Y. J., TAO, Y., LING, T. C., TOMOHISA, K. (2018). Green technology of liquid biphasic flotation for enzyme recovery utilizing recycling surfactant and sorbitol. **Clean Technologies and Environmental Policy**, 20, 2001-2012. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-018-1523-5>. Acesso em: 15 Out. 2023.

SANTANA, C. B., SOUZA, J. G. L., TOLEDO, A. G., ALVES, L. F. A., ALVES, D. S., CORRÊA, J. M., PINTO, F. G. S. (2021). Antimicrobial and insecticidal effects of essential oil and plant extracts of *Myrcia oblongata* DC in pathogenic bacteria and *Alphitobius diaperinus*. **Brazilian Journal of Biology**, 82, e233425. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.233425>. Acesso em: 10 Dez. 2023.

SANTINI, E., JAREK, E., RAVERA, F., LIGGIERI, L., WARSZYNSKI, P., & KRZAN, M. (2019). Surface properties and foamability of saponin and saponin-chitosan systems. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, 181, 198-206.

SANTOS, BLP, JESUS, MS, MATA, F., PRADO, AAOS, VIEIRA, IMM, RAMOS, LC, .SILVA, DP (2023). Aproveitamento de resíduos agroindustriais para produção de biossurfactantes: estudo comparativo de licores hemicelulósicos de sabugo de milho e caule de girassol. **Sustentabilidade**, 15 (8), 6341. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su15086341>. Acesso em 15 Out. 2023.

SANTOS, V. O., ARAUJO, R. O., RIBEIRO, F. C., QUEIROZ, L. S., GUIMARÃES, M. N., COLPANI, D., DE SOUZA, L. K. (2021). Non-isothermal kinetics evaluation of buriti and inaja seed biomass waste for pyrolysis thermochemical conversion technology. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 1-17. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-021-01922-y>. Acesso em: 15 Abr. 2023

SANTOS-ZEA, L., GUTIERREZ-URIBE, J. A., BENEDITO, J. (2021). Effect of solvent composition on ultrasound-generated intensity and its influence on the ultrasonically assisted extraction of bioactives from Agave bagasse (Agave salmiana). **Food Engineering Reviews**, 13(3), 713-725. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12393-020-09260-x>. Acesso em: 05 Nov. 2023.

SARKAR, R., PAL, A., RAKSHIT, A., SAHA, B. (2021). Propriedades e aplicações do surfactante anfotérico: uma revisão concisa. **Jornal de Surfactantes e**

Detergentes, 24 (5), 709-730. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jsde.12542>. Acesso em: 20 Mai. 2022.

SEN, MAKKAR, MUETZEL, & BECKER. (1998). Effect of Quillaja saponaria saponins and Yucca schidigera plant extract on growth of Escherichia coli. **Letters in Applied Microbiology**, 27(1), 35-38. Disponível em: <https://doi.org/10.1046/j.1472-765X.1998.00379.x>. Acesso em: 09 Dez. 2023.

SERVENTI, L., CHITCHUMROONCHOKCHAI, C., RIEDL, K. M., KEREM, Z., BERHOW, M. A., VODOVOTZ, Y., FAILLA, M. L. (2013). Saponins from soy and chickpea: Stability during beadmaking and in vitro bioaccessibility. **Journal of agricultural and food chemistry**, 61(27), 6703-6710. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/jf401597y>. Acesso em: 03 Jun. 2023.

SCHREINER, T. B., COLUCCI, G., SANTAMARIA-ECHART, A., FERNANDES, I. P., DIAS, M. M., PINHO, S. P., & BARREIRO, M. F. (2021). Evaluation of saponin-rich extracts as natural alternative emulsifiers: A comparative study with pure *Quilaja* Bark saponin. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 623, 126748. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126748>. Acesso em: 23 Mar. 2023.

SHABAN, S. M., AIAD, I., MOUSTAFA, A. H., ALJOBOURY, O. H. (2019). Some alginates polymeric cationic surfactants; surface study and their evaluation as biocide and corrosion inhibitors. **Journal of Molecular Liquids**, 273, 164-176. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.10.017>. Acesso em: 20 Mar. 2022.

SHARMA, R., PALANISAMY, A., DHAMA, K., MAL, G., SINGH, B., SINGH, K. P. (2020). Exploring the possible use of saponin adjuvants in COVID-19 vaccine. **Human Vaccines & Immunotherapeutics**, 16(12), 2944-2953. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/21645515.2020.1833579>. Acesso em: 23 Mar. 2023.

SINDHU, R., GNANSOUNOU, E., REBELLO, S., BINOD, P., VARJANI, S., THAKUR, IS., PANDEY, A. (2019). Conversão de alimentos e resíduos de cozinha em produtos de valor acrescentado. *Jornal de gestão ambiental*, 241, 619-630. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.053>. Acesso em 15 Mar. 2022.

SILVA, C. E., TAM, K. C., BERNARDES, J. S., LOH, W. (2020). Mecanismo de dupla estabilização de emulsões O/W Pickering utilizando celulose nanofibrilada catiônica. **Journal of coloidal and interface science**, 574, 207-216. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.04.001>. Acesso em: 20 de Nov. 2023.

SMULEK, W., GRZĄBKA-ZASADZIŃSKA, A., KILIAN, A., CIESIELCZYK, F., BORYSIK, S., BARANOWSKA, H. M., JARZĘBSKI, M. (2023). Design of vitamin-loaded emulsions in agar hydrogel matrix dispersed with plant surfactants. *Food Bioscience*, 53, 102559. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102559>. Acesso em: 15 Out. 2023.

SONG X, HU S. Atividades adjuvantes de saponinas de ervas medicinais tradicionais chinesas. **Vacina**. 6 de agosto de 2009;27(36):4883-90. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2009.06.033>. Acesso em: 23 Mar. 2023.

SORIA, A. C., VILLAMIEL, M. (2010). Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review. **Trends in food science & technology**, 21(7),

323-331. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2010.04.003>. Acesso em: 15 Mai. 2023.

SUN J.; HU S.; SONG X. Adjuvant effects of protopanaxadiol and protopanaxatriol saponins from ginseng roots on the immune responses to ovalbumin in mice. **Vaccine**, v. 25, p. 1114 – 1120, 2007. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2006.09.054>>. Acesso em: 03 Fev. 2022.

SUN, H.X.; XIEA, Y.; YE, Y.P. Advances in saponin-based adjuvants. **Vaccine**, v.27, p.1787–1796, 2009. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2009.01.091>. Acesso em 02 Fev. 2022.

SYLWIA, G., LESZCZYNSKI, B., & WIESLAW, O. (2006). Effect of low and high-saponin lines of alfalfa on pea aphid. **Journal of Insect Physiology**, 52(7), 737-743. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2006.04.001>. Acesso em: 27 Out. 2023.

TAKEUCHI, T. M., PEREIRA, C. G., BRAGA, M. E., MARÓSTICA, M. R., LEAL, P. F., & MEIRELES, M. A. A. (2009). Low-pressure solvent extraction (solid–liquid extraction, microwave assisted, and ultrasound assisted) from condimentary plants. **Extracting bioactive compounds for food products**, 137-218.

TUCKER, IM, BURLEY, A., PETKOVA, RE, HOSKING, SL, WEBSTER, JP, LI, PX., THOMAS, RK (2022). Automontagem de misturas de saponinas *Quilaja* com diferentes surfactantes sintéticos convencionais. **Colóides e Superfícies A: Aspectos Físico-Químicos e de Engenharia**, 633, 127854. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127854>. Acesso em: 30 Mai. 2023.

V. LE, A., E. PARKS, S., H. NGUYEN, M., & D. ROACH, P. (2018). Improving the vanillin-sulphuric acid method for quantifying total saponins. **Technologies**, 6(3), 84. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/technologies6030084>. Acesso em: 30 Mai. 2023.

VASCONCELOS, K. M. C. S. G.; COSTA, J. G.; PAVÃO, J. M. S. J.; FONSECA, S. A.; MIRANDA, P. R. B; MATOS-ROCHA, T. J.; FREITAS, J. D. ; SOUSA, J. S; MELO I. S. V.; SANTOS, A. F. Evaluation of nutritional composition of flour residue of mangaba processing. **Brazilian Journal of Biology**, 2023, vol. 83, e248931. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.248931>. Acesso em: 24 jan.2022.

VELÁSQUEZ-FLÓREZ, M. A., & VÉLEZ-SALAZAR, Y. (2020). Conceptual Design or a Plant of Extraction of Saponins Presents in the Fiques Juice. **Ingeniería**, 25(1), 50-67. Disponível em: <https://doi.org/10.14483/23448393.15298>. Acesso em 08 Jun. 2022

VERMA, C., HUSSAIN, C. M., QURAIISHI, M. A., ALFANTAZI, A. (2022). Green surfactants for corrosion control: Design, performance and applications. **Advances in Colloid and Interface Science**, 102822. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102822>. Acesso em: 10 Mar. 2022.

VERZA, S. G., SILVEIRA, F., CIBULSKI, S., KAISER, S., FERREIRA, F., GOSMANN, G., ... & ORTEGA, G. G. (2012). Immunoadjuvant activity, toxicity assays, and determination by UPLC/Q-TOF-MS of triterpenic saponins from *Chenopodium quinoa* seeds. **Journal of agricultural and food chemistry**, 60(12), 3113-3118. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/jf205010c>. Acesso em: 13 Mai. 2023.

VIANA, HNAC, SGANZERLA, WG, CASTRO, LEN., DE LIMA VEECK, AP (2023). Caracterização do baru (*Dipteryx alata* Vog.) e aplicação do seu subproduto agroindustrial na formulação de biscoitos. *Jornal de Pesquisa Agrícola e Alimentar*, 12, 100577. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100577>. Acesso em: 15 Out. 2023.

VILKHU, K., MAWSON, R., SIMONS, L., BATES, D. (2008). Applications and opportunities for ultrasound assisted extraction in the food industry—A review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 9(2), 161-169. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.04.014>. Acesso em: 20 Mar. 2023.

VINATORU, M. (2001). An overview of the ultrasonically assisted extraction of bioactive principles from herbs. *Ultrasonics sonochemistry*, 8(3), 303-313. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1350-4177\(01\)00071-2](https://doi.org/10.1016/S1350-4177(01)00071-2). Acesso em: 14 Mai. 2023.

VINCKEN, JP, HENG, L., DE GROOT, A., GRUPPEN, H. (2007). Saponinas, classificação e ocorrência no reino vegetal. *Fitoquímica*, 68 (3), 275-297. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2006.10.008>. Acesso em 22 Mar. 2023.

WANG, H.; DONG, Y. S.; XIU, Z. L. (2008). Microwave-assisted aqueous two-phase extraction of piceid, resveratrol and emodin from *Polygonum cuspidatum* by ethanol/ammonium sulphate system. *Biotechnology Letters*, 30(12), 2079–2084. Disponível em: < <https://link.springer.com/article/10.1007/s10529-008-9815-1> >. Acesso em 05 Fev. 2022.

WANG, H. CHEN, J. (2013). Um estudo sobre a permeabilidade e comportamento de fluxo de espuma surfactante em meios não consolidados. *Ciências ambientais da terra*, 68, 567-576. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-012-1760-6>. Disponível em: 10 Mar. 2022.

WANG, H., GUO, W., ZHENG, C., WANG, D., ZHAN, H. (2017). Effect of temperature on foaming ability and foam stability of typical surfactants used for foaming agent. *Journal of surfactants and detergents*, 20(3), 615-622. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11743-017-1953-9>. Acesso em 10 Mai. 2022.

WANG YX, CAO YQ, ZHANG Q, MENG Q. Novel cationic gemini surfactants based on piperazine: synthesis, surface activity, and foam ability. *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2016 Apr 2;37(4):465-71. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01932691.2014.986737>. Acesso em: 10 Mar. 2022.

WEI, MP, YU, H., GUO, YH, CHENG, YL, XIE, YF E YAO, WR (2021). Potente atividade antibacteriana sinérgica in vitro do Sapindoside A e B anfifílico natural contra *Cutibacterium acnes* com efeito destrutivo na membrana bacteriana. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranas*, 1863 (11), 183699. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bbamem.2021.183699>. Acesso em: 09 Dez. 2023.

WU, W., NG, HS, SUN, I. e LAN, JC (2017). "Purificação em etapa única de bromelaína da polpa de Ananas comosus usando um sistema bifásico aquoso polímero/sal ". *Jornal do*

Instituto de Engenheiros Químicos de Taiwan, 79, 158-162. Disponível em :<https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.04.001>. Acesso em: 15 Mai. 2022.

WU, X., JIA, L., WU, J., LIU, Y., KANG, H., LIU, X., LI, B. (2019). Simultaneous determination and quantification of triterpene saponins from *Camellia sinensis* seeds using UPLC-PDA-QTOF-MS/MS. **Molecules**, 24(20), 3794. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules24203794>. Acesso em: 30 Mai. 2023.

WU, X., LIANG, L., ZOU, Y., ZHAO, T., ZHAO, J., LI, F., & YANG, L. (2011). Aqueous two-phase extraction, identification and antioxidant activity of anthocyanins from mulberry (*Morus atropurpurea* Roxb.). **Food Chemistry**, 129(2), 443-453. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.04.097>. Acesso em: 20 Dez. 2021.

XAVIER, VL, FEITOZA, GS, BARBOSA, J., MARIA, L., ARAÚJO, KS, SILVA, MV, .CARNEIRO-DA-CUNHA, MDG (2022). Potencial nutricional e tecnológico do subproduto do processamento de farinha de umbu (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.). **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 94, e20200940. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202220200940>. Acesso em: 15 Out. 2023

XU, M., WAN, Z., YANG, X. (2021). Recent advances and applications of plant-based bioactive saponins in colloidal multiphase food systems. **Molecules**, 26(19), 6075. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules26196075>. Acesso em: 22 Mar. 2023.

YANG, Y., LAVAL, S., YU, B. (2021). Chemical synthesis of saponins. In *Advances in Carbohydrate Chemistry and Biochemistry* (Vol. 79, pp. 63-150). **Academic Press**. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/bs.accb.2021.10.001>. Acesso em: 20 Mar. 2023.

YANG, Y., ZHAO, M., LAI, L. (2023). Surface activity, micellization, and application of nano-surfactants—amphiphilic carbon dots. **Carbon**, 202, 398-413. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.11.012>. Acesso em: 20 Out. 2023.

YEKEEN, N., MANAN, M. A., IDRIS, A. K., & SAMIN, A. M. (2017). Influence of surfactant and electrolyte concentrations on surfactant Adsorption and foaming characteristics. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 149, 612-622. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.11.018>. Acesso em: 20 Jan. 2022

YENDO, A. C., COLLING, L. C., MATSUURA, H. N., VARGAS, L. R., MARTINELLI, J. A., CHITOLINA, G. Z., ... & FETT-NETO, A. G. (2025). Quillaja lancifolia Immunoadjuvant Saponins Show Toxicity to Herbivores and Pathogenic Fungi. *Plants*, 14(8), 1252.

YING, GG (2006). Destino, comportamento e efeitos dos surfactantes e seus produtos de degradação no meio ambiente. **Meio ambiente internacional**, 32 (3), 417-431. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.07.004>. Acesso em: 30 Mar. 2022.

YU, X. , WANG, L. , LI, M. , HUANG, Q. , ZENG, Y. e LAN, Z. (2019). Equilíbrio de fases de CsCl-polietilenoglicol (PEG)-H₂O a 298,15 K: Efeito de diferentes massas molares de polímero (PEG1000/4000/6000) . **The Journal of Chemical Thermodynamics**, 135 , 45-54 . Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jct.2019.03.020>. Acesso em 20 Mar. 2022.

ZHAN, F., YOUSSEF, M., LI, J., LI, B. (2022). Beyond particle stabilization of emulsions and foams: Proteins in liquid-liquid and liquid-gas interfaces. **Advances in Colloid and Interface Science**, 102743. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102743>. Acesso em 15 Nov. 2023.

ZHANG, F., CHEN, S., ZHANG, J., THAKUR, K., BATTINO, M., CAO, H., WEI, Z. (2023). Asparagus saponins: effective natural beneficial ingredient in functional foods, from preparation to applications. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, 1-19. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2249097>. Acesso em: 30 Mai. 2023.

ZHANG, J.; YING, Y.; LI, X. Changes in tannin and saponin components during co-composting of *Camellia oleifera* Abel shell and seed cake. **PLoS One**, v. 15, n. 3, art. e0230602, 2020.

ZHANG, Z. S., WANG, L. J., LI, D., JIAO, S. S., CHEN, X. D., MAO, Z. H. (2008). Ultrasound-assisted extraction of oil from flaxseed. **Separation and Purification Technology**, 62(1), 192-198. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2008.01.014>. Acesso em: 20 Mar. 2023.

ZHANG, H. F., YANG, X. H., & WANG, Y. (2011). Microwave assisted extraction of secondary metabolites from plants: Current status and future directions. **Trends in Food Science & Technology**, 22(12), 672-688. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.07.003>. Acesso em: 15 Out. 2023.

ZHAO, D., YU, D., KIM, M., GU, M. Y., KIM, S. M., PAN, C. H., CHUNG, D. (2019). Effects of temperature, light, and pH on the stability of fucoxanthin in an oil-in-water emulsion. **Food chemistry**, 291, 87-93. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.04.002>. Acesso em: 21 Nov. 2023.

ZHU, Z., WEN, Y., YI, J., CAO, Y., LIU, F., & MCCLEMENTS, D. J. (2019). Comparison of natural and synthetic surfactants at forming and stabilizing nanoemulsions: Tea saponin, *Quilaja* saponin, and Tween 80. **Journal of colloid and interface science**, 536, 80-87.

ZHUANG, D., CHEW, K. W., TEOH, W. Y., AL-MAARI, M. A. S., HIZADDIN, H. F., ALHARTHI, S., LING, T. C. (2023). Extraction of phycocyanin from *Spirulina* using Deep Eutectic Solvent Liquid Biphasic System. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, 151, 105125. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2023.105125>. Acesso em: 23 Out. 2023.