



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO ENGENHARIA QUÍMICA E DE ALIMENTOS  
CURSO ENGENHARIA DE ALIMENTOS

Luiza Teles de Menezes

**Métricas verdes:** um estudo de caso da obtenção do concentrado proteico do coproduto do feijão preto (*Phaseolus vulgaris* L.)

Florianópolis

2024

Luiza Teles de Menezes

**Métricas verdes:** um estudo de caso da obtenção do concentrado proteico do coproduto do feijão preto (*Phaseolus vulgaris* L.)

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia de Alimentos do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. Acácio A. F. Zielinski  
Coorientadora: Prof. Ms. Renata Fialho Teixeira

Florianópolis

2024

Menezes, Luiza Teles de

Métricas verdes: um estudo de caso da obtenção do concentrado proteico do coproduto do feijão preto (*Phaseolus vulgaris* L.) / Luiza Teles de Menezes ; orientador, Acácio A. F. Zielinski, coorientador, Renata Fialho Teixeira, 2024.

42 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia de Alimentos, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Alimentos. 2. Métricas verdes. 3. Tecnologias de extração. 4. Impacto ambiental . I. Zielinski, Acácio A. F.. II. Teixeira, Renata Fialho. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Alimentos. IV. Título.

Luiza Teles de Menezes

**Métricas verdes:** um estudo de caso da obtenção do concentrado proteico do coproduto do feijão preto (*Phaseolus vulgaris* L.)

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Alimentos e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia de Alimentos.

Florianópolis, 08 de julho de 2024.

---

Coordenação do Curso

**Banca examinadora**

---

Prof. Dr. Acácio A. F. Zielinski,  
Orientador

---

Prof.(a) Dr.(a) Sandra RS Ferreira  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Ph.D. Laís Benvenutti  
Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 2024.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar minha gratidão a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho e em minha trajetória acadêmica.

Um agradecimento especial é dedicado ao professor Acácio e à Renata pela orientação, paciência, trocas de conhecimento, incentivo e valiosas contribuições tanto para o meu trabalho quanto para a minha formação acadêmica.

Agradeço às minhas amigas e amigos que a universidade me proporcionou e que graças a vocês a jornada acadêmica foi especial, leve e com muita troca de conhecimento. Em especial destaco minhas amigas de curso Izadora, Larissa e Marcela, por toda parceria e acolhimento. Também deixo aqui meu agradecimento especial aos meus amigos do Projeto Rondon pela contribuição significativa na minha formação acadêmica.

De maneira singela, mas com todo o meu coração, quero agradecer às minhas amigas e amigos de vida que sempre me incentivaram e apoiaram, em especial à Margrit, Sofia, Lucas, Kesley, Luane, Gabriela, Paulo, Tales, Danilo, Caio, Paola e Pedro.

Também deixo aqui meus agradecimentos à toda a minha família pelo apoio incondicional, amor e incentivo em todos os momentos. Aos meus pais, minha eterna gratidão por serem os maiores incentivadores à educação e os maiores contribuintes para a minha construção profissional.

Agradeço à Universidade Federal de Santa Catarina pelo privilégio de estudar em uma das melhores universidades do Brasil que me proporcionou um ambiente acadêmico de alta qualidade e gratuito, que contribuíram para a minha formação profissional e como cidadã.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a todas as pessoas que, de alguma forma, participaram desta etapa da minha vida. Este trabalho é um reflexo do esforço conjunto e da colaboração de todos vocês.

Muito obrigada.

“Nossas ações, por menores que pareçam, são capazes de mudar o mundo.  
A cada momento, fazemos escolhas sobre nossos modos de vida. Se nos conectarmos com o planeta e uns com os outros, seremos uma ponte para o futuro sustentável. Cada um de nós faz o seu amanhã, e juntos fazemos os nossos – os amanhãs que queremos.”

*Museu do Amanhã*

## RESUMO

É consensual e corroborado por pesquisas científicas que o planeta enfrenta uma crise climática, colocando em risco a existência da vida humana. A ausência de tomada de decisões sustentáveis e de planejamento estratégico ao entorno do aumento do consumo de biorrecursos, atrelados ao crescimento exponencial da população mundial, resultou na situação atual. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é realizar uma análise do impacto ambiental na obtenção do concentrado proteico do coproduto do feijão preto (*Phaseolus vulgaris L.*) utilizando a métrica verde. O estudo faz uso do software *AGREEprep*, uma ferramenta desenvolvida para avaliar as métricas verdes em preparações analíticas de amostras, considerando dez critérios baseados nos princípios de preparação de amostras verdes. A metodologia aplicada envolveu a adaptação dos parâmetros e pesos utilizados no software, focando na análise comparativa de três tecnologias de extração: extração por líquido pressurizado (PLE), extração assistida por ultrassom (UAE) e extração por agitação e aquecimento (HSE). Os dados de entrada foram obtidos de pesquisas prévias e ajustados conforme necessário para o contexto das tecnologias de extração. Os resultados indicaram que a tecnologia PLE apresentou o menor impacto ambiental, com menores consumos de energia e água, e uma alta eficiência na reutilização de materiais, embora apresente riscos associados à alta pressão e rendimento relativamente menor. A tecnologia HSE mostrou-se competitiva devido ao alto rendimento de amostras por hora e flexibilidade no uso, compensando seu maior consumo energético e de água pelo menor impacto em resíduos gerados. A tecnologia UAE, apesar de ser uma opção emergente, apresentou maior impacto ambiental devido ao risco de desnaturação da proteína e necessidade de etapas adicionais como centrifugação. A análise demonstrou a importância de considerar múltiplos parâmetros ambientais e operacionais na escolha de tecnologias de extração, evidenciando que a implementação de soluções que reduzam os riscos operacionais e aumentem a eficiência é essencial para a sustentabilidade e produtividade.

**Palavras-chave:** impacto ambiental, métrica verde, concentrado proteico, feijão preto, *AGREEprep*, tecnologias de extração.

## ABSTRACT

It is widely accepted and supported by scientific research that the planet is facing a climate crisis, putting human life at risk. The lack of sustainable decision-making and strategic planning surrounding the increasing consumption of bioresources, coupled with the exponential growth of the global population, has led to the current situation. In this context, the objective of this work is to analyze the environmental impact of obtaining protein concentrate from the black bean (*Phaseolus vulgaris* L.) by-product using the green metric. The study employs the AGREEprep software, a tool developed to evaluate green metrics in sample preparation, considering ten criteria based on the principles of green sample preparation. The applied methodology involved adapting the parameters and weights used in the software, focusing on the comparative analysis of three extraction technologies: pressurized liquid extraction (PLE), ultrasound-assisted extraction (UAE), and heating and stirring extraction (HSE). Input data were obtained from previous research and adjusted as necessary for the context of the extraction technologies. The results indicated that PLE technology had the lowest environmental impact, with lower energy and water consumption, and high efficiency in material reuse, although it presents risks associated with high pressure and relatively lower yield. HSE technology proved competitive due to its high sample throughput and flexibility in use, compensating for its higher energy and water consumption with a lower impact on generated waste. UAE technology, although an emerging option, presented a higher environmental impact due to the risk of protein denaturation and the need for additional steps such as centrifugation. The analysis demonstrated the importance of considering multiple environmental and operational parameters when choosing extraction technologies, highlighting that the implementation of solutions that reduce operational risks and increase efficiency is essential for sustainability and productivity.

**Keywords:** environmental impact, green metric, protein concentrate, black bean, AGREEprep, extraction technologies

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Fases de uma Avaliação de Ciclo de Vida	17
Figura 2.	Fluxograma das etapas de extração e precipitação da proteína do feijão preto descascado e quebrado	20
Figura 3.	Tecnologias utilizadas para extração	21
Figura 4.	Fluxograma <i>AgreePrep</i> adaptado	27
Figura 5.	Relatório <i>AgreePrep</i> para tecnologia HSE	30
Figura 6.	Relatório <i>AgreePrep</i> para tecnologia UAE	32
Figura 7.	Relatório <i>AgreePrep</i> para tecnologia PLE	34
Figura 8.	Pictograma do <i>AgreePrep</i> das tecnologias HSE, UAE e PLE, respectivamente	37

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Comparativo tecnologias de extração

23

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Dados de entrada	28
Tabela 2.	Análise comparativa dos principais parâmetros do impacto ambiental de cada tecnologia	37

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>14</b>
2.1	OBJETIVO GERAL.....	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
<b>3.</b>	<b>DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>15</b>
3.1	METODOLOGIAS DE IMPACTO AMBIENTAL.....	15
<b>3.1.1</b>	<b>Avaliação do ciclo de vida (ACV).....</b>	<b>16</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Métricas Verdes .....</b>	<b>18</b>
3.2	CONCENTRADO PROTEICO DO COPRODUTO DO FEIJÃO PRETO ....	19
<b>3.2.1</b>	<b>Extração por agitação e aquecimento (HSE) .....</b>	<b>22</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Extração assistida por ultrassom (UAE).....</b>	<b>22</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Extração por líquido pressurizado (PLE) .....</b>	<b>22</b>
<b>4.</b>	<b>ANÁLISE.....</b>	<b>24</b>
4.1	<i>SOFTWARE AGREEPREP .....</i>	24
4.2	METODOLOGIA APLICADA .....	25
<b>4.2.1</b>	<b>Parâmetros e processo .....</b>	<b>25</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Input dos dados.....</b>	<b>28</b>
4.3	TECNOLOGIA DE HSE.....	28
4.4	TECNOLOGIA DE UAE.....	31
4.5	TECNOLOGIA DE PLE .....	33
4.6	ANÁLISE COMPARATIVA .....	35
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>38</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>40</b>

## 1. INTRODUÇÃO

É consensual e corroborado por pesquisas científicas que o planeta enfrenta uma crise climática, colocando em risco a existência da vida humana. A ausência de tomada de decisões sustentáveis e de planejamento estratégico ao entorno do aumento do consumo de biorrecursos, atrelados ao crescimento exponencial da população mundial, resultou na situação atual. Em 2023 foi registrado o maior aumento da temperatura global, associado a diversos eventos climáticos e meteorológicos extremos em todo o mundo. De acordo com o *IPCC*, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (do inglês *Intergovernmental Panel on Climate Change*) é inequívoco que a ação humana aqueceu a atmosfera, o oceano e o solo, provocando mudanças sem precedentes em pelo menos 6.500 anos. Essas mudanças estão causando perturbações perigosas e generalizadas na natureza, afetando a vida de bilhões de pessoas em todo o mundo. Neste mesmo relatório do *IPCC*, é apontado que apesar dos esforços para reduzir esses riscos, as pessoas e os ecossistemas mais vulneráveis continuam sendo os mais impactados em um mundo com 8 bilhões de pessoas, 3,6 bilhões estão expostas a esses perigos (BRASIL, 2023).

Além do risco à vida humana associado a eventos climáticos extremos, como enchentes e altas temperaturas, a Embrapa (2018) aponta que as alterações climáticas são reconhecidas como uma das maiores ameaças à produção de alimentos devido aos impactos previstos, nomeadamente na agricultura. A produção de alimentos não apenas enfrentará os impactos das mudanças climáticas, mas também desempenhará um papel significativo no seu agravamento, devido ao seu impacto ambiental. Estima-se que o desperdício de alimentos esteja a utilizar o equivalente a 30% da área de terra agrícola do mundo (1,4 milhões de hectares), a consumir um volume de água de 250 km<sup>3</sup> (equivalente ao fluxo anual do Rio Volga, o mais extenso rio da Europa), e a contribuir para 8% das emissões mundiais de gases com efeito estufa (FAO; WFP; IFAD, 2012). Na verdade, se o desperdício de alimentos fosse um país, poderia ser visto como o terceiro maior emissor de CO<sub>2</sub> no mundo, ficando atrás apenas da China e dos Estados Unidos (FAO, 2013).

O previsível crescimento da população mundial coloca enormes desafios à manutenção da vida humana. Estimativas da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO, 2024) apontam que até 2050 será necessário um

aumento de 70% na produção de alimentos para atender à crescente demanda. Portanto, uma abordagem mais racional e sustentável consiste em reduzir o desperdício de alimentos, ao invés de buscar novas áreas para expandir a produção agrícola. O Marco Estratégico da FAO 2022-2031 articula a visão da organização para um mundo sustentável, no qual todas as pessoas tenham segurança alimentar, em conformidade com a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Diante dos constantes desafios que o mundo enfrenta, é imperativo transformar nossos sistemas agroalimentares e preparar nosso planeta para o futuro.

Esses fatores são motivos suficientes para incentivar a adoção do uso mais eficiente dos alimentos e o combate ativo do desperdício alimentar. Além de colocar uma pressão indevida nos recursos naturais limitados e ambiente, o desperdício alimentar também tem um impacto econômico e social importante. Diante deste cenário, há uma crescente no entorno de pesquisas no setor da agricultura e de alimentos, a fim de identificar possíveis alternativas de aproveitamento dos alimentos, e como exemplo podemos citar a pesquisa de doutorado realizada pela Ms. Renata Fialho Teixeira no Departamento de Engenharia de Alimentos na Universidade Federal de Santa Catarina. Em sua pesquisa, Teixeira *et al.* (2024) exploram a recuperação da proteína presente no cotilédone quebrado do feijão preto, alimento que é subutilizado ou descartado no processo de produção do alimento feijão. O intuito da sua pesquisa é aprimorar a funcionalidade e a qualidade nutricional dessa proteína, contribuindo assim para o desenvolvimento de alternativas sustentáveis e nutritivas na produção de alimentos.

Nesta diretriz, nos últimos anos também surgiram conceitos como “Química Verde” e “Eco-extração” que corroboram a necessidade de obter de forma mais sustentável e escalável alimentos diante do aumento da população e crise ambiental. Com isso, processos de extração estão sendo estudados para serem mais eficientes energeticamente, seguros para o operador e mais sustentáveis, sem que haja redução na eficiência da extração (NAVARRO *et al.*, 2015).

Muito se discute sobre diferentes metodologias e ferramentas tecnológicas que auxiliam no mapeamento de impacto ambiental de produtos ou processos de produção. A obtenção de clareza sobre os dados e impactos gerados é fundamental para direcionar eficazmente as decisões em relação às alternativas possíveis. Entre as metodologias utilizadas, destacam-se as ferramentas de Métricas Verdes e a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar uma análise a partir da métrica verde para medir o impacto ambiental da obtenção do concentrado proteico do coproduto do feijão preto (*Phaseolus vulgaris* L.). Cabe ressaltar que tanto o processo de obtenção do concentrado proteico, quanto os dados empregados neste estudo derivam da pesquisa de doutorado da Ms. Renata Fialho Teixeira.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Fornecer uma base geral teórica sobre as métricas utilizadas para medir o impacto ambiental;
- Analisar o impacto ambiental do uso de cada tecnologia na recuperação da proteína do coproduto do feijão preto;
- Realizar uma análise comparativa entre as tecnologias empregadas;
- Aplicar as ferramentas métricas verdes como uma abordagem semi-quantitativa;
- Implementar o *software AgreePrep*.

### 3. DESENVOLVIMENTO

#### 3.1 METODOLOGIAS DE IMPACTO AMBIENTAL

A crise climática e o aumento exponencial da população mundial impulsionam discussões sobre alternativas para mapear e medir o impacto ambiental e, conseqüentemente, melhorar a precisão nas tomadas de decisão, visando garantir a sustentabilidade da vida no planeta.

Diante do crescente debate em torno de medidas em prol do desenvolvimento sustentável do planeta e da população, discussão que está presente desde 1970 em diversos países e nos encontros internacionais, entende-se que a avaliação de toda a cadeia produtiva se faz necessária para que haja um melhor mapeamento dos impactos causados pelo homem. A partir disso, surge o conceito de ciclo de vida que pode ser entendido como a série de estágios cujo um produto, sistema ou processo passa desde sua concepção inicial ao fim da sua vida útil. Dentro desse espectro estão, portanto, contempladas atividades tais como manufatura, distribuição, uso e reaproveitamento pós-uso do produto (VIGON *et al.*, 1993)

A partir do início dos anos 60, a pressão crescente dos ambientalistas nos Estados Unidos sobre a indústria de embalagens, especialmente devido ao aumento do mercado de produtos descartáveis, incentivou a realização de estudos específicos para analisar a energia e os recursos empregados no processo produtivo das embalagens. O primeiro estudo público conhecido foi conduzido em 1965 pela Coca-Cola, que contratou o *Midwest Research Institute (MRI)* para comparar diferentes tipos de embalagens de refrigerantes e determinar qual delas era mais adequada do ponto de vista ambiental e apresentava melhor desempenho na preservação dos recursos naturais. Esse método de quantificação do uso de recursos naturais e das emissões, utilizado pela Coca-Cola nesse estudo, ficou conhecido como Análise do Perfil Ambiental e de Recursos (do inglês, *Resource and Environmental Profile Analysis - REPA*) (SEO; KULAY, 2006; CAVENAGHI, 2015).

No Brasil, as legislações ambientais somente começaram a obter algum destaque, a partir dos anos 90, principalmente após a realização, no país, da ECO 92, no Rio de Janeiro. Em 2001, foi lançada a versão nacional da norma internacional ISO, a NBR ISO 14.040 (2001), regulamentando, além das práticas de Gestão

Ambiental, a metodologia para a realização de estudos de Avaliação de Ciclo de Vida (CAVENAGHI, 2015).

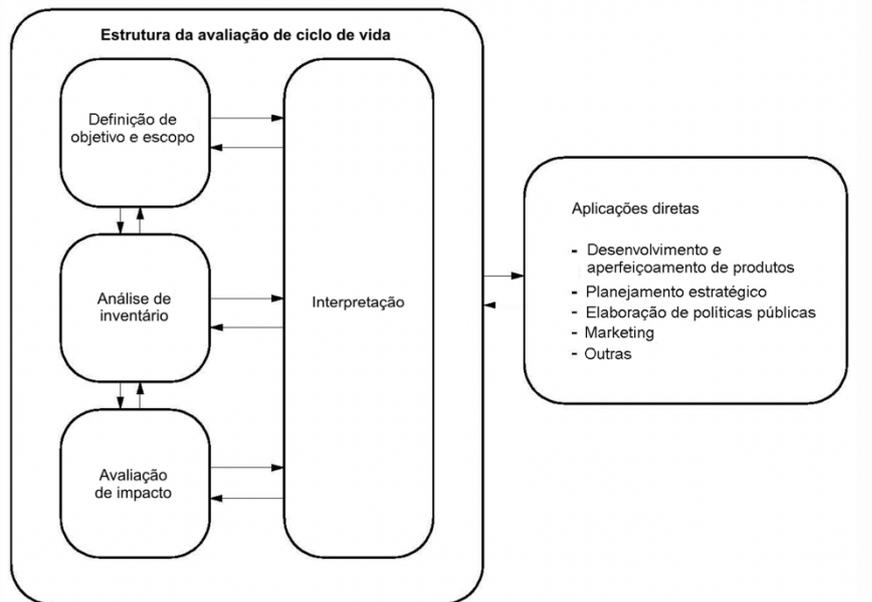
Neste cenário, emergem conceitos como “Química Verde” e “Eco-extração”, que se alinham à necessidade de obter alimentos de maneira mais sustentável e escalável, em resposta ao aumento da população e à crise ambiental (NAVARRO, 2015). Estes conceitos introduzem ferramentas e metodologias para avaliar o impacto ambiental de processos químicos e analíticos. Essas ferramentas permitem uma abordagem qualitativa e semi-quantitativa para medir e reduzir o impacto ambiental, promovendo a adoção de práticas mais sustentáveis na indústria química e na produção de alimentos.

### **3.1.1 Avaliação do ciclo de vida (ACV)**

A ACV, do inglês *Life Cycle Assessment (LCA)*, é uma ferramenta usada para quantificar os impactos ambientais de um produto ou processo ao longo de seu ciclo de vida – desde a aquisição, fabricação, transporte, montagem, uso e disposição de matérias-primas. Pode ser usada a fim de avaliar os impactos em termos de uma única preocupação ambiental, como mudanças climáticas, ou através de múltiplos impactos ambientais. Dessa forma, as empresas decidem quais estratégias adotar para a redução dos impactos ambientais gerados por seus processos produtivos (GDRC, 2017).

Segundo a ABNT NBR ISO 14.040 (2001), Avaliação de Ciclo de Vida é a “compilação de avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida” (p.1). Essa avaliação é feita sobre todos os estágios de ciclo de vida do produto ou processo, desde a aquisição da matéria-prima ou sua geração a partir de recursos naturais até sua disposição final. Como ocorre, por exemplo, desde a extração das matérias-primas, até o momento em que o produto deixa de ter uso e é descartado como resíduo ou é reciclado, passando por todas as etapas intermediárias de manufatura, transporte e consumo.

Figura 1. Fases de uma Avaliação de Ciclo de Vida



Fonte: NBR ISO 14040 (ABNT, 2001)

Atualmente, para conduzir uma avaliação do ciclo de vida de um produto, há uma série de *softwares* desenvolvidos com o propósito de facilitar e promover essas análises. Estes programas utilizam diversas bases de dados e técnicas de cruzamento de informações, todos em conformidade com as normativas da NBR ISO 14040 (ABNT, 2001). Entre os *softwares* disponíveis temos o *OpenLCA*, desenvolvido pela empresa *GreenDelta*, que é o único *software* profissional em gestão de informação de ciclo de vida no mundo totalmente gratuito, sem custos de licenças e *open source* (código aberto), permitindo assim maior transparência e flexibilidade no seu manuseio.

Todavia, apesar de oferecer um mapeamento amplo e preciso de todo o processo de produção, a ACV aplica ao *software OpenLCA* oferece alguns desafios em relação ao seu manuseio, visto que apesar de ser um *software* gratuito possui monetização nas bases de dados em que estas são fundamentais para garantia de uma análise precisa e confiável, e devido ao custo financeiro alto há um impedimento da sua aplicabilidade. Além disso, o *software* exige conhecimento especializado para manuseá-lo e já é apontado com limitações para medir com precisão o desempenho da sustentabilidade de setores industriais (KARUPPIAH; SANKARANARAYANAN; ALI, 2023).

### 3.1.2 Métricas Verdes

A química verde tem sido definida como o uso da química para a prevenção da poluição utilizando designs adequados de produtos e processos, reduzindo e principalmente, se possível, eliminando o uso e a geração de substâncias perigosas (MARTINEZ; CORTÉS; MIRANDA, 2022). A química verde tornou-se a principal motivação nos laboratórios e na indústria para incentivar o crescimento sustentável. Os doze princípios da química verde são a base de orientação para aqueles que desejam prosseguir o movimento em direção à química verde. Eles oferecem uma base para medidas que podem ser tomadas para tornar os materiais e processos químicos mais ecológicos. Químicos que representam diversos campos da química, como síntese orgânica, engenharia química ou química analítica, estabelecem essas etapas (SAJID; PŁOTKA-WASYLKA, 2022). De acordo com Lenardão *et al.* (2003), os doze princípios da química verde são:

1. Prevenção. Evitar a produção do resíduo é melhor do que tratá-lo ou "limpá-lo" após sua geração.
2. Economia de Átomos. Deve-se procurar desenhar metodologias sintéticas que possam maximizar a incorporação de todos os materiais de partida no produto.
3. Síntese de Produtos Menos Perigosos. Sempre que praticável, a síntese de um produto químico deve utilizar e gerar substâncias que possuam pouca ou nenhuma toxicidade à saúde humana e ao ambiente.
4. Desenho de Produtos Seguros. Os produtos químicos devem ser desenhados de tal modo que realizem a função desejada e ao mesmo tempo não sejam tóxicos.
5. Solventes e Auxiliares mais seguros. O uso de substâncias auxiliares (solventes, agentes de separação, secantes, etc.) precisa, sempre que possível, tornar-se desnecessário e, quando utilizadas, estas substâncias devem ser inócuas.
6. Busca pela Eficiência de Energia. A utilização de energia pelos processos químicos precisa ser reconhecida pelos seus impactos ambientais e econômicos e deve ser minimizada. Se possível, os processos químicos devem ser conduzidos à temperatura e pressão ambientes.
7. Uso de Fontes Renováveis de Matéria-Prima. Sempre que técnica e economicamente viável, a utilização de matérias-primas renováveis deve ser escolhida em detrimento de fontes não-renováveis.

8. Evitar a Formação de Derivados. A derivatização desnecessária (uso de grupos bloqueadores, proteção/desproteção, modificação temporária por processos físicos e químicos) deve ser minimizada ou, se possível, evitada, porque estas etapas requerem reagentes adicionais e podem gerar resíduos.

9. Catálise. Reagentes catalíticos (tão seletivos quanto possível) são melhores que reagentes estequiométricos.

10. Desenho para a Degradação. Os produtos químicos precisam ser desenhados de tal modo que, ao final de sua função, se fragmentem em produtos de degradação inócuos e não persistam no ambiente.

11. Análise em Tempo Real para a Prevenção da Poluição. Será necessário o desenvolvimento futuro de metodologias analíticas que viabilizem um monitoramento e controle dentro do processo, em tempo real, antes da formação de substâncias nocivas.

12. Química Intrinsecamente Segura para a Prevenção de Acidentes. As substâncias, bem como a maneira pela qual uma substância é utilizada em um processo químico, devem ser escolhidas a fim de minimizar o potencial para acidentes químicos, incluindo vazamentos, explosões e incêndios.

Ao longo do tempo, diversas métricas foram desenvolvidas para avaliação do verde dos procedimentos analíticos. Alguns deles são projetados para tipos específicos de procedimentos analíticos, enquanto outros são gerais e aplicáveis à maioria dos procedimentos analíticos.

Diante disto, surgem as métricas verdes que podem auxiliar na medição e comparação das características sustentáveis de novos procedimentos analíticos (SAJID; PŁOTKA-WASYLKA, 2022). Atualmente existem diferentes tipos de métricas verdes atrelados a diferentes *softwares*, o presente estudo tem como diretriz o uso do *software AgreePrep*, que é abordado de forma detalhada no item 4.1 deste trabalho.

### 3.2 CONCENTRADO PROTEICO DO COPRODUTO DO FEIJÃO PRETO

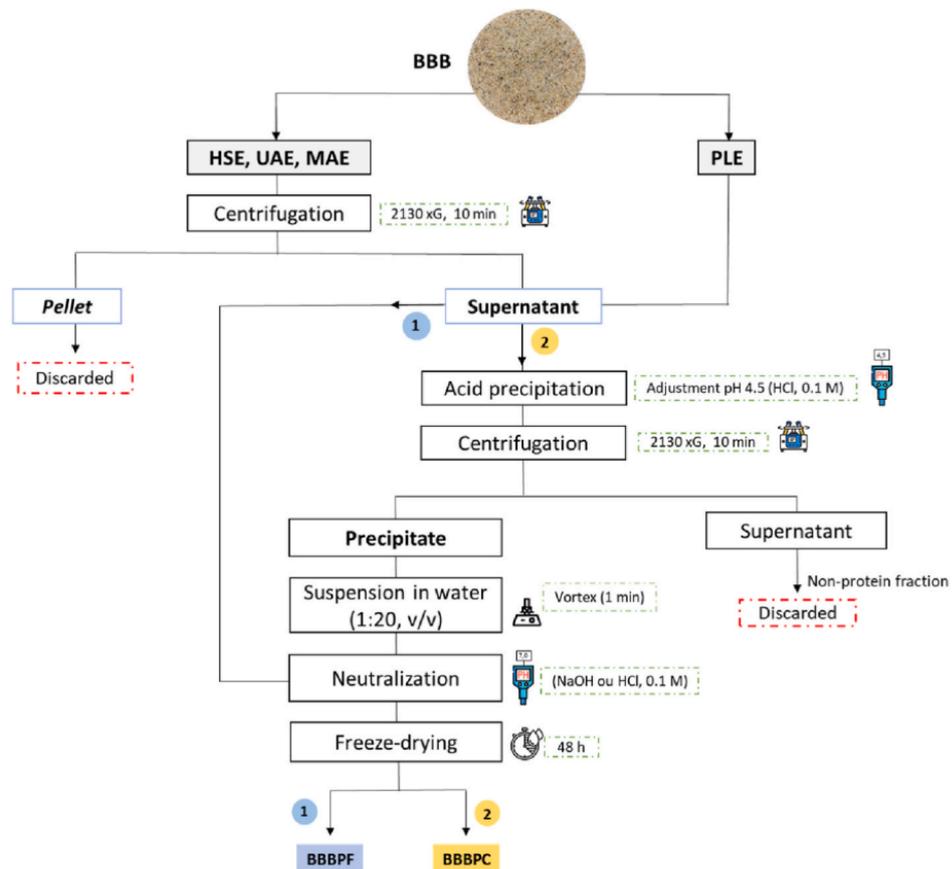
No contexto da busca por soluções diante do aumento populacional, da necessidade de combater a fome e de reduzir os impactos ambientais associados à cadeia produtiva de alimentos, tem surgido uma discussão cada vez mais relevante sobre a identificação de fontes de proteínas sustentáveis de alta qualidade. Esse

debate tem estimulado o avanço das pesquisas relacionadas às proteínas alternativas e ao desenvolvimento de tecnologias para a obtenção mais eficiente desses produtos.

Nesse cenário, o presente estudo propõe utilizar como base de investigação a tese de doutorado elaborada pela pesquisadora Renata Fialho Teixeira, do departamento de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina. O objetivo central da referida tese foi explorar a recuperação da proteína presente no cotilédone quebrado do feijão preto, com foco na aplicação de tecnologias emergentes. O intuito é aprimorar a funcionalidade e a qualidade nutricional dessa proteína, contribuindo assim para o desenvolvimento de alternativas sustentáveis e nutritivas na produção de alimentos.

Na figura 2, temos o fluxograma representativo de todas as etapas desenvolvidas na Tese, desde o preparo e tratamento da amostra até as etapas de extração e precipitação da proteína do coproduto do feijão preto (*Phaseolus vulgaris* L.).

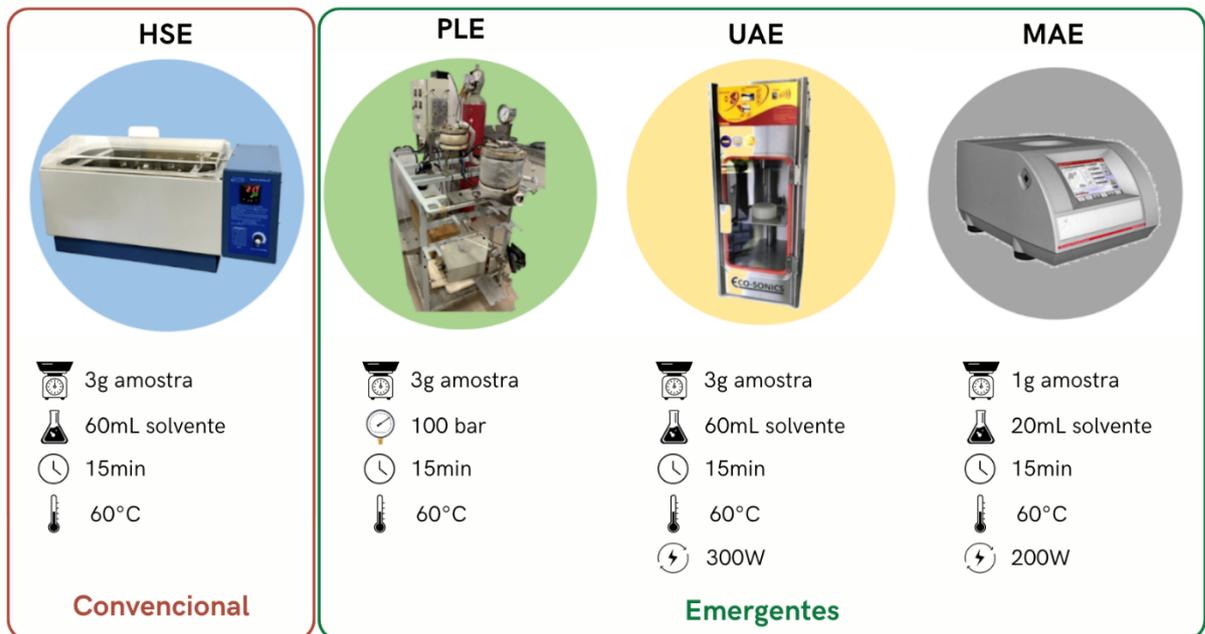
Figura 2. Fluxograma das etapas de extração e precipitação da proteína do feijão preto descascado e quebrado.



Fonte: Adaptado de Teixeira *et al.* (2024)

Em sua tese, a pesquisadora Renata utilizou 4 tecnologias, sendo uma convencional e três emergentes, para a obtenção de farinha proteica e concentrado proteico do coproduto do feijão preto. A principal diferença entre a farinha proteica e o concentrado proteico é a concentração de proteína presente, em que o último possui maior concentração de proteína caracterizando este como um melhor produto final quando analisamos os aspectos nutricionais e seu valor agregado na indústria. Dentre as tecnologias utilizadas, temos: Extração por agitação e aquecimento (HSE), Extração assistida por ultrassom (UAE), Extração por líquido pressurizado (PLE) e Extração assistida por Micro-ondas (MAE) (TEIXEIRA *et al.*, 2023).

Figura 3. Tecnologias utilizadas para extração



Fonte: Adaptado de Teixeira *et al.* (2024)

Durante o curso da pesquisa, Renata empregou a tecnologia de Extração Assistida por Micro-ondas (MAE). No entanto, é importante ressaltar que, apesar da adoção dessa técnica, o presente estudo se concentra exclusivamente nas outras três tecnologias, em virtude da ausência de resultados positivos associados à MAE (TEIXEIRA *et al.* 2024). A tecnologia de extração assistida por micro-ondas utiliza a energia de radiação que é induzida por ondas eletromagnéticas em frequências entre 0,3 e 300 GHz (VILLANUEVA *et al.*, 2018). Em seu estudo Teixeira *et al.* (2024), foi verificado que a aplicação da técnica de MAE, empregando água e água-alcalina como solventes, resultou em menor pureza e rendimento nos concentrados e farinhas

proteicas. Esses resultados adversos podem ser atribuídos, provavelmente, às características intrínsecas do método, tais como a potência do micro-ondas, o tempo de extração e o controle da temperatura para a propagação eficiente de energia.

### **3.2.1 Extração por agitação e aquecimento (HSE)**

Método clássico e convencional de extração que é utilizado para separar um componente desejado de uma mistura, através do uso de um solvente, sendo um método comumente utilizado em laboratórios e pesquisas para extrair compostos orgânicos de matrizes sólidas como plantas e alimentos. Na extração de proteínas, a utilização da aplicação de calor e agitação mecânica neste método impacta na quebra da estrutura celular e conseqüentemente, facilita a liberação de proteínas na solução aquosa. Apesar de ser um processo vantajoso em relação a sua execução e equipamentos necessários, possui um alto consumo energético (TEIXEIRA *et al.*, 2024).

### **3.2.2 Extração assistida por ultrassom (UAE)**

Tecnologia emergente que se baseia na aplicação de ondas ultrassônicas de alta frequência, nas faixas de 20kHz e 1 GHz (CHEEKE, 2002). A cavitação acústica produzida por essas ondas cria uma alta temperatura e pontos de pressão no solvente, o que implica a formação de bolhas de gás que entram em colapso. A rápida implosão das bolhas resulta em muitas transformações físicas e estresse na matriz (microcanais, microjatos, ondas de choque, turbulência e força de cisalhamento intensa) com energia suficiente para romper a parede celular vegetal, facilitando assim a percolação do solvente na matriz e aumentando a transferência de massa (OCHOA-RIVAS *et al.*, 2017; TIWARI, 2015).

Dentre suas vantagens, este método apresenta um menor gradiente de temperatura e possui maior facilidade e rapidez, entretanto, a alta potência aplicada pode levar a implicações negativas na estrutura da proteína.

### **3.2.3 Extração por líquido pressurizado (PLE)**

A tecnologia de extração por líquido pressurizado consiste em realizar extrações em pressões elevadas e temperaturas moderadas a altas em um curto período de tempo, de modo que o fluido de extração permaneça no estado líquido

acima de seu ponto de ebulição normal (ZIELINSKI *et al.*, 2021). Esse método possui diversas vantagens, dentre elas temos que a extração é mais rápida e eficiente quando comparado a outras tecnologias, e esse método também utiliza solventes ecológicos sendo este um grande diferencial. Apesar de ter muitas vantagens, a extração por fluido subcrítico é uma tecnologia que possui muitos custos atrelados a implementação e poucos estudos em relação ao aumento de escala.

A seguir no quadro 1 desenvolvido por Teixeira *et al.* (2023) temos uma análise comparativa das tecnologias que foram utilizadas durante a pesquisa.

Quadro 1. Comparativo tecnologias de extração

<b>Método convencional</b>	<b>Observação geral</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Limitações/Desvantagens</b>	<b>Principais parâmetros</b>
<b>Extração por Agitação e Aquecimento (HSE)</b>	Aplicação de calor e agitação mecânica ajuda a quebrar a estrutura celular, facilitando a liberação de proteínas na solução aquosa	Simplicidade na execução e nos equipamentos necessários	Exposição prolongada ao calor e agitação: degradação da proteína e perda da funcionalidade. Alto consumo de energia e utilização de solvente	Temperatura e velocidade da agitação
<b>Método emergente</b>	<b>Observação geral</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Limitações/Desvantagens</b>	<b>Principais parâmetros</b>
<b>Ultrassom (US)</b>	A cavitação acústica rompe a matriz vegetal	Menor gradiente de temperatura, método rápido e fácil	Alta potência pode desnaturar e alterar a estrutura da proteína com perda de funcionalidade	Frequência, potência/intensidade do UAE
<b>Micro-ondas (MW)</b>	A energia da radiação eletromagnética causa o rápido aquecimento do material	Conveniência, rápida propagação de energia, menor uso de solvente e tempo	Risco de aquecimento prolongado, necessidade de otimização para eficiência energética	Tempo, temperatura, potência e propriedades dielétricas da matriz vegetal
<b>Líquido pressurizado (PLE)</b>	Um fluido pressurizado com maior poder solvente flui pela matriz	Extração rápida e eficiente, alta pureza utilizando condições brandas. Uso de solventes verdes	Altos custos de implementação, poucos estudos com aumento de escala e viabilidade econômica	Pressão, temperatura, vazão, tempo de extração

Fonte: Adaptado de Teixeira *et al.* (2023).

## 4. ANÁLISE

### 4.1 SOFTWARE AGREEPREP

*AGREEprep* é o primeiro *software* desenvolvido para a avaliação das métricas verdes em preparações analíticas de amostras. A ferramenta considera 10 critérios que cobrem diferentes aspectos que contribuem para a análise de impacto ambiental geral da preparação da amostra (WOJNOWSKI *et al.*, 2022).

Os critérios de avaliação baseiam-se nos dez princípios de preparação de amostras verdes, que são:

1. Favorecer a preparação de amostras *in line/in situ*;
2. Usar solventes e reagentes mais seguros;
3. Visar materiais sustentáveis, reutilizáveis e renováveis;
4. Minimizar o desperdício;
5. Minimizar as quantidades de amostras, produtos químicos e materiais;
6. Maximizar o rendimento da amostra;
7. Integrar etapas e promova a automação;
8. Minimizar o consumo de energia;
9. Escolher a configuração de preparação pós-amostra mais ecológica possível para análise;
10. Garantir procedimentos seguros para o operador.

As dez etapas individuais de avaliação no *AGREEprep* recebem pontuações que variam de 0 a 1, com os extremos representando o pior e o melhor desempenho, respectivamente. Cada critério tem um peso padrão na pontuação geral, e os avaliadores podem optar por ajustar esses pesos de acordo com seus objetivos analíticos, desde que justifiquem as alterações. As pontuações de cada critério são ponderadas e combinadas para produzir a pontuação geral, que também varia de 0 a 1, sendo 1 o desempenho ideal. O *software AGREEprep* solicita dados de entrada para cada uma das dez etapas da avaliação e, após a conclusão, produz um pictograma redondo com um círculo no centro mostrando a pontuação geral e dez barras trapezoidais correspondentes aos dez critérios, cada uma com comprimento equivalente ao peso atribuído. A cor de cada elemento muda após a avaliação,

facilitando a identificação dos pontos fracos e fortes do procedimento e sua contribuição para a pontuação final (PENA-PEREIRA, *et al.*, 2022).

O *software* é de código aberto e é compatível tanto em sistema Windows quanto no sistema Mac, podendo ser instalado diretamente através do site oficial. Além da versão desktop do *software*, há também uma versão web que propõe maior acessibilidade e facilidade de manuseio para o usuário. Neste estudo foi utilizado a versão web do *software*.

## 4.2 METODOLOGIA APLICADA

### 4.2.1 Parâmetros e processo

Para este estudo foi necessário adaptar os parâmetros e pesos utilizados no *software*, uma vez que suas etapas são baseadas em métodos analíticos. Além disso, visando uma melhor adaptação e com o enfoque na comparação entre as tecnologias de extração, as etapas subsequentes do processo de obtenção do concentrado proteico (similares para as diferentes tecnologias empregadas) não foram consideradas. Para a avaliação das tecnologias de extração, foram considerados os seguintes aspectos e pesos:

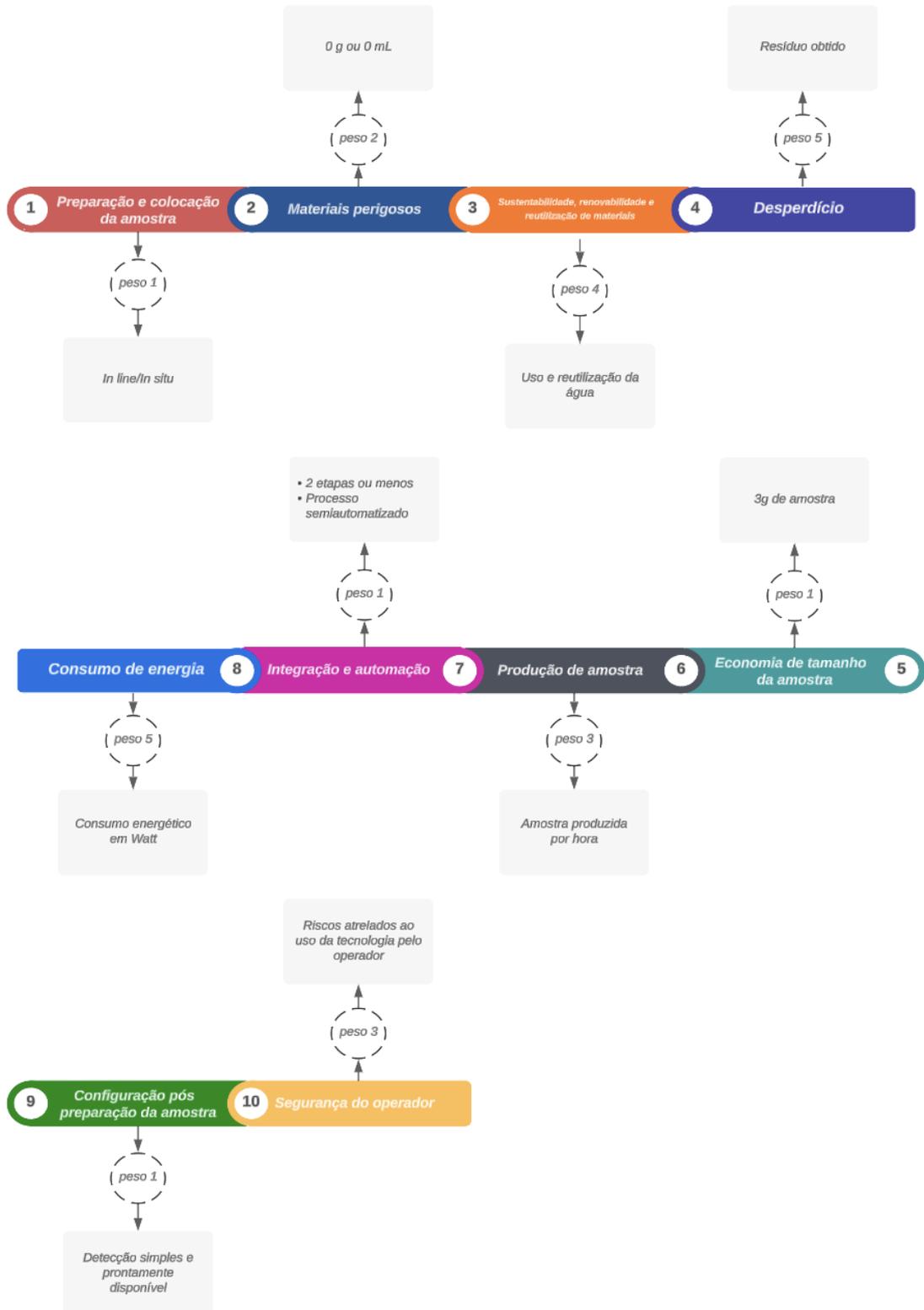
1. Preparação e colocação de amostras: para todas as tecnologias foi padronizado o aspecto *in line/in situ*, esse aspecto diz respeito ao preparo da amostra diretamente no objeto investigado, sem retirada de amostras do mesmo. Apesar do processo para a obtenção do concentrado proteico, incluir a etapa de preparo da amostra, conforme mencionado anteriormente, este estudo foca especificamente na análise da extração do concentrado. É nesta etapa que foram aplicadas diferentes tecnologias, e que serão analisadas e comparadas entre si. Portanto, na etapa de extração não há preparo da amostra, a extração é realizada diretamente sobre a amostra em questão. Assim, o peso atribuído a este parâmetro foi 1.
2. Materiais perigosos: na etapa de extração, não há o uso de materiais perigosos relevantes. Devido ao baixo risco associado, o peso atribuído foi 2.
3. Sustentabilidade, renovabilidade e reutilização de materiais: este parâmetro varia entre as diferentes tecnologias empregadas. Embora a quantidade de solvente tenha sido padronizada (60 mL), para fins comparativos entre cada

tecnologia, o uso da água e a possibilidade de seu reaproveitamento ao final do processo foram os fatores determinantes considerados. Logo, o peso atribuído a este parâmetro foi 4.

4. Desperdício: neste parâmetro foi considerado a quantidade de resíduo obtido em cada extração, havendo variação entre as tecnologias. O peso atribuído a este parâmetro foi 5.
5. Economia de tamanho da amostra: em todas as tecnologias o tamanho da amostra (quantidade adicionada) foi o mesmo. O peso atribuído a este parâmetro foi 1.
6. Produção de amostra: parâmetro que analisa o rendimento da amostra, que neste estudo irá variar entre as tecnologias. O peso atribuído foi 3.
7. Integração e automação: em todas as tecnologias foram considerados o mesmo número de etapas e o grau de automação. O peso atribuído foi 1.
8. Consumo de energia: neste parâmetro temos uma variação entre as tecnologias, tendo 5 como peso atribuído.
9. Configuração pós-preparação de amostra para análise: etapa com viés analítico, e por padrão foi considerado em todas as tecnologias a opção de detecção simples e prontamente disponível. O peso atribuído foi 1.
10. Segurança do operador: todas as tecnologias oferecem risco elétrico ao operador, todavia, uma tecnologia específica oferece maior risco ao colaborador. Tendo assim uma variação entre as tecnologias, e o peso atribuído foi 3.

Na figura 4 temos o fluxograma de etapas da avaliação de métrica verde do *software AgreePrep* com os respectivos pesos e parâmetros que foram adaptados e considerados neste estudo.

Figura 4. Fluxograma *AgreePrep* adaptado



Fonte: a autora (2024)

### 4.2.2 Input dos dados

Os dados de entrada foram obtidos a partir da pesquisa elaborada pela doutoranda Renata Fialho Teixeira. É importante destacar que os valores de consumo foram calculados com base nas informações disponíveis sobre os equipamentos utilizados. Em suma, a inserção dos dados e interpretação do *software* foram realizadas com adaptações e estimativas que foram julgadas pertinentes ao processo de extração. Os dados de consumo energético e de água para cada tecnologia são apresentados na tabela 2. Os valores considerados no *software* foram os totalizadores de cada parâmetro.

Tabela 1. Dados de entrada

PLE			Tecnologias de extração:			HSE		
Pressão (bar)	Pr	100	UAE			Potência do banho (W)	Pb	2260
Vazão da bomba (mL/min)	Qb	4	Potência do ultrassom (W)	Pu	300	tempo da extração (h)	tb	0,25
Potência da bomba (W)	Pb	90	tempo da extração (h)	tb	0,25	tempo para aquecimento (h)	ta	0,167
Potência sist. aquecimento (W)	Pa	200	tempo para aquecimento (h)	ta	0,167	<b>Consumo de energia (W)</b>	<b>QE</b>	<b>941,67</b>
Potência controle de temperatura (N1030)	Pc	3,25	<b>Consumo de energia (W)</b>	<b>QE</b>	<b>708,33</b>			
Potência indicador de temperatura (N1500)	Pc	4,875						
tempo de bomba (h)	tb	0						
tempo para aquecimento + pressurização (h)	ta	0,167						
<b>Consumo de energia (W)</b>	<b>QE</b>	<b>124,2188</b>						
<b>Consumo de água (L) - estimativa</b>			<b>Consumo de água (L) - estimativa</b>			<b>Consumo de água (L) - estimativa</b>		
Preparo do solvente	0,06		Preparo do solvente	0,06		Preparo do solvente	0,48	
"Pulmão" da bomba	0,03		Água do banho	4		Água do banho	7,5	
Leito extrator	0,09		<b>Total (L)</b>	<b>4,06</b>		<b>Total (L)</b>	<b>7,98</b>	
Purga + perdas	0,005							
<b>Total (L)</b>	<b>0,185</b>							
<b>Desperdício (g) - estimativa</b>			<b>Desperdício (g) - estimativa</b>			<b>Desperdício (g) - estimativa</b>		
Resíduo gerado	3		Resíduo gerado	4,5		Resíduo gerado	5,2	

Fonte: Adaptado de Teixeira *et al.* (2024)

### 4.3 TECNOLOGIA DE HSE

Para a obtenção do gráfico referente à métrica verde da tecnologia de extração por agitação e aquecimento (HSE), considerado um método convencional de extração da proteína, foram considerados os seguintes dados de entrada em cada parâmetro:

1. Preparação e colocação da amostra: *in-line/in-situ*.
2. Materiais perigosos: 0 g ou 0 mL.
3. Sustentabilidade, renovabilidade e reutilização de materiais: 25-50% dos reagentes e materiais são sustentáveis e renováveis. Neste parâmetro foi considerado a água do banho utilizada, em que nesta tecnologia apesar de utilizar água de banho, ela pode ser reaproveitada para mais de uma extração.
4. Desperdício: 5,2 g de resíduo gerado.

5. Economia de tamanho da amostra: 3 g.
6. Produção de amostra: 32 amostras/h.
7. Integração e automação: 2 etapas ou menos (apenas a etapa de extração), e processo semi automatizado.
8. Consumo de energia: 941,66 W.
9. Configuração pós-preparação de amostra para análise: simples.
10. Segurança do operador: 1 perigo (risco elétrico).

A pontuação obtida foi de 0,48 sendo os parâmetros com maior peso e impacto na pontuação, o consumo energético e o fator de uso de materiais reutilizáveis, em que neste último parâmetro embora a tecnologia HSE utilize um alto volume de água, é importante salientar que esta água pode ser reaproveitada para outras extrações. Abaixo na figura 5 temos o relatório gerado pelo *software* que trás o pictograma gerado assim como o detalhamento dos parâmetros, pontuações e pesos considerados para esta tecnologia.

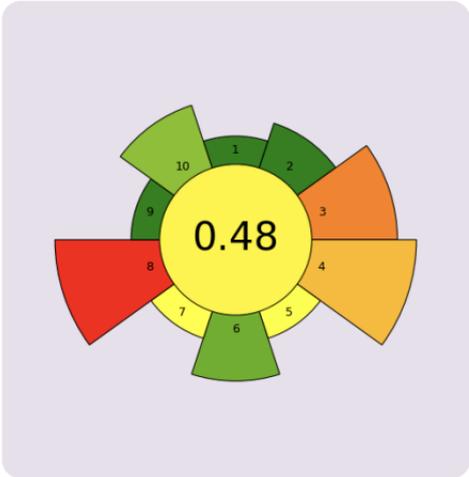
Figura 5. Relatório *AgreePrep* para a tecnologia HSE

# AGREEprep

## Analytical Greenness Metric for Sample Preparation

16/06/2024 14:39:45

Report



#	Criterion	Score	Weight
1.	Sample preparation placement: In-line/In situ	1.00	1
2.	Hazardous materials: 0 [g or mL]	1.00	2
3.	Sustainability, renewability, and reusability of materials: 25-50% of reagents and materials are sustainable or renewable	0.25	4
4.	Waste: 5.2 [g or mL]	0.36	5
5.	Size economy of the sample: Mass or volume of the sample: 3 [g or mL]	0.51	1
6.	Sample throughput: 32 [samples/h]	0.82	3
7.	Integration and automation: Sample prep. steps: 2 steps or fewer, Semi-automated systems	0.50	1
8.	Energy consumption: 941.66 [W]	0.00	5
9.	Post-sample preparation configuration for analysis: Simple, readily available detection: smartphones, desktop scanners, paper strips, etc.	1.00	1
10.	Operator's safety: 1 hazard	0.75	3

Fonte: a autora (2024)

#### 4.4 TECNOLOGIA DE UAE

Na aplicação da métrica verde para a tecnologia emergente de extração assistida por ultrassom (UAE), foram considerados os seguintes dados de entrada em cada parâmetro:

1. Preparação e colocação da amostra: *in-line/in-situ*.
2. Materiais perigosos: 0 g ou 0 mL.
3. Sustentabilidade, renovabilidade e reutilização de materiais: 25-50% dos reagentes e materiais são sustentáveis e renováveis. Neste parâmetro também foi considerada a volumetria de água e principalmente a água do banho que é acoplada ao equipamento, em que nesta tecnologia também pode ser reaproveitada para mais de uma extração.
4. Desperdício: 4,5 g de resíduo gerado.
5. Economia de tamanho da amostra: 3 g.
6. Produção de amostra: 4 amostras/h.
7. Integração e automação: 2 etapas ou menos (apenas a etapa de extração), e processo semi automatizado.
8. Consumo de energia: 708,33 W.
9. Configuração pós-preparação de amostra para análise: simples.
10. Segurança do operador: 1 perigo (risco elétrico).

A pontuação obtida foi de 0,40 sendo que os parâmetros com maior peso e impacto na pontuação foram também o desperdício de água considerado no parâmetro de reutilização de materiais e o consumo energético. Abaixo na figura 6 temos o relatório gerado pelo software que traz o pictograma gerado assim como o detalhamento dos parâmetros, pontuações e pesos considerados para esta tecnologia.

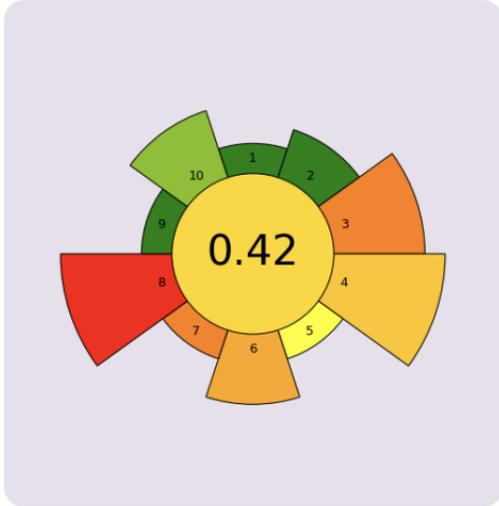
Figura 6. Relatório *AgreePrep* para a tecnologia UAE

# AGREEprep

## Analytical Greenness Metric for Sample Preparation

17/06/2024 13:24:15

Report



#	Criterion		Score	Weight
1.	Sample preparation placement:	In-line/In situ	1.00	1
2.	Hazardous materials:	0 [g or mL]	1.00	2
3.	Sustainability, renewability, and reusability of materials:	25-50% of reagents and materials are sustainable or renewable	0.25	4
4.	Waste:	4.5 [g or mL]	0.39	5
5.	Size economy of the sample	Mass or volume of the sample: 3 [g or mL]	0.51	1
6.	Sample throughput:	4 [samples/h]	0.33	3
7.	Integration and automation	Sample prep. steps: 2 steps or fewer, Manual systems	0.25	1
8.	Energy consumption:	708.33 [W]	0.00	5
9.	Post-sample preparation configuration for analysis:	Simple, readily available detection: smartphones, desktop scanners, paper strips, etc.	1.00	1
10.	Operator's safety:	1 hazard	0.75	3

Fonte: a autora (2024)

#### 4.5 TECNOLOGIA DE PLE

Para a obtenção da métrica verde da tecnologia emergente de extração por líquido pressurizado, foram considerados os seguintes dados de entrada em cada parâmetro:

1. Preparação e colocação da amostra: *in-line/in-situ*.
2. Materiais perigosos: 0 g ou 0 mL.
3. Sustentabilidade, renovabilidade e reutilização de materiais: >75% dos reagentes e materiais são sustentáveis e renováveis.
4. Desperdício: 3 g de resíduo obtido. A tecnologia PLE não necessita da etapa de centrifugação para separação da MP do produto proteico, logo consideramos como desperdício apenas a própria MP.
5. Economia de tamanho da amostra: 3 g.
6. Produção de amostra: 4 amostras/h.
7. Integração e automação: 2 etapas ou menos (apenas a etapa de extração), e processo semi automatizado.
8. Consumo de energia: 124,21 W.
9. Configuração pós-preparação de amostra para análise: simples.
10. Segurança do operador: 2 perigos (risco elétrico e risco da alta pressão).

É importante salientar que no parâmetro 3 foi considerado uma estimativa e análise do uso da água na etapa de extração (somente para preparo do solvente). Nesta tecnologia de alta pressão, a fonte de calor é fornecida por um sistema de manta de aquecimento elétrico, diferente das demais tecnologias que necessita de um banho com água. No entanto, no parâmetro 10 foi considerado como 2 perigos o risco relacionado à alta pressão, uma vez que o equipamento utilizado em escala de laboratório, fornece um alto risco ao operador quando comparado às demais tecnologias.

A pontuação obtida foi de 0,53 sendo os parâmetros com maior peso e impacto na pontuação foi o de uso de materiais sustentáveis e o menor consumo energético dentre as tecnologias analisadas. Abaixo na figura 7 temos o relatório gerado pelo software que traz o pictograma gerado assim como o detalhamento dos parâmetros, pontuações e pesos considerados para esta tecnologia.

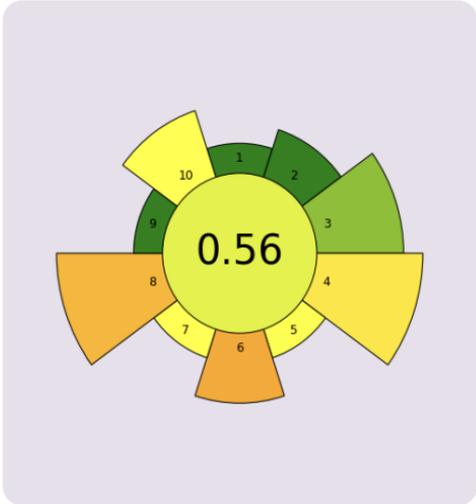
Figura 7. Relatório *AgreePrep* para a tecnologia PLE

# AGREEprep

## Analytical Greenness Metric for Sample Preparation

17/06/2024 13:56:28

Report



#	Criterion	Score	Weight
1.	Sample preparation placement: In-line/In situ	1.00	1
2.	Hazardous materials: 0 [g or mL]	1.00	2
3.	Sustainability, renewability, and reusability of materials: > 75% of reagents and materials are sustainable or renewable	0.75	4
4.	Waste: 3 [g or mL]	0.45	5
5.	Size economy of the sample: Mass or volume of the sample: 3 [g or mL]	0.51	1
6.	Sample throughput: 4 [samples/h]	0.33	3
7.	Integration and automation: Sample prep. steps: 2 steps or fewer, Semi-automated systems	0.50	1
8.	Energy consumption: 124.21 [W]	0.35	5
9.	Post-sample preparation configuration for analysis: Simple, readily available detection: smartphones, desktop scanners, paper strips, etc.	1.00	1
10.	Operator's safety: 2 hazards	0.50	3

Fonte: a autora (2024)

#### 4.6 ANÁLISE COMPARATIVA

Como parte do objetivo primordial do estudo, este tópico irá abordar uma análise detalhada comparando as três tecnologias em relação aos resultados obtidos das métricas verdes de cada uma.

Ao comparar as três tecnologias de maneira geral, observamos que cada uma possui características distintas que influenciam seu desempenho e impacto. A tecnologia de extração por líquido pressurizado é mais recente, mas já é citada por sua eficiência e inovação, além de que uma das maiores vantagens é a carga nutricional em que nesta tecnologia comparada às demais é a que tivemos maior concentração de proteína. A outra tecnologia emergente de extração é a assistida por ultrassom (UAE) que é reconhecida por sua rapidez e facilidade, entretanto é a tecnologia com maior risco de desnaturação irreversível da proteína. Por fim, temos a tecnologia convencional de extração por agitação e aquecimento (HSE), que destaca-se por sua flexibilidade e facilidade de uso, permitindo uma ampla gama de utilizações.

Tendo como diretriz o impacto ambiental de cada tecnologia, no geral as 3 tecnologias tiveram pontuações próximas dentro da metodologia de métrica verde, não havendo diferenças bruscas entre uma e outra. Todavia, foi observado que a tecnologia de PLE demonstrou um resultado mais favorável, sendo esta dentre as demais tecnologias de extração a com menor impacto ambiental.

Quando analisamos as outras duas tecnologias, HSE e UAE, observamos que ambas possuem um alto consumo energético e de água quando comparada à tecnologia de PLE. Por outro lado, é interessante analisar que apesar da UAE ser uma tecnologia emergente, quando comparada à tecnologia convencional de HSE, sua pontuação é inferior, sendo então apontada como a tecnologia com maior impacto ambiental. Pelos dados e pela metodologia das métricas verdes podemos inferir que isso ocorre devido ao fato de que apesar da UAE possuir um consumo energético e de água inferior à HSE, a última possui um grande diferencial que impacta na análise geral que é o rendimento. Na tecnologia de HSE, temos o maior rendimento de amostras por hora dentre as 3 tecnologias, fazendo com que esta se torne a segunda melhor opção de tecnologia no que tange ao aspecto de impacto ambiental calculado a partir das métricas verdes.

Apesar da PLE ser uma tecnologia de extração já conhecida pela química verde e pela sua eficiência, quando comparado às demais tecnologias utilizando a

metodologia da métrica verde, esta tecnologia possui alguns desafios no seu processo que corroboram para sua pontuação não ser tão elevada e distante das demais tecnologias. Pode-se inferir que isso se dá devido a métrica verde considerar a segurança do operador e produção de amostras por hora de maneira considerável, ambas com peso 3, e dentre as tecnologias a com maior risco para o operador e com menor rendimento de amostras por hora (comparado com a HSE) é a PLE. Entretanto, devemos frisar que o equipamento de alta pressão utilizado para as extrações é *homemade*, permitindo apenas uma extração por vez. Outro aspecto relevante que contribui para que a PLE tenha um menor impacto ambiental pela ótica da métrica verde, é que dentre as tecnologias a PLE é a que utiliza a maior porcentagem de materiais reutilizáveis, sendo as outras tecnologias além de terem alto consumo energético e de água também utilizam uma porcentagem mais baixa de materiais que são reutilizáveis.

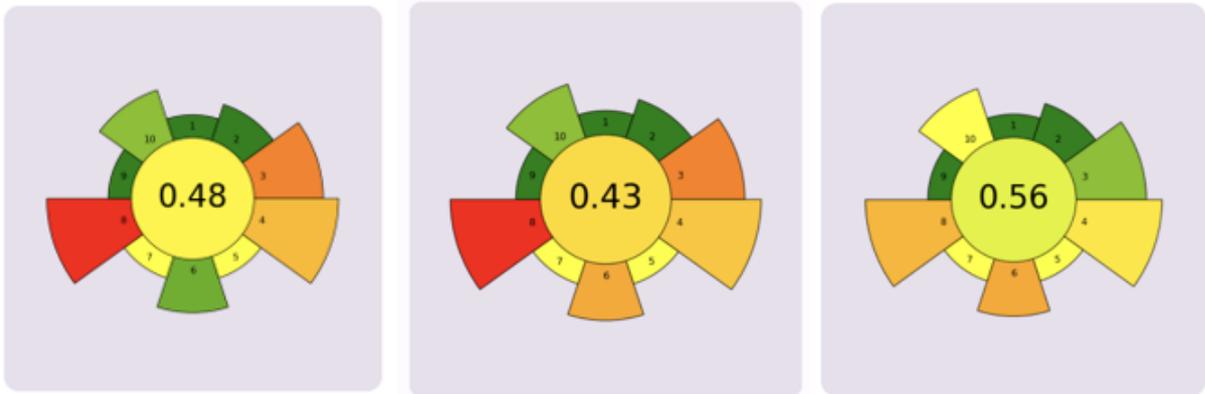
Outro fator de destaque para a tecnologia PLE é que não há necessidade da etapa de centrifugação após a etapa de extração, sendo este um grande diferencial da tecnologia em si pois este fator impacta também na facilidade de utilização para uma nova extração. Já na tecnologia UAE e HSE, se faz necessário a etapa de centrifugação após a extração para que seja possível separar a MP do produto e conseqüentemente isso irá gerar uma quantidade maior de resíduo, sendo este também outro fator competitivo da PLE frente às demais tecnologias.

Quando analisamos o parâmetro de consumo de água identificamos que as tecnologias de HSE e UAE exigem maior consumo de água, uma vez que ambas tecnologias utilizam um banho como fonte de calor, e que apesar desta água do banho poder ser reaproveitada para outra extração ainda assim é um consumo elevado de recurso hídrico quando comparamos à PLE.

Apesar da PLE ser em pontuação a mais favorável no que tange a métrica verde de impacto ambiental, esta tecnologia é dentre as demais a que possui maior risco ao operador devido ao processo de alta pressão utilizada.

Na figura 8 temos o pictograma de cada tecnologia lado a lado trazendo uma visão mais clara do abordado acima e uma análise visual mais comparativa de quais parâmetros levaram a nota de cada tecnologia em relação à métrica verde.

Figura 8. Pictograma do *AgreePrep* das tecnologias HSE, UAE e PLE respectivamente



Fonte: a autora (2024)

Abaixo temos a tabela 2 com os principais aspectos comparativos de cada tecnologia obtida a partir da análise prévia que consta no quadro 1 e a partir dos resultados da métrica verde obtidos com o *software*.

Tabela 2. Análise comparativa dos principais parâmetros de impacto ambiental de cada tecnologia

Tecnologia	Pontuação métrica verde	Consumo energético (W)	Consumo de água (L)	Resíduo gerado (g)	Produtividade	Vantagens	Desvantagens
HSE	0,48	941,66	7,56	5,20	32	Maior rendimento e menor risco atrelado ao operador	Alto consumo energético e de água
UAE	0,43	708,33	4,06	4,50	4	Método rápido e fácil	Perda parcial da funcionalidade da proteína
PLE	0,56	124,21	0,185	3,00	4	Eficácia, baixo consumo energético e de água	Risco ao operador e alto custo de implementação

Fonte: a autora (2024)

## 5. CONCLUSÃO

A aplicação do *software AGREEprep* neste estudo demonstrou ser uma ferramenta eficaz e abrangente para avaliar o impacto ambiental de diferentes tecnologias de extração do concentrado proteico. Apesar da ferramenta ter o viés para métodos analíticos, o *software* permitiu que obtivesse uma análise detalhada e comparativa das três tecnologias de extração, considerando os critérios essenciais para o caso de uso aplicado.

A tecnologia de extração por líquido pressurizado (PLE) destacou-se como a opção mais favorável em termos de impacto ambiental, apresentando os menores consumos de energia e água, além de uma alta eficiência na reutilização de materiais, apesar dos riscos associados à alta pressão e da menor quantidade de produto por hora, em comparação à tecnologia de extração por agitação e aquecimento (HSE).

A tecnologia de HSE, como um método convencional, mostrou-se competitiva, devido à alta produtividade de amostras por hora e flexibilidade no uso. Seu maior consumo energético e de água foi compensado pelo menor impacto em termos de resíduos gerados e pela eficiência operacional, posicionando-a como a segunda melhor opção, após a PLE. Já a tecnologia de extração assistida por ultrassom (UAE) apresentou um maior impacto ambiental, além da perda de funcionalidade da proteína. Cabe salientar que tanto a HSE quanto UAE exigem a necessidade de etapas adicionais para a obtenção do produto proteico, como a centrifugação, que aumentam o consumo de recursos e a geração de resíduos.

Diante da crise climática e do aumento exponencial da população mundial, a necessidade de adotar práticas sustentáveis e eficientes na produção de alimentos torna-se cada vez mais urgente. Este estudo, ao utilizar o *AGREEprep*, reafirma a importância de considerar múltiplos parâmetros ambientais e operacionais na escolha de tecnologias de extração.

A análise revelou que a tecnologia de PLE está dentre as três tecnologias abordadas no estudo com o menor impacto ambiental, sendo a mais recomendada tanto no que tange a qualidade nutricional do coproduto quanto à questão ambiental. A busca por métodos mais sustentáveis e inovadores na recuperação de alimentos que são subutilizados, como o cotilédone quebrado do feijão preto, é um passo vital para enfrentar os desafios ambientais e nutricionais, alinhando-se com os objetivos

globais de redução do desperdício de alimentos e promoção de uma economia circular.

Por fim, é importante reforçar que a métrica verde é uma metodologia utilizada para métodos analíticos e o que este estudo se propôs foi a realização de uma adaptação desta metodologia para analisar de forma quantitativa as tecnologias de extração. Com isso, os resultados obtidos no presente estudo são uma estimativa de impacto ambiental através dos parâmetros adaptados na métrica verde para a tecnologia de extração, e todos os dados considerados são a nível experimental e na escala de laboratório, logo, para uma conclusão mais aprofundada, assertiva e a nível industrial se faz necessário um estudo mais amplo do impacto ambiental causado por cada tecnologia.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040:** Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 21p, 2001. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5509291/mod\\_resource/content/1/NBR%20ISO%2014040%20-%202001%20-%20Gest%C3%A3o%20Ambiental%20Ciclo%20de%20Vida.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5509291/mod_resource/content/1/NBR%20ISO%2014040%20-%202001%20-%20Gest%C3%A3o%20Ambiental%20Ciclo%20de%20Vida.pdf). Acesso em: 26 de Junho de 2024.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Mudança do Clima 2023: Relatório Síntese. **Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima - IPCC.** p.1-182. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc>. Acesso em: 26 de Junho de 2024.
- CAVENAGHI, V. **Análise de Ciclo de Vida (ACV).** Unesp. Faculdade de Engenharia de Bauru. Gestão Ambiental, 2015. Disponível em: [https://pessoas.feb.unesp.br/vagner/files/2014/12/GA\\_Texto-Sem-8.pdf](https://pessoas.feb.unesp.br/vagner/files/2014/12/GA_Texto-Sem-8.pdf). Acesso em: 26 de Junho de 2024
- CHEEKE, D. **Fundamentals and applications of ultrasonic waves.** Boca Raton: CRC Press. 2002.
- EMBRAPA. **Visão 2030: o futuro da agricultura brasileira.** – Brasília, DF: Embrapa, p. 212, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/visao/mudanca-do-clima>. Acesso em: 26 de Junho de 2024.
- FAO. Food and Agriculture Organization. Programas no Brasil. **Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura.** Disponível em: <https://www.fao.org/brasil/programas-e-projetos/pt/>. Acesso em: 26 de Junho de 2024
- FAO. Food and Agriculture Organization. The State of Food and Agriculture 2013: Food systems for better nutrition. **Food and Agriculture Organization of the United Nations.** Rome, FAO. P.1-114, 2013. Disponível em: <https://www.fao.org/4/i3300e/i3300e.pdf>. Acesso em: 26 de Junho de 2024
- FAO, WFP and IFAD. The State of Food Insecurity in the World 2012: Economic growth is necessary but not sufficient to accelerate reduction of hunger and malnutrition. **Food and Agriculture Organization of the United Nations.** Rome, FAO. P.1-65, 2012. Disponível em: <https://www.fao.org/4/i3027e/i3027e.pdf>. Acesso em: 26 de Junho de 2024.
- GDRC. THE GLOBAL DEVELOPMENT RESEARCH CENTER. **Defining Life Cycle Assessment.** 2017. Disponível em: <http://www.gdrc.org/uem/lca/lca-define.html>. Acesso em: 27 de junho de 2024.
- KARUPPIAH, K.; SANKARANARAYANAN, B.; ALI, S.M. Evaluating the challenges to Life Cycle Assessment using Best-Worst Method and Decision-Making Trial and

Evaluation Laboratory. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v.42, n. 1, e 13991, 2023. Disponível em: <https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ep.13991>. Acesso em: 26 de Junho de 2024.

LENARDÃO, E.J. *et al.* “Green Chemistry”: os 12 princípios da química verde e sua inserção nas atividades de ensino e pesquisa. **Química Nova**, v. 26, n. 1, p.123-129, 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/XQTWJnBbnJWtBCbYsKqRwsy>. Acesso em: 26 de Junho de 2024.

MARTÍNEZ, J.; CORTÉS, J.F.; MIRANDA, R. Green Chemistry Metrics, a Review. **Processes**. n. 10, v. 7, e 1274, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/10/7/1274>. Acesso em: 26 de Junho de 2024.

NAVARRO, M.J. *et al.* Ultrasound versus microwave as green processes for extraction of rosmarinic, carnosic and ursolic acids from Rosemary. **Ultrasonics Sonochemistry**. v. 27, p. 102-109. 2015. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417715001352?fr=RR-2&ref=pdf\\_download&rr=894d4501ad823652](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417715001352?fr=RR-2&ref=pdf_download&rr=894d4501ad823652). Acesso em: 26 de Junho de 2024.

OCHOA-RIVAS, A. *et al.* Microwave and ultrasound to enhance protein extraction from peanut flour under alkaline conditions: Effects in yield and functional properties of protein isolates. **Food and Bioprocess Technology**, v.10, n.3, p.543–55, 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-016-1838-3>. Acesso em: 26 de Junho de 2024.

PENA-PEREIRA, F. *et al.*, A Tutorial on AGREEprep an Analytical Greenness Metric for Sample Preparation. **Advances in Sample Preparation**, v.3, e.100025, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772582022000225>. Acesso em 26 de Junho de 2024.

SAJID, M; PŁOTKA-WASYLKA, J. Green analytical chemistry metrics: A review. **Talanta**, v. 238, part 2, e. 123046. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0039914021009681>. Acesso em: 26 de Junho de 2024.

SEO, E.S.M.; KULAY, L.A. Avaliação do Ciclo de Vida: Ferramenta Gerencial para Tomada de Decisão. **INTERFACEHS – Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente**, v.1, n.1, Art 4, 2006. Disponível em: <https://www.repositorio-api.ipen.br/server/api/core/bitstreams/5cbcc7da-9499-429a-bf24-d077d1480882/content>. Acesso em: 26 de Junho de 2024.

TEIXEIRA, R. F. *et al.* Unveiling the potential of pressurized liquid extraction for recovering protein fractions from broken black beans: Insights into thermal and structural Properties. **Food Hydrocolloids**, n.149, e.109649. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0268005X23011955>. Acesso em: 26 de Junho de 2024.

TEIXEIRA, R. F. *et al.* Prospects on emerging eco-friendly and innovative technologies to add value to dry bean proteins. **Crit Rev Food Sci Nutr.** v. 21, p.1-25, 2023. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37341113/>. Acesso em: 26 de Junho de 2024.

TIWARI, B. K. Ultrasound: A clean, green extraction technology. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v.71, p.100–9, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016599361500148X>. Acesso em: 26 de Junho de 2024.

VIGON, B.W. *et al.* **Life-cycle assessment: inventory guidelines and principles.** Cincinnati: Ohio. Ed. RREL / USEPA, 108 p. 1993. Disponível em: <https://www.efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=322840d20a4b1c5c90009d26375add6c26a045cd>. Acesso em: 26 de Junho de 2024.

VILLANUEVA, M. *et al.* Microwave absorption capacity of rice flour. Impact of the radiation on rice flour microstructure, thermal and viscometric properties. **Journal of Food Engineering**, v.224, p.156–64, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877417305575>. Acesso em: 26 de Junho de 2024

WOJNOWSKI, W. *et al.* AGREEprep – Analytical greenness metric for sample preparation. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 149, e.116553. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016599362200036X?via%3DiHub>. Acesso em: 26 de Junho de 2024

ZIELINSKI, A. A. F. *et al.* High-pressure fluid technologies: Recent approaches to the production of natural pigments for food and pharmaceutical applications. **Trends in Food Science & Technology**, v.118, part b, p.850–69, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924224421006087>. Acesso em: 26 de Junho de 2024

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil.** Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs> .