

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

GUSTAVO FERREIRA FRANCO

GUSTAVO PEREIRA GENEROSO

EXTRAÇÃO DE CAFEÍNA DE SUBPRODUTOS

DO BENEFICIAMENTO DO CAFÉ: POLPA E CASCA – UMA REVISÃO

POÇOS DE CALDAS/MG

2025

GUSTAVO FERREIRA FRANCO

GUSTAVO PEREIRA GENEROSO

EXTRAÇÃO DE CAFEÍNA DE SUBPRODUTOS

DO BENEFICIAMENTO DO CAFÉ: POLPA E CASCA – UMA REVISÃO

Trabalho de conclusão de curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Química pela Universidade Federal de Alfenas. Orientadora: Profa. Dra. Melina Savioli Lopes.

POÇOS DE CALDAS/MG

2025

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Franco, Gustavo Ferreira.

Extração de cafeína de subprodutos do beneficiamento do café: polpa e casca - uma revisão / Gustavo Ferreira Franco, Gustavo Pereira Generoso. - Poços de Caldas, MG, 2025.

40 f. : il. -

Orientador(a): Melina Salvioli Lopes.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2025.
Bibliografia.

1. Cafeína. 2. Subprodutos do café. 3. Extração. 4. Sustentabilidade. 5. Economia verde. I. Generoso, Gustavo Pereira. II. Lopes, Melina Salvioli, orient. III. Título.

GUSTAVO FERREIRA FRANCO


GUSTAVO PEREIRA GENEROSO

**EXTRAÇÃO DE CAFEÍNA DE SUBPRODUTOS
DO BENEFICIAMENTO DO CAFÉ: POLPA E CASCA – UMA REVISÃO**

A Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação da Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Química pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Processos de separação.

Aprovado em: 14 de novembro de 2025

Profa. Dra. Melina Savioli Lopes
Universidade Federal de Alfenas

Documento assinado digitalmente
 **MELINA SAVIOLI LOPES**
Data: 04/12/2025 18:05:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Erika Coaglia Trindade Ramos
Universidade Federal de Alfenas

Giancarlo de Souza Dias
Universidade Estadual de Campinas

AGRADECIMENTOS

Agradecemos, antes de tudo, a Deus, pela força, proteção e discernimento concedidos ao longo de toda nossa trajetória acadêmica. Sua presença foi fundamental para que chegássemos até aqui.

À Professora Dra. Melina Salvioli Lopes, manifestamos nossa imensa gratidão pela orientação cuidadosa, pela paciência, dedicação e por todo o conhecimento transmitido durante o desenvolvimento deste trabalho. Sua atuação foi decisiva para o nosso aprimoramento pessoal e profissional.

Estendemos nossos agradecimentos às nossas famílias, pelo apoio constante, incentivo diário, compreensão nos momentos de ausência e por sempre acreditarem no nosso potencial. Ter esse suporte foi essencial para que superássemos cada desafio.

Agradecemos ainda a todos que contribuíram, de qualquer forma, para a realização deste trabalho — colegas, amigos, professores e colaboradores. Cada gesto, palavra e auxílio oferecido teve grande importância na sua construção.

RESUMO

O café é uma das commodities mais relevantes globalmente, cujo beneficiamento gera grandes quantidades de resíduos, como a polpa e a casca, representando um desafio ambiental e uma oportunidade econômica. Este trabalho teve como objetivo realizar uma revisão bibliográfica detalhada sobre os métodos de extração de cafeína desses subprodutos, examinando criticamente as tecnologias disponíveis, seus fundamentos, condições operacionais, rendimentos, eficiência energética e potencial de aplicação industrial. Foram revisados métodos tradicionais, como a extração sólido-líquido convencional e via Soxhlet, e métodos modernos, como a extração assistida por ultrassom (USAE), com CO₂ supercrítico, com solventes eutéticos profundos (DES) e hidroalcoólica. Os resultados demonstraram que técnicas modernas, como a USAE, podem ser significativamente mais eficientes, alcançando rendimentos superiores de cafeína (até 15,6 g/kg de polpa seca) com menor consumo energético (3,4 vezes menor que o método convencional). A extração com DES também se mostrou promissora, com rendimentos de até 5,45 mg/g de polpa seca, enquanto o CO₂ supercrítico destacou-se pela alta seletividade. Conclui-se que a valorização dos resíduos do café por meio da extração de cafeína é viável e alinhada com os princípios da economia circular e da química verde, podendo reduzir impactos ambientais e agregar valor à cadeia produtiva do café.

Palavras-chave: Cafeína, subprodutos do café, extração, sustentabilidade e economia circular.

ABSTRACT

Coffee is one of the most globally relevant commodities, whose processing generates large quantities of residues, such as pulp and husk, representing both an environmental challenge and an economic opportunity. This work aimed to conduct a detailed bibliographic review on the methods for extracting caffeine from these by-products, critically examining the available technologies, their fundamentals, operational conditions, yields, energy efficiency, and potential for industrial application. Traditional methods, such as conventional solid-liquid extraction and Soxhlet extraction, were reviewed, alongside modern methods, such as ultrasound-assisted extraction (USAE), supercritical CO₂ extraction, deep eutectic solvents (DES) extraction, and hydroalcoholic extraction. The results demonstrated that modern techniques, such as USAE, can be significantly more efficient, achieving superior caffeine yields (up to 15.6 g/kg of dry pulp) with lower energy consumption (3.4 times lower than the conventional method). DES extraction also proved promising, with yields of up to 5.45 mg/g of dry pulp, while supercritical CO₂ stood out for its high selectivity. It is concluded that the valorization of coffee residues through caffeine extraction is viable and aligned with the principles of the circular economy and green chemistry, potentially reducing environmental impacts and adding value to the coffee production chain.

Keywords: Caffeine, coffee by-products, extraction, sustainability, and circular economy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Quantidade de publicações anuais dentro do assunto tratado neste trabalho.....	3
Figura 2 - Economia circular, química verde e sustentabilidade do café	4
Figura 3 - Diagrama comparativo entre processo seco, processo úmido e processo.....	7
Figura 4 - Anatomia do fruto café	10
Figura 5 - Diagrama de blocos da extração sólido-líquido convencional vs extração assistida por ultrassom.....	23
Figura 6 - Diagrama de blocos da extração sólido-líquido com etapa de pré-tratamento (torrefação).....	25
Figura 7 - Diagrama de blocos da extração Soxhlet.	27
Figura 8 - Diagrama de blocos da extração com CO2 supercrítico, entre a polpa e a casca do café.....	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Propriedades físico-químicas do café	8
Tabela 2 - Composição química da casca de café em base seca.....	11
Tabela 3 - Composição química aproximada da polpa de café (em %)	12
Tabela 4 - Comparativo dos Métodos de Extração de Cafeína de Polpa e Casca de Café	31

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo geral.....	4
1.2.2 Objetivos Específicos	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Métodos de Beneficiamento do Café.....	5
2.1.1 Processo Seco (Dry Process - DP).....	5
2.1.2 Processo Úmido (Wet Process - WP).....	6
2.1.3 Processo Mel (Honey Process - HP)	6
2.1.4 Impactos Ambientais dos Resíduos do Café.....	7
2.2 Cafeína: características moleculares e propriedades.....	7
2.3 Subprodutos gerados pelo beneficiamento do café.....	9
2.3.1 Casca do café	10
2.3.2 Polpa do café.....	11
2.4 Técnicas de extração de cafeína.....	13
2.4.1 Extração sólido-líquido.....	13
2.4.1.1 Extração sólido-líquido convencional.....	14
2.4.1.2 Extração sólido-líquido via Soxhlet.....	14
2.4.1.3 Extração Hidroalcoólica.....	16
2.4.1.4 Extração assistida por ultrassom.....	17

2.4.1.5 Extração através de Solventes Eutéticos (DES).....	18
2.4.2 Extração com CO₂ supercrítico	19
2.4.3 Extração ácido-base.....	20
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	21
3.1 Extração sólido-líquido convencional vs Extração assistida por ultrassom	21
3.1.1 Extração sólido-líquido com etapa de pré-tratamento (torrefação).....	23
3.2 Extração Soxhlet	25
3.3 Extração com CO ₂ supercrítico modificado com etanol.....	27
3.3.1 Extração a partir da polpa do café.....	27
3.3.2 Extração com CO₂ supercrítico a partir da casca do café	28
3.4 Extração com Solventes Eutéticos Profundos (DES)	30
3.5 Discussão Comparativa.....	33
3.5.1 Eficiência e Seletividade	33
3.5.2 Sustentabilidade e Inovação.....	34
3.5.3 Otimização da Matriz.....	34
4 CONCLUSÃO	34
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36

1 INTRODUÇÃO

O café consiste em uma das bebidas mais consumidas no mundo, sendo considerada a commodity de maior relevância comercial após o petróleo. Cerca de 80 países participam do mercado cafeeiro globalmente. No entanto, desde a produção até a colheita e o beneficiamento dos grãos, são geradas grandes quantidades de resíduos, o que representa um desafio ambiental e, ao mesmo tempo, uma significativa oportunidade econômica a ser explorada (Tsigkou et al., 2025).

Estima-se que aproximadamente 90% da massa total do grão de café é perdida durante as etapas de beneficiamento, que são cruciais para a comercialização do produto. Os resíduos gerados incluem a casca, a polpa, o pergaminho e a borra de café, esta última resultante da extração da bebida final. Historicamente, esses resíduos têm sido utilizados para compostagem, queima ou, frequentemente, descartados no ambiente, o que provoca problemas como a poluição de águas e solos devido à sua elevada carga orgânica (Arya et al., 2021; Tsigkou et al., 2025).

A cafeína, de fórmula molecular $C_8H_{10}N_4O_2$, é um dos principais compostos de alto valor agregado presentes nos resíduos do café. Este composto é amplamente empregado pelas indústrias farmacêuticas, alimentícias e cosméticas, conferindo-lhe um grande valor econômico de mercado. De acordo com a literatura, cerca de 0,4% a 1,4% dos resíduos do café, dependendo do tipo de subproduto, podem ser fontes potenciais para a extração e comercialização deste composto (Peluso, 2023; Torres-Valenzuela et. al., 2020).

Em consonância com os conceitos de economia circular, química verde e sustentabilidade, a obtenção de subprodutos a partir de resíduos agroindustriais é de extrema importância e valor (Navajas-Porras et al., 2025; La Scalia, 2021).

A implementação de processos eficientes para a obtenção da cafeína a partir dos resíduos do café pode não apenas contribuir para a redução do impacto ambiental, mas também gerar novas fontes de receita para produtores e processadores, fornecendo matéria-prima valiosa para o setor industrial (Tsigkou et al., 2025; Peluso, 2023).

1.1 Justificativa

O desenvolvimento deste trabalho é justificado pelos variados aspectos técnicos, econômicos, ambientais e sociais. Partindo do ponto de vista ambiental, o manuseio inadequado dos resíduos provenientes do café, representa um potencial problema para as regiões produtoras. O processamento úmido do café, contém alta concentração de poluentes orgânicos, como pectinas, proteínas, nitratos e fosfatos, que eventualmente, causam contaminação de corpos hídricos e dos solos. Deste modo, a extração de compostos bioativos, favorece a redução destes impactos ambientais.

Partindo do lado econômico, extrair cafeína dos resíduos do café, representa um modo de gerar valor a um produto que não possui utilidade no posto de vista comercial. O mercado da cafeína é consolidado e possui preços atrativos, uma vez que é utilizado em diversos produtos como bebidas energéticas, cosméticos e medicamentos. Uma alternativa sustentável para obtenção deste produto, a partir dos resíduos, pode mitigar a necessidade da utilização de grãos de café verde para descafeinação, uma vez que este produto já possui alto valor de mercado.

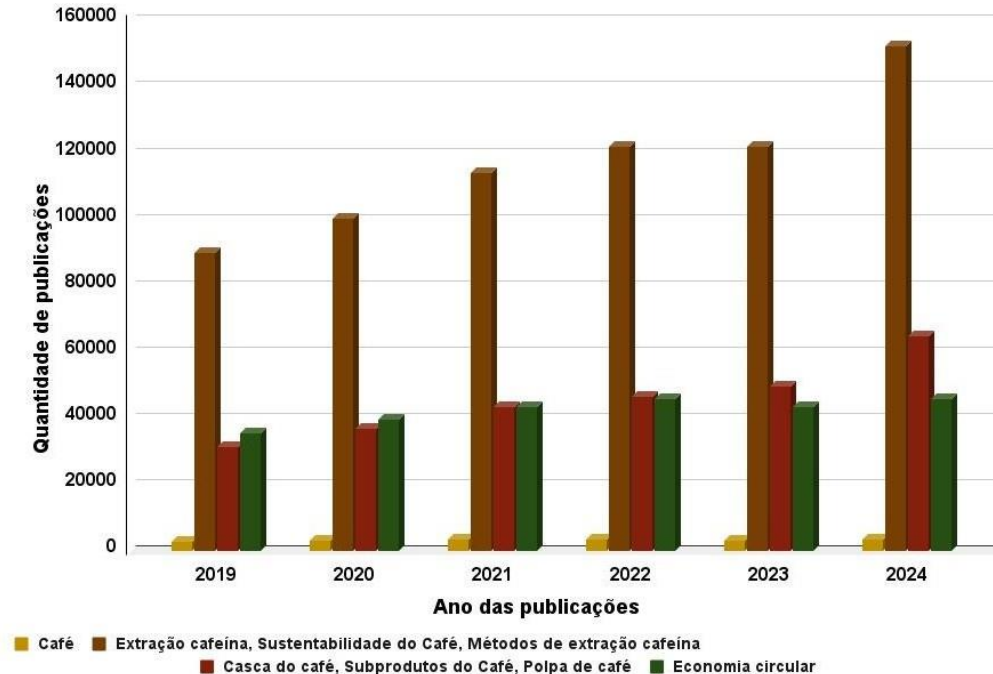
Do ponto de vista técnico-científico, a engenharia química desenvolve um papel de relevância no desenvolvimento e otimização de métodos de extração que sejam tanto eficientes, quanto sustentáveis e viáveis economicamente. Técnicas de extração, como a assistida por ultrassom, extração por solventes eutéticos, e extração supercrítica são vantajosas em relação ao rendimento, consumo de energia e ambientalmente sustentáveis quando confrontada com métodos convencionais. A implementação industrial depende primordialmente da compreensão dos fundamentos teóricos, parâmetros operacionais e mecanismo de transferência envolvidos no processo.

Além disso, este estudo contribui para o progresso do conhecimento na área de aproveitamento de resíduos agroindustriais, um tema de relevância crescente no contexto da bioeconomia e da transição para sistemas produtivos mais sustentáveis. A organização e avaliação crítica da literatura científica sobre a extração de cafeína a partir de subprodutos do café oferece base teórica e prática para pesquisas futuras e para a tomada de decisão de empresas e produtores interessados em adotar tecnologias de valorização desses resíduos.

A Figura 1 relata sobre o número de artigos que foram publicados por ano contendo as palavras chaves: Café, extração cafeína, sustentabilidade do café, métodos de extração cafeína,

casca do café, subprodutos do café, economia circular. Isto demonstra a relevância do assunto que está sendo tratado em questão, no âmbito científico, ambiental e econômico.

Figura 1 - Quantidade de publicações anuais dentro do assunto tratado neste trabalho.

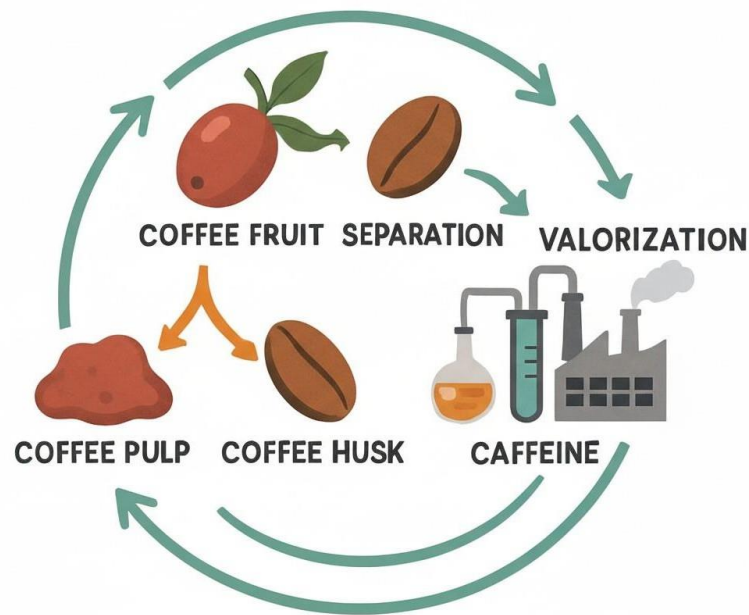


Fonte: Autores (2025).

Pode-se observar que a quantidade de publicações relacionadas ao assunto tratado neste trabalho tem aumentado com o passar dos anos, mostrando a relevância do assunto em questão.

A Figura 2 retrata a valorização dos resíduos, juntamente com os conceitos de economia circular, química verde e sustentabilidade. A economia circular é retratada pela reutilização de um resíduo pelo maior tempo possível, de modo a eliminar a poluição possivelmente causada. A química verde sugere mitigar o uso ou produção de substâncias perigosas e a sustentabilidade que tem como princípio a capacidade de suprir as necessidades atuais sem comprometer as necessidades das gerações futuras.

Figura 2 - Economia circular, química verde e sustentabilidade do café.



Fonte: Autores (2025).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Elaborar uma revisão bibliográfica detalhada sobre os métodos empregados na extração de cafeína provenientes dos subprodutos do beneficiamento do café, a polpa e a casca, examinando de forma crítica as tecnologias disponíveis, seus fundamentos científicos, condições operacionais, taxas de rendimento, eficiência energética e potencial de aplicação em escala industrial.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Examinar as propriedades físico-químicas da cafeína e sua influência nos processos de extração;
- Apresentar a composição química dos principais subprodutos gerados no beneficiamento do café, identificando aqueles com maior potencial para obtenção de cafeína;
- Revisar as técnicas tradicionais de extração de cafeína, como a extração Soxhlet e a extração sólido-líquido clássica;

- d) Investigar métodos modernos de extração, incluindo a extração hidroalcoólica, a extração assistida por ultrassom (USAE) e a utilização de solventes eutéticos profundos (DES);
- e) Realizar uma comparação entre os diferentes métodos considerando o rendimento, o consumo de energia, os impactos ambientais e a aplicabilidade em escala industrial;
- f) Explorar as tendências e perspectivas futuras relacionadas à valorização dos resíduos do café por meio da extração de cafeína e outros compostos bioativos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

2.1 Métodos de Beneficiamento do Café

O beneficiamento do café envolve o conjunto de operações realizadas após a colheita para transformar o fruto maduro em grão verde, pronto para a torrefação, sendo que os métodos de processamento exercem influência direta sobre a composição química, as propriedades sensoriais e a qualidade da bebida. Segundo estudos, o processamento do café pode ser dividido principalmente em três métodos: o processo seco, o processo úmido e o processo mel, além de métodos emergentes que buscam otimizar o sabor e o aroma dos grãos (Febrianto & Zhu, 2023).

2.1.1 Processo Seco (Dry Process - DP)

O processo seco, ou processo natural, é considerado o método mais antigo e simples de beneficiamento do café. Nele, os frutos maduros são selecionados e submetidos à secagem direta, seja ao sol ou de forma artificial. Estudos indicam que, nesse método, os frutos inteiros são distribuídos em terreiros ou secadores mecânicos até atingirem um teor de umidade próximo de 11-12%, sendo posteriormente descascados mecanicamente para remover a casca seca, o pergaminho e a película prateada, revelando o grão verde (Pereira et al., 2019).

O principal resíduo gerado nesse processo é a casca de café seca, composta pelo epicarpo, mesocarpo, endocarpo e película prateada, que apresenta alto poder calorífico, podendo ser utilizada como combustível ou na produção de briquetes. Além disso, a casca é rica em compostos fenólicos e fibras, mostrando potencial para aplicações em alimentos funcionais, chás e infusões.

2.1.2 Processo Úmido (Wet Process - WP)

O processo úmido de beneficiamento do café é mais complexo, exigindo maior investimento em infraestrutura e maior consumo de água. Nesse método, os frutos passam inicialmente por despulpamento mecânico para remoção da casca e parte da polpa. Em seguida, os grãos ainda revestidos pela mucilagem restante são submetidos à fermentação em tanques com água por um período de 12 a 48 horas, durante o qual microrganismos presentes, como bactérias lácticas e leveduras, degradam a mucilagem. Após a fermentação, os grãos são lavados e secos até atingir o teor de umidade adequado, sendo, finalmente, descascados mecanicamente para obtenção do grão verde (Febrianto & Zhu, 2023).

Os resíduos gerados nesse processo são mais variados e volumosos. A polpa e a mucilagem removidas representam cerca de 40% do peso do fruto fresco e possuem alta perecibilidade devido ao seu teor de açúcares e umidade, favorecendo o crescimento microbiano. Além disso, o processo produz grandes volumes de águas residuárias com elevada carga orgânica, que exigem tratamento adequado para evitar contaminação ambiental. O pergaminho removido na etapa final constitui outro subproduto relevante, composto principalmente por celulose e hemicelulose.

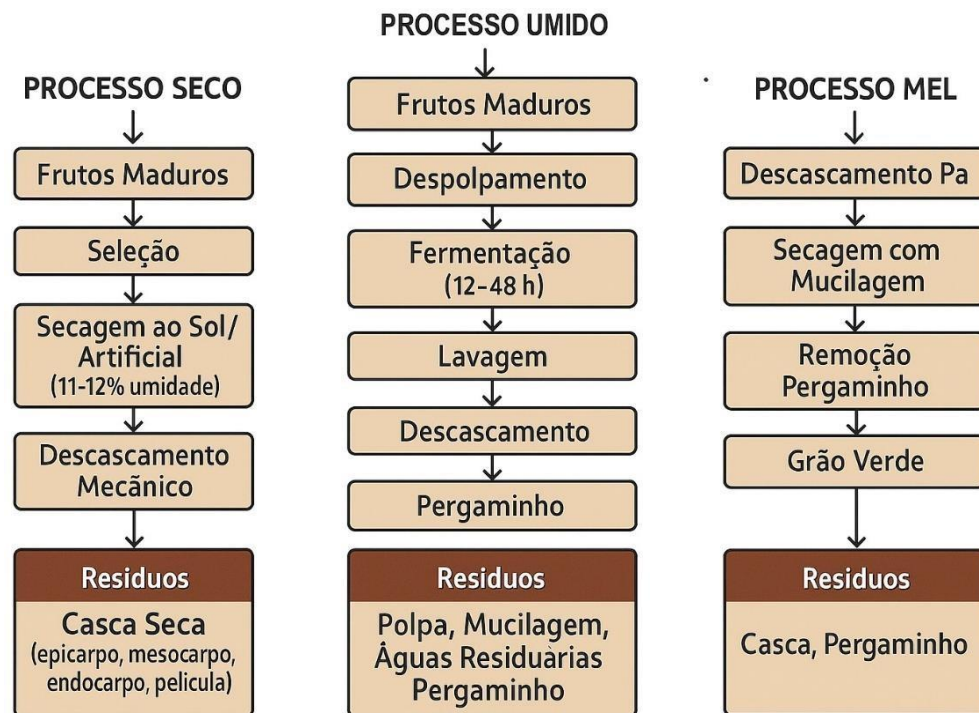
2.1.3 Processo Mel (Honey Process - HP)

O processo mel, também conhecido como semi-lavado ou cereja descascado, é um método intermediário entre os processos seco e úmido. Nesse método, a casca externa do fruto é removida mecanicamente, mas a mucilagem permanece total ou parcialmente aderida ao grão durante a secagem. Estudos indicam que a quantidade de mucilagem retida pode variar, originando diferentes categorias de “mel” (amarelo, vermelho ou negro), que influenciam diretamente o perfil sensorial final do café. A secagem ocorre com os grãos ainda revestidos pela mucilagem, a qual contribui para a doçura e o corpo da bebida (Febrianto & Zhu, 2023).

Quanto aos resíduos, o processo gera principalmente a casca removida no descascamento inicial e, eventualmente, o pergaminho após a secagem. A mucilagem não é descartada como resíduo, já que permanece aderida ao grão e desempenha papel importante no sabor e nas características sensoriais do café.

A Figura 3 relata sobre a comparação entre os diferentes tipos de processamento do fruto do café: Processo seco, processo mel e processo úmido.

Figura 3 - Diagrama comparativo entre processo seco, processo úmido e processo.



Fonte: Autores (2025).

2.1.4 Impactos Ambientais dos Resíduos do Café

Estudos indicam que os resíduos do café, por possuírem altos teores de taninos e cafeína, podem comprometer a qualidade do solo e apresentar risco de carcinogenicidade quando incorporados à ração animal. Esses resíduos são frequentemente descartados em aterros, misturados à ração ou incinerados, sendo que o manejo inadequado constitui um problema ambiental significativo (Arya et al., 2021).

A película prateada e a borra de café contribuem extensivamente para a poluição devido à alta concentração de compostos orgânicos, que requerem quantidades substanciais de oxigênio para sua degradação. A presença de compostos como cafeína, polifenóis e taninos também pode representar um risco de toxicidade aguda. Portanto, se a película prateada e a borra de café forem descartadas no ambiente sem tratamento, podem apresentar um perigo potencial de poluição (Arya et al., 2021).

2.2 Cafeína: características moleculares e propriedades

A Cafeína, quimicamente conhecida por 1,3,7-trimetilxantina, é um alcalóide pertencente ao grupo das xantinas, conhecido, principalmente, devido ao seu efeito estimulante

no sistema nervoso central. Possui fórmula molecular $C_8H_{10}N_4O_2$, estrutura planar, sendo todos os átomos do anel duplo com hibridização sp^2 (Faudone; Arifi; Merk, 2021).

As características físico-químicas da cafeína influenciam diretamente a forma como ela é absorvida, distribuída, metabolizada e eliminada pelo organismo. Por apresentar uma moderada afinidade por lipídios, a molécula consegue atravessar facilmente diferentes barreiras biológicas — inclusive a barreira hematoencefálica — o que explica a rapidez com que seus efeitos estimulantes são percebidos (Faudone; Arifi; Merk, 2021).

Estudos indicam que a cafeína se apresenta como um pó branco, cristalino, sem odor e com sabor amargo característico. Seu ponto de fusão situa-se entre 235 e 237 °C, e uma de suas propriedades mais importantes é a solubilidade em água. Embora seja moderadamente solúvel em temperatura ambiente, com cerca de 21,7 g/L, a solubilidade aumenta consideravelmente com o aumento da temperatura, chegando a aproximadamente 66 g/L em água fervente, característica que é essencial na preparação de bebidas como café e chá (Faudone; Arifi; Merk, 2021).

O coeficiente de partição (LogP) entre -0,07 e -0,01 demonstra um equilíbrio entre a afinidade por lipídios e por água, classificando a cafeína como uma molécula com perfil farmacológico favorável (“druglike”). Essa característica contribui para sua eficiente absorção oral e boa capacidade de atravessar membranas biológicas. Além disso, a molécula não possui grupos doadores de ligações de hidrogênio, mas contém três grupos aceptores, o que influencia suas interações com outras moléculas (Faudone; Arifi; Merk, 2021).

A Tabela 1 retrata algumas das propriedades físico-químicas da cafeína.

Tabela 1- Propriedades físico-químicas da cafeína

Propriedade	Valor
Peso Molecular	194,19 g/mol
Ponto de Fusão	235-237 °C
Solubilidade em Água (a 25°C)	21,7 g/L
Solubilidade em Água Fervente	66 g/L

LogP (Coeficiente de Partição)	-0,07 a -0,01
pKa	14
Doadores de Ligação de H (HBD)	0
Aceptores de Ligação de H (HBA)	3
Área de Superfície Polar (PSA)	58,44 Å ²

Fonte: Adaptado de Faudone, Arifi e Merk (2021).

2.3 Subprodutos gerados pelo beneficiamento do café

O processamento do café, desde a colheita até a obtenção do grão beneficiado, é uma atividade que gera uma quantidade considerável de resíduos agroindustriais. O fruto do café é composto por diversas frações, sendo os principais subprodutos gerados no beneficiamento a casca (epicarpo), a polpa (mesocarpo), a mucilagem (mesocarpo interno) e o pergaminho (endocarpo). Estima-se que, em base seca, o fruto do café seja composto por aproximadamente 54% de grão e 46% de subprodutos (Bressani et al., 1972).

A gestão desses resíduos representa um desafio ambiental, mas, simultaneamente, aponta para uma valiosa oportunidade de aproveitamento, dada a presença de diversos compostos bioativos (Neves et al., 2016).

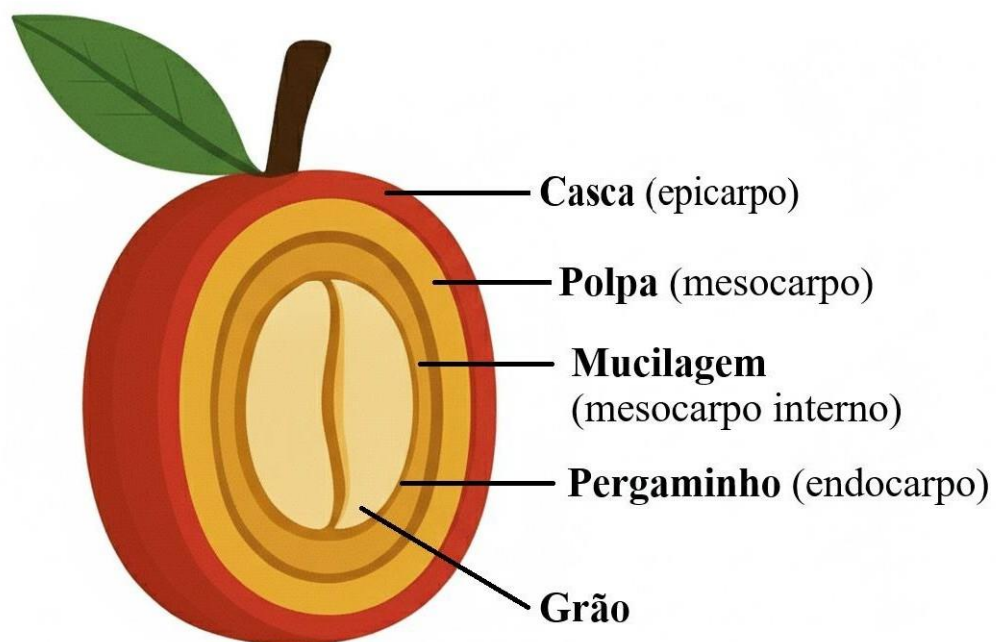
Neste trabalho, a análise será focada na casca e na polpa, por serem os subprodutos que se destacam pelo elevado volume de produção e pela significativa concentração de cafeína e outros compostos bioativos em comparação aos demais resíduos. A casca, por exemplo, pode constituir até 46% da matéria seca do fruto. A composição físico-química dos subprodutos do café é influenciada por fatores como o cultivo, o método de processamento (via seca ou úmida) e o tempo de armazenamento (Barcelos et al., 2001; Bressani et al., 1972).

Além da casca e da polpa, o pergaminho (endocarpo) e a mucilagem (mesocarpo interno) são outros subprodutos gerados no beneficiamento; contudo, de modo geral, são gerados em menor proporção e possuem um teor de cafeína inferior, uma vez que a cafeína, por ser um alcaloide, tende a se concentrar nas partes mais externas do fruto (casca e polpa) e no grão (Bressani et al., 1972; Neves et al., 2016).

A relevância da casca e da polpa reside, portanto, na combinação de alto volume de produção e elevado teor de cafeína, o que as distingue dos demais resíduos e as credencia como as principais matérias-primas residuais para estudos de extração e aproveitamento de compostos bioativos.

A Figura 4 representa a anatomia do fruto café mostrando todas as suas partes.

Figura 4 - Anatomia do fruto café.



Fonte: Autores (2025).

2.3.1 Casca do café

Durante a etapa de beneficiamento do café, alguns subprodutos são gerados, como a casca. Esse subproduto pode ser reutilizado para obtenção de compostos de alto valor agregado, como a cafeína e os polifenóis.

A casca do café é um subproduto de grande importância gerado durante o processamento dos grãos e possui alto potencial de aproveitamento com valor agregado. Sua composição química, embora possa variar de acordo com a espécie de café, as condições de cultivo e o

método de beneficiamento, apresenta características semelhantes às da polpa, sendo rica em compostos de interesse industrial (Fernandes, 2007; Soccol, 2002).

Em base seca, a casca contém cerca de 57,8% de carboidratos, 9,2% de proteínas, 2% de lipídeos, 4,5% de taninos, 12,4% de pectina e 1,2 a 1,3% de cafeína (Soccol, 2002).

A Tabela 2 apresenta a composição química da casca de café:

Tabela 2 - Composição química da casca de café em base seca

Componente	Concentração (%)
Carboidratos	57,8
Proteínas	9,2
Lipídios	2,0
Taninos	4,5
Pectina	12,4
Cafeína	1,2 – 1,3

Fonte: Adaptado de Soccol (2002).

Desta forma, esses componentes tornam a casca um recurso promissor para a indústria, especialmente pela possibilidade de extração de cafeína, um alcalóide de grande valor econômico, amplamente empregado nos setores farmacêutico, cosmético e alimentício (Brand et al., 2000; Filho et al., 2000).

Portanto, o reaproveitamento da casca de café representa uma alternativa sustentável, capaz de reduzir impactos ambientais e fortalecer a economia circular, ao transformar um resíduo agrícola em matéria-prima de alto potencial comercial.

2.3.2 Polpa do café

A produção de café é uma das atividades agrícolas mais importantes do mundo e, a cada safra, gera uma quantidade substancial de resíduos. Entre esses subprodutos, a polpa de café é

um material significativo que permanece após a remoção dos grãos, especialmente no processamento por via úmida. Este resíduo representa entre 40% e 50% do peso fresco do fruto, evidenciando um grande potencial de reaproveitamento (Menezes et al., 2011).

O descarte impróprio da polpa de café, seja no solo ou em corpos d'água, pode acarretar problemas ambientais graves, como a acidificação do solo e da água, devido ao seu elevado teor de matéria orgânica e compostos como taninos e cafeína (Chanakya & De Alwis, 2004).

A transformação desse resíduo em recursos úteis representa uma abordagem inteligente e sustentável para mitigar tais impactos. A valorização da polpa de café está em consonância com os princípios da bioeconomia e da economia circular, uma vez que oferece um novo propósito para um material abundante, reduzindo a pegada ambiental da cafeicultura e criando novas oportunidades de negócio para produtores e a indústria (Oliveira Silva & Neto, 2024).

A composição da polpa de café apresenta variações dependendo do tipo de café, do grau de maturação dos frutos e do método de processamento utilizado. Apesar dessas diferenças, estudos indicam que esse subproduto é nutritivo e rico em compostos bioativos, contendo em média entre 45% e 89% de carboidratos, 4% a 12% de proteínas, 6% a 10% de minerais (cinzas), 1% a 2% de lipídios e aproximadamente 1,3% de cafeína em base seca (Hu et al., 2023; Ameca et al., 2018).

A Tabela 3 apresenta a composição química da polpa de café.

Tabela 3 - Composição química aproximada da polpa de café (em %).

Componente	Intervalo de Concentração (%)
Carboidratos	45 - 89
Proteínas	4 - 12
Minerais (Cinzas)	6 - 10
Lipídios	1 - 2
Cafeína	~1,3

Fonte: Adaptado de Hu et al., 2023; Ameca et al., 2018.

Além dos nutrientes básicos, a polpa de café é uma excelente fonte de compostos fenólicos e alcalóides, especialmente ácido clorogênico, ácido ferúlico, ácido cafeico e cafeína, que despertam interesse por seus efeitos benéficos à saúde (Hu et al., 2023). Seu pH é naturalmente ácido, em torno de 4,25, o que também influencia suas propriedades. Essa composição confere à polpa ações antioxidantes, antimicrobianas e anti-inflamatórias, já confirmadas por diversos estudos laboratoriais (Hu et al., 2023). Por essa razão, tem crescido o interesse em seu uso como ingrediente funcional em alimentos e suplementos. Inclusive, a Autoridade Europeia para a Segurança Alimentar (EFSA) já aprovou o uso da polpa de café como “novo alimento” (novel food), permitindo sua aplicação direta na indústria alimentícia europeia (EFSA, 2021).

Embora a polpa de café apresente um teor de cafeína menor do que os grãos, sua concentração ainda é suficiente para justificar a extração, especialmente considerando o grande volume desse subproduto disponível. Estudos indicam que o conteúdo de cafeína na polpa gira em torno de 1,3% em base seca, podendo chegar a 1,86% na polpa fresca, o que evidencia a possibilidade de produzir cafeína a partir de uma fonte mais econômica e sustentável, aproveitando um resíduo que anteriormente era descartado (Ameca et al., 2018).

Nos últimos anos, várias técnicas de extração vêm sendo estudadas para tornar esse processo mais eficiente e menos agressivo ao meio ambiente. Entre elas estão a extração por solventes verdes, a extração assistida por ultrassom, o uso de micro-ondas e até de fluidos supercríticos, que conseguem recuperar compostos de forma limpa e com alto rendimento (Hu et al., 2023). Essas pesquisas reforçam a ideia de que a polpa e a casca de café, antes vista apenas como resíduo, pode se transformar em uma matéria-prima valiosa para a obtenção de cafeína e outros compostos de interesse industrial.

2.4 Técnicas de extração de cafeína

2.4.1 Extração sólido-líquido

A Extração Sólido-Líquido (ESL) é um dos métodos mais tradicionais e amplamente empregados para a recuperação de cafeína a partir de matrizes vegetais, incluindo os subprodutos do café, como a polpa e a casca (Serna-Jiménez et al., 2023). Este método se baseia na transferência de massa do composto solúvel (cafeína) da fase sólida para a fase líquida (solvente), por meio de um processo de lixiviação (Brasil, 2022).

A eficiência da ESL depende de fatores como o tipo de solvente, a temperatura, o tempo de contato e a razão entre a massa do sólido e o volume do solvente (Serna-Jiménez et al., 2023).

2.4.1.1 Extração sólido-líquido convencional

O procedimento de ESL inicia-se com a preparação do material sólido, que pode envolver a secagem e a moagem da casca ou polpa de café para aumentar a área de superfície de contato, facilitando a difusão da cafeína (Andrade, 2022).

Em seguida, o material é posto em contato com um solvente, que deve ser capaz de dissolver seletivamente a cafeína. Embora solventes orgânicos como o diclorometano tenham sido historicamente utilizados, a tendência atual é a utilização de solventes mais sustentáveis, como a água quente, que é considerada um extrator não tóxico para a cafeína e outros compostos bioativos, como os polifenóis (Serna-Jiménez et al., 2023).

A otimização da ESL é crucial para maximizar o rendimento de cafeína, sendo que a temperatura e a razão substrato/solvente são parâmetros de grande influência. Estudos demonstram que o aumento da temperatura eleva a solubilidade da cafeína e a cinética de extração, enquanto a razão substrato: solvente (por exemplo, 1:10 m/v) deve ser ajustada para garantir um gradiente de concentração favorável à transferência de massa (Serna-Jiménez et al., 2023).

Após o período de extração, a fase líquida (extrato) é separada do resíduo sólido por filtração ou centrifugação, e a cafeína é posteriormente isolada do solvente, muitas vezes por meio de uma etapa subsequente de extração líquido-líquido ou evaporação (Capuci, 2019).

2.4.1.2 Extração sólido-líquido via Soxhlet

A extração Soxhlet é uma técnica de extração sólido-líquido, utilizada para a separação de substâncias, a partir de matrizes sólidas. O equipamento Soxhlet é composto por três partes principais: um balão de fundo redondo (onde o solvente é aquecido), um extrator (que contém a amostra sólida e um sifão) e um condensador (que resfria o vapor do solvente). O processo de extração ocorre em ciclos contínuos (Hawach Filter Paper, 2025).

Inicialmente, a amostra sólida, previamente moída para aumentar a área de contato, é colocada em um cartucho de papel filtro (dedal de extração) dentro do extrator. O solvente é

aquecido no balão de fundo redondo, vaporiza e sobe por um tubo lateral até o condensador. No condensador, o vapor do solvente é resfriado e retorna ao extrator, desenvolvido por Franz na forma líquida, gotejando sobre a amostra sólida. O solvente acumula-se no extrator, imergindo a amostra e dissolvendo os compostos solúveis. Quando o nível do solvente atinge a parte superior do tubo sifão, o solvente contendo os extratos é automaticamente sifonado de volta para o balão de fundo redondo, deixando a amostra novamente imersa em solvente puro no próximo ciclo. Este ciclo de aquecimento, vaporização, condensação, extração e sifonamento é repetido continuamente (Hawach Filter Paper, 2025).

A principal vantagem da extração Soxhlet é a utilização de solvente puro em cada ciclo de extração, o que garante uma alta eficiência e uma extração exaustiva dos analitos da amostra sólida. Após um número suficiente de ciclos, o solvente no balão de fundo redondo estará enriquecido com os compostos extraídos. O solvente pode então ser evaporado, deixando os compostos de interesse concentrados (Hawach Filter Paper, 2025).

Para a extração de cafeína, solventes como etanol, metanol, acetona e acetato de etila são comumente empregados, dependendo da polaridade e solubilidade desejada. A escolha do solvente é crucial para otimizar o rendimento da extração e a seletividade para a cafeína (Andrade, 2011).

Embora a extração Soxhlet seja uma técnica robusta para matrizes sólidas, a literatura específica sobre a extração de cafeína da polpa de café utilizando exclusivamente o método Soxhlet é menos detalhada em comparação com a casca. No entanto, a polpa é reconhecida por conter cafeína, e a extração sólido-líquido, da qual o Soxhlet é uma variação, é um método aplicável para a recuperação desses compostos. A complexidade da matriz da polpa, com alto teor de umidade e açúcares, pode influenciar a eficiência da extração e a escolha do solvente ideal (Andrade, 2011).

É importante notar que a concentração de cafeína nos grãos de café é geralmente maior do que nos subprodutos), mas uma quantidade significativa ainda permanece nesses resíduos, tornando sua recuperação economicamente viável (Torres-Valenzuela et. al., 2020).

A extração Soxhlet demonstra ser uma técnica eficaz e bem estabelecida para a recuperação de cafeína a partir de subprodutos do café, como a casca e a borra. A valorização desses resíduos agroindustriais não apenas contribui para a redução do impacto ambiental da cadeia produtiva do café, mas também oferece uma fonte sustentável de cafeína e outros

compostos bioativos com potencial para diversas aplicações industriais. A escolha do solvente e a otimização das condições de extração são fatores cruciais para maximizar o rendimento e a seletividade da cafeína (Loukri et al., 2022).

2.4.1.3 Extração Hidroalcoólica

Dentre os diversos métodos de extração, a extração hidroalcoólica, que emprega uma mistura de água e etanol como solvente, apresenta-se como uma técnica vantajosa por sua eficiência, baixo custo, e por utilizar um solvente de baixa toxicidade e biodegradável, em contraste com solventes orgânicos clorados tradicionalmente empregados, como o diclorometano, que apresentam riscos à saúde humana e ao meio ambiente (Mazzafera; carvalho, 1991).

O processo de extração hidroalcoólica baseia-se na solubilidade da cafeína em misturas de água e etanol. A proporção entre os solventes, a temperatura, o tempo de extração e a granulometria do material são parâmetros cruciais que influenciam diretamente a eficiência do processo. Estudos indicam que a utilização de soluções hidroalcoólicas pode otimizar a extração, uma vez que o etanol atua como um cossolvente, aumentando a solubilidade da cafeína e de outros compostos, enquanto a água auxilia na extração de outras substâncias e na penetração do solvente na matriz vegetal (Romero, 2017).

Historicamente, a extração de cafeína de produtos naturais tem empregado majoritariamente solventes orgânicos imiscíveis em água, como o diclorometano e o clorofórmio. Embora esses solventes apresentem alta seletividade para a cafeína, sua toxicidade e os riscos ambientais associados ao seu uso e descarte têm impulsionado a busca por alternativas mais seguras e sustentáveis (Fernandes, 2007). A extração com água, por sua vez, é uma opção mais ecológica, mas pode resultar na coextração de substâncias que afetam o aroma e sabor do produto final, além de ceras insolúveis que demandam etapas adicionais de purificação (Saldaña et al., 2000).

Nesse contexto, a extração hidroalcoólica, que utiliza misturas de água e etanol, emerge como uma solução promissora. O etanol é um solvente de origem biológica, menos tóxico e mais biodegradável que os solventes clorados, e sua combinação com água permite modular a polaridade do solvente, otimizando a extração de cafeína e outros compostos bioativos. A proporção de etanol na mistura hidroalcoólica é um fator crítico, pois influencia diretamente a solubilidade da cafeína e a seletividade do processo.

A purificação do extrato bruto é uma etapa subsequente essencial para obter cafeína com alto grau de pureza, utilizando técnicas como adsorção com carvão ativado ou extração líquido-líquido (Fernandes, 2007).

2.4.1.4 Extração assistida por ultrassom

A extração assistida por ultrassom (EAU) é uma técnica moderna que utiliza ondas sonoras de alta frequência, geralmente entre 20 kHz e 100 MHz, para intensificar a liberação de compostos bioativos a partir de matrizes vegetais. O princípio que sustenta essa tecnologia é o fenômeno conhecido como cavitação acústica, que envolve a formação, expansão e colapso violento de microbolhas no solvente.

Durante esse processo, são geradas condições extremas localizadas, com temperaturas que podem ultrapassar 5000 K e pressões que atingem até 1000 atm, além de forças de cisalhamento intensas, microjatos e ondas de choque. Esses efeitos físicos provocam a ruptura das paredes celulares e aumentam a permeabilidade das membranas vegetais, o que favorece significativamente a transferência de massa dos compostos presentes no sólido para o solvente (Hielscher, [s.d.]a).

Diversos estudos apontam que a EAU apresenta eficiência superior aos métodos convencionais de extração. Em comparação com a extração sólido-líquido tradicional, essa técnica pode triplicar o rendimento e ainda reduzir o consumo energético em mais de três vezes (Serna-Jiménez et al., 2023). Além disso, por operar em temperaturas moderadas e controladas, a EAU é especialmente vantajosa para a extração de compostos sensíveis ao calor, evitando a degradação térmica dos extratos e mantendo a integridade química da cafeína (Hielscher, [s.d.]a).

Entre os principais benefícios da EAU destacam-se a rapidez do processo, o baixo uso de solventes, o controle preciso da energia ultrassônica, a uniformidade na extração e a possibilidade de aplicação em diferentes escalas, desde o ambiente laboratorial até sistemas industriais (Hielscher, [s.d.]a). Essas características colocam a técnica como uma ferramenta de intensificação de processos altamente promissora para a indústria de alimentos e fármacos.

No contexto dos subprodutos do café, a aplicação da EAU tem mostrado resultados expressivos. A polpa de café, por exemplo, abundante no processamento úmido, tem sido amplamente estudada para a extração de cafeína e compostos fenólicos.

2.4.1.5 Extração através de solventes eutéticos (DES)

A extração de cafeína a partir de subprodutos do café, como a polpa e a casca, tem sido revolucionada pelo uso de Solventes Eutéticos Profundos (DES), uma alternativa "verde" aos solventes orgânicos tradicionais (Loukri et al., 2022).

Estes solventes são misturas de dois ou mais componentes, como um aceitador de ligação de hidrogênio (HBA) e um doador de ligação de hidrogênio (HBD), que resultam em um ponto de fusão significativamente mais baixo do que o de seus componentes individuais (Maimulyanti et al., 2023).

O princípio fundamental da eficácia dos DES reside na sua capacidade de estabelecer fortes interações de múltiplas ligações de hidrogênio com os compostos alvo, como a cafeína, o que aumenta drasticamente a solubilidade do alcaloide no solvente eutético. Em estudos específicos, solventes como a combinação de cloreto de colina (HBA) e glicerol (HBD) demonstraram ser eficazes na extração de cafeína da polpa de café, superando o rendimento obtido com solventes convencionais, como água e soluções de ciclodextrina (Loukri et al., 2022).

Além disso, a alta polaridade e as propriedades físico-químicas dos DES podem facilitar a ruptura da parede celular vegetal, permitindo que os compostos internos sejam liberados mais facilmente para a solução (Maimulyanti et al., 2023).

O processo de extração com DES geralmente envolve a mistura do subproduto do café (casca ou polpa) com o solvente eutético aquoso, seguido de agitação e aquecimento em condições otimizadas. Para a extração da cafeína, as condições de otimização tipicamente envolvem a concentração do DES em solução aquosa, a temperatura e a razão líquido-sólido, sendo que temperaturas moderadas (em torno de 55 °C) e concentrações específicas do DES (por exemplo, 70% m/v) são frequentemente empregadas para maximizar o rendimento (Capuci et al., 2022; Loukri et al., 2022).

A cafeína é então isolada do DES por meio de técnicas de separação posteriores, como a extração líquido-líquido ou a adsorção, permitindo a recuperação do solvente eutético para reutilização, o que reforça o caráter de química verde do método (Román-Montalvo et al., 2024).

2.4.2 Extração com CO₂ supercrítico

A extração com dióxido de carbono em estado supercrítico (CO₂sc), é uma técnica para a obtenção de substâncias bioativas que são extraídas através de fontes naturais, a mesma oferece alta eficiência, uma seletividade muito grande, sendo sustentável com baixo impacto ao meio ambiente.

Pesquisas recentes têm buscado o aprimoramento de tal processo, na indústria cosmética e farmacêutica, e de alimentos. O objetivo é de que os custos sejam reduzidos, aumentando a eficiência do processo, propagando suas aplicações (Uwineza et al., 2020; Herzyk et al., 2024).

A extração com CO₂ supercrítico é aplicada em diversos setores industriais. Na indústria alimentícia, tal metodologia obtém diversos óleos essenciais, com aromas e antioxidantes característicos, sendo extraídos de plantas como alecrim, lavanda e chá verde. Já no setor cosmético e farmacêutico, para formulações de cremes, loções e suplementos alimentares; o processo isola compostos bioativos. No setor de biocombustíveis, o CO₂ supercrítico é utilizado para a fabricação do biodiesel, extraído lipídios de sementes e microalgas. E também, na indústria cafeeira, este mecanismo é amplamente empregado para a retirada da cafeína dos grãos e subprodutos do café, preservando o seu aroma e sabor característicos. (Nozari, 2025; Słota et al., 2025; Yildirim et al., 2024).

Segundo o pressuposto de Uwineza et al. (2020), o CO₂ permite a dissolução de maneira eficiente de algumas substâncias, sendo elas: lipofílicas, como óleos essenciais, carotenóides e flavonóides. Tal recurso, utiliza o dióxido de carbono a condições supercríticas, com os líquidos e gases possuindo as características de suas propriedades semelhantes. Isso possibilita que seja feito todo o processo de maneira mais seletiva se comparado com os métodos tradicionais.

O CO₂ quando é sujeitado a temperaturas acima de 31 °C, e pressões superiores a 74 bar, atinge o estado supercrítico. Isso traz a ele características de alta densidade e baixa viscosidade, contribuindo a interação nas matrizes sólidas, e facilitando a extração de compostos bioativos (Yildirim et al., 2024).

Alguns parâmetros como o tempo em que ocorre a extração está diretamente ligado ao rendimento, em intervalos longos a dissolução dos compostos é grande, porém substâncias sensíveis podem ser degradadas com a exposição térmica (Nozari, 2025). A taxa de fluxo do

CO₂ também influencia, com valores muito altos reduzem o tempo de contato necessário, enquanto valores muito baixos comprometem a eficácia do processo (Khaw et al., 2017).

O uso de cossolventes é comum e apresenta outro planejamento para melhorar a extração com CO₂ supercrítico, que é usado em especial para compostos com menos solubilidade no CO₂ puro. Cossolventes polares aumentam a polaridade do fluido, permitindo a retirada de compostos fenólicos e outros bioativos polares, como por exemplo etanol, metanol ou água.

Finalmente, dessa forma, a extração com CO₂ supercrítico representa uma abordagem sustentável, versátil e altamente eficiente, sendo uma metodologia de inovação para a obtenção de compostos bioativos com alto valor agregado.

2.4.3 Extração ácido-base

O método de extração ácido-base é uma técnica de purificação empregada para isolar a cafeína, um alcaloide, a partir de matrizes complexas, como a polpa ou a casca do café, que são subprodutos do processamento do grão (Fernandes, 2007). Este procedimento se baseia nas propriedades químicas da cafeína, que é classificada como uma base fraca, e na sua capacidade de interagir com ácidos e bases para alternar entre as formas iônica e molecular (Saldaña; Mazzafera; Lanças, 1997).

A etapa inicial do processo envolve a extração da cafeína da matriz sólida do café, geralmente por meio de uma extração sólido-líquido com solvente aquoso, o que solubiliza a cafeína juntamente com outros compostos presentes, como ácidos clorogênicos e taninos (Carneiro, 2021). Em seguida, o extrato aquoso é submetido a uma série de ajustes de pH, que é o princípio fundamental da extração ácido-base (Fernandes, 2007).

O procedimento consiste na adição de uma base (alcalinização), como o carbonato de sódio ou hidróxido de amônio, ao extrato aquoso. O aumento do pH da solução promove a desprotonação do sal de cafeína, convertendo-o na sua forma de base livre, que é eletricamente neutra. Essa forma neutra da cafeína apresenta uma alta solubilidade em solventes orgânicos apolares ou de baixa polaridade, como o diclorometano ou o clorofórmio, sendo então transferida para a fase orgânica durante uma extração líquido-líquido (Fernandes, 2007; Capuci, 2019; Saldaña; Mazzafera; Lanças, 1997).

Após a separação das fases, a fase orgânica contendo a cafeína é isolada, enquanto os contaminantes polares, como os sais de ácidos orgânicos e os taninos, permanecem majoritariamente na fase aquosa (Carneiro, 2021). A cafeína pura é então recuperada a partir da fase orgânica por meio da evaporação do solvente, resultando no isolamento do alcaloide em sua forma cristalina (Capuci, 2019; Tebaldi, 2018).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Extração sólido-líquido convencional vs Extração assistida por ultrassom

O estudo de Serna-Jiménez et al. (2023) confirmou o potencial da polpa de café como fonte de cafeína e polifenóis, destacando sua relevância para o aproveitamento sustentável de subprodutos do beneficiamento do café. A caracterização química da polpa utilizada revelou uma concentração média de $18,4 \pm 3,2$ g/kg de cafeína e $14,9 \pm 2,6$ g/kg de polifenóis totais, em base seca. Além disso, a polpa apresentou $83,6 \pm 0,6\%$ de umidade, pH de $3,3 \pm 0,0$ e condutividade de $1089,0 \pm 1,0$ $\mu\text{S}/\text{cm}$, evidenciando sua composição rica em compostos bioativos.

Para a extração de cafeína e polifenóis, os autores compararam dois métodos sustentáveis utilizando água como solvente: a Extração Sólido-Líquido Convencional (CSLE) e a Extração Assistida por Ultrassom (USAE). No método CSLE, a polpa de café foi imersa em água destilada e submetida à extração em banho-maria termostático, avaliando-se os efeitos da temperatura e do tempo. A razão substrato:solvente de 1:10 (p/v) foi considerada a mais eficiente, e a quantificação da cafeína foi realizada por cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) com detector UV a 254nm (Serna-Jiménez et al., 2023).

A USAE foi estudada como uma alternativa para melhorar o rendimento e reduzir o consumo energético. Nesse método, a polpa foi submetida a um banho ultrassônico de 37 kHz, variando-se temperatura, tempo e potência nominal, com a quantificação da cafeína também feita por HPLC (Serna-Jiménez et al., 2023).

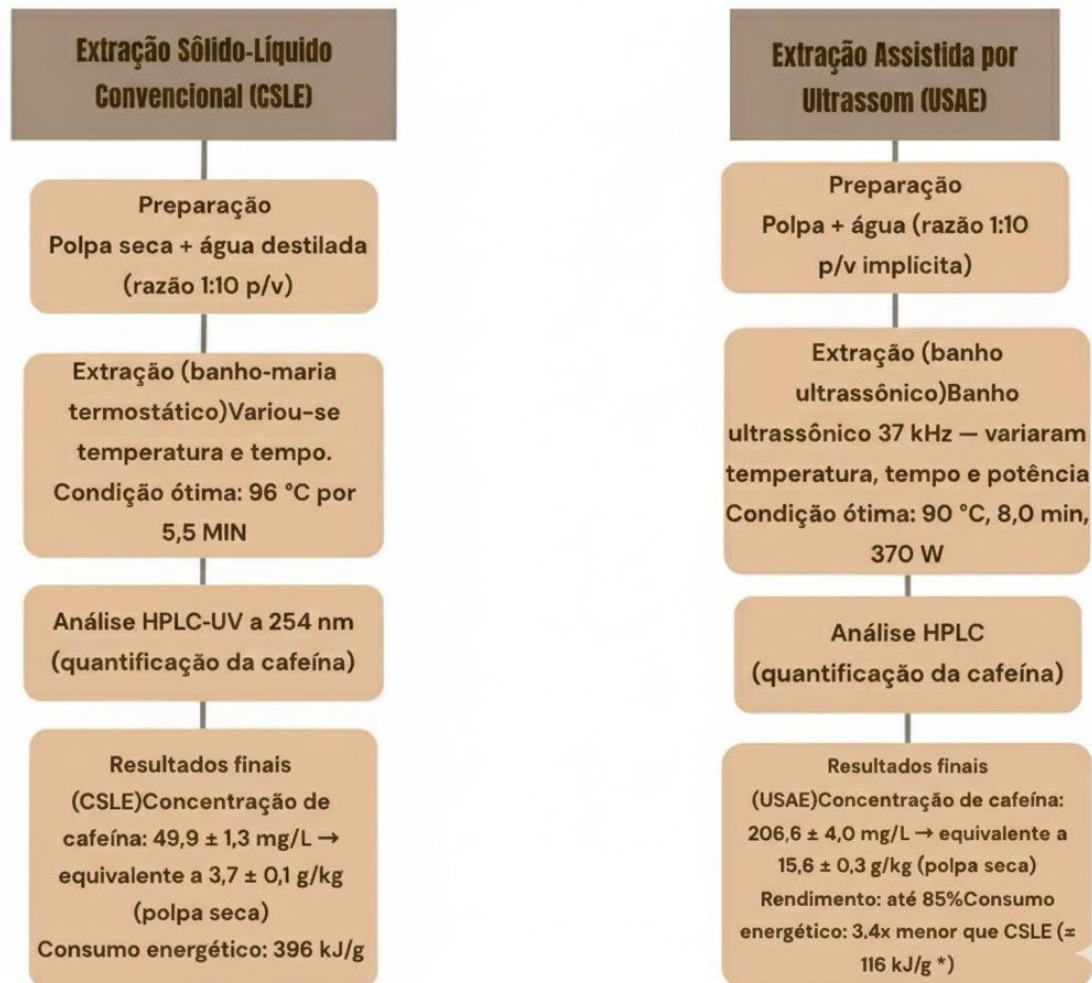
Os resultados mostraram diferenças expressivas entre as duas abordagens. Na CSLE, as condições ótimas foram obtidas a 96 °C por 5,5 minutos, resultando em $49,9 \pm 1,3$ mg/L de cafeína, o que corresponde a $3,7 \pm 0,1$ g/kg de polpa seca, com consumo energético de 396 kJ/g. Já a USAE apresentou melhor desempenho, atingido nas condições ideais de 8,0 minutos, a 90

°C e 370 W de potência, uma concentração de $206,6 \pm 4,0$ mg/L de cafeína, equivalente a $15,6 \pm 0,3$ g/kg de polpa seca. Além disso, a técnica obteve rendimentos de até 85% e consumo de energia 3,4 vezes menor em comparação à CSLE (Serna-Jiménez et al., 2023).

Esses resultados demonstram que a extração assistida por ultrassom (USAE) é significativamente mais eficiente na recuperação de cafeína e polifenóis da polpa do café, devido à sua capacidade de aumentar a transferência de massa e promover a ruptura celular, o que intensifica o processo extrativo. A utilização de água como solvente em ambos os métodos reforça o caráter sustentável e ecológico da abordagem, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias verdes voltadas à valorização da polpa de café.

A Figura 5 representa um diagrama do comparativo entre as duas extrações.

Figura 5 - Diagrama de blocos da extração sólido-líquido convencional vs extração assistida por ultrassom



Fonte: Autores (2025).

3.1.1 Extração sólido-líquido com etapa de pré-tratamento (torrefação)

O estudo realizado por Capuci et al. (2024) investigou a extração e purificação de cafeína a partir das cascas de café da variedade *Coffea arabica*, tipo Catuaí Vermelho, provenientes de Araguari, Minas Gerais, Brasil. A caracterização inicial mostrou uma umidade de 20,12% para a casca in natura e 6,11% após secagem a 105 °C por 24 horas. O teor de cafeína na casca fresca foi determinado em 0,4103%.

O processo de extração foi conduzido em duas etapas principais. Primeiramente, as cascas passaram por torrefação e moagem, sendo a torra otimizada por meio de um Delineamento Composto Central (CCD) com 16 experimentos. As condições ideais identificadas para maximizar a extração de cafeína foram 147,6 °C de temperatura e 5,3 minutos de tempo de torra. O processo utilizou um torrador Carmonaq® modelo MOD-TP1, com

cilindro a 36 rpm e amostras de 100 g de casca, seguido de moagem em moinho Hamilton Beach® modelo 80374-BZ.

Na etapa de extração sólido-líquido, empregou-se água obtida por osmose reversa como solvente, utilizando um extrator de café Polti® modelo Espresso 3000 operando a $1,5 \times 10^6$ Pa (15 bar). Em cada ensaio, 5 g de casca torrada e moída foram submetidos a uma única extração com 50 mL de solução, e a concentração de cafeína foi determinada por espectrofotometria UV-Vis a 273 nm.

A purificação da cafeína extraída foi realizada por cristalização, em que o grau de supersaturação adotado foi de 1,118, com agitação de 222 rpm e tempo total de 180 minutos (3 h). O processo ocorreu em um cristalizador de vidro encamisado, com resfriamento controlado de 42,9 °C até 20 °C, sendo a sementeira feita com $9,76 \times 10^{-3}$ kg de sementes de cafeína por kg de solução. Os cristais formados foram analisados por microscopia óptica (Nikon Eclipse E100 com ImageJ®), colorimetria de refletância (Eoptis® CLM-194) e espectroscopia de infravermelho (Brucker Alpha) (Capuci et al., 2024).

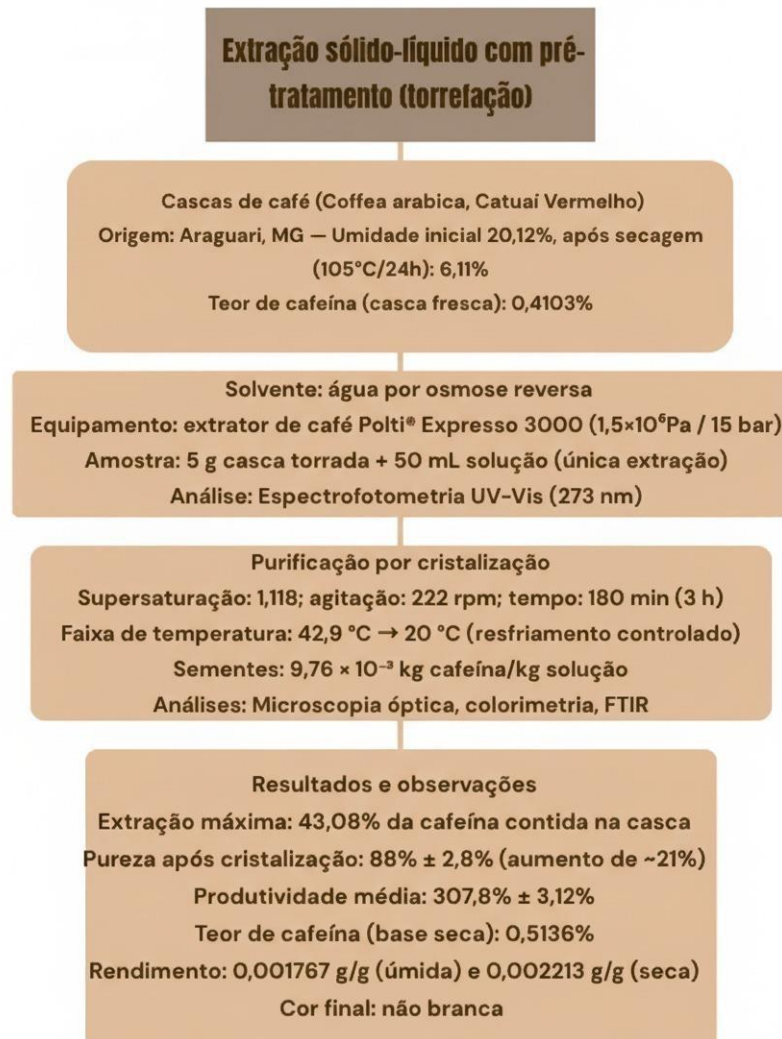
Os resultados indicaram que a otimização da torrefação foi determinante para a eficiência do processo, permitindo uma extração máxima de 43,08% da cafeína contida na casca em uma única etapa. A cristalização também se mostrou eficaz na purificação, elevando a pureza do composto de $73\% \pm 3,1\%$ para $88\% \pm 2,8\%$, um aumento aproximado de 21%, com produtividade média de $307,8\% \pm 3,12\%$ (Capuci et al., 2024).

Com base nos valores obtidos, o teor de cafeína na base seca foi calculado em 0,5136%, considerando a umidade inicial de 20,12%. Assim, o rendimento de cafeína por grama de casca úmida foi de 0,001767 g/g, enquanto o rendimento na base seca alcançou 0,002213 g/g. Os autores observaram que a cafeína cristalizada não apresentou a coloração branca padrão do produto comercial, indicando a necessidade de recristalizações adicionais para melhoria da pureza e aparência (Capuci et al., 2024).

Do ponto de vista econômico, os pesquisadores destacaram que as cascas de café representam uma matéria-prima abundante e de baixo custo, com alto teor de cafeína e solvente acessível (água), fatores que reduzem os custos de produção. Contudo, enfatizam a importância de uma análise econômica detalhada para determinar se os benefícios da comercialização da cafeína e do reaproveitamento dos resíduos pós-extração seriam suficientes para compensar os custos de implantação industrial (Capuci et al., 2024).

A Figura 6 representa um diagrama com o passo a passo da extração sólido-líquido com etapa de pré-tratamento (torrefação)

Figura 6 - Diagrama de blocos da extração sólido-líquido com etapa de pré-tratamento (torrefação).



Fonte: Autores (2025).

3.2 Extração Soxhlet

O estudo de Preedalikit et al. (2023) investigou a extração de compostos bioativos da polpa de cereja de café (*Coffea arabica* L.), com ênfase na recuperação de cafeína, comparando diferentes métodos de extração, incluindo o método Soxhlet. As cerejas de café foram colhidas e despulpadas mecanicamente, sendo a polpa seca em estufa de ar quente a 50 ± 2 °C até o peso constante para reduzir o teor de umidade. Em seguida, o material foi pulverizado, a fim de aumentar a área de superfície e favorecer o processo de extração (Preedalikit et al., 2023).

Para a extração, utilizou-se etanol 95% como solvente e uma proporção sólido-líquido de 1:5 g/mL, mantida constante em todos os ensaios para garantir a comparabilidade dos resultados. No sistema Soxhlet, 10 g de polpa pulverizada foram colocados em um cartucho e inseridos no extrator, sendo 50 mL de etanol 95% adicionados ao balão de fundo redondo. A temperatura da chapa de aquecimento foi ajustada para 210 °C, de modo a manter o etanol em ebulição (75–80 °C), e o processo foi conduzido por 60 minutos. Após a extração, o resíduo insolúvel foi removido por filtração, e o filtrado concentrado em evaporador a vácuo a 45 °C, obtendo-se o extrato seco da polpa de café (Preedalikit et al., 2023).

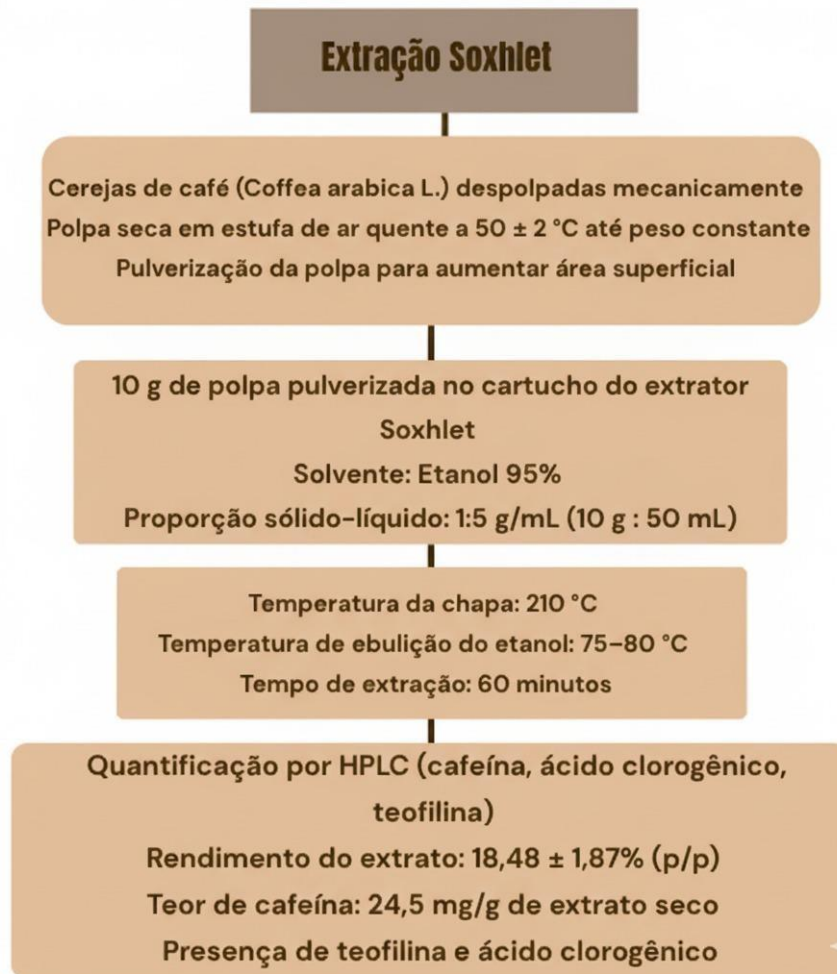
Os resultados mostraram que a extração Soxhlet (CCS) proporcionou um rendimento de $18,48 \pm 1,87\%$ (p/p), calculado com base na massa de extrato seco em relação à massa inicial da polpa. A quantificação dos compostos, incluindo cafeína, ácido clorogênico e teofilina, foi realizada por cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC). O método Soxhlet demonstrou-se superior à maceração e à extração assistida por ultrassom, apresentando os maiores teores de cafeína e de ácido clorogênico (Preedalikit et al., 2023).

O extrato obtido apresentou 24,5 mg de cafeína por grama de extrato seco, além da presença de teofilina em menor concentração, o que reforça a eficiência do processo na recuperação de compostos estimulantes. Assim, a extração Soxhlet com etanol 95% mostrou-se uma técnica robusta e eficiente para a obtenção de extratos ricos em cafeína e outros compostos bioativos da polpa de café.

De acordo com Preedalikit et al. (2023), além de fornecer um rendimento expressivo de extrato seco, o método apresentou melhor desempenho que outras técnicas tradicionais, confirmando seu potencial para a valorização da polpa de café como fonte de compostos de interesse para as indústrias alimentícia, farmacêutica e cosmética.

A Figura 7 representa um diagrama com o passo a passo da extração Soxhlet.

Figura 7 - Diagrama de blocos da extração Soxhlet.



Fonte: Autores (2025).

3.3 Extração com CO₂ supercrítico modificado com etanol

3.3.1 Extração a partir da polpa do café.

O estudo de Hu et al. (2025) aplicou um planejamento experimental (DoE) para modelar a extração de compostos bioativos da polpa de café (*Coffea arabica*) utilizando CO₂ supercrítico (sc-CO₂) com etanol como cossolvente. A polpa utilizada, proveniente de Las Morenitas (Nicarágua), foi separada mecanicamente das cerejas, seca ao sol e moída com nitrogênio líquido em moinho de laboratório, sendo posteriormente peneirada até obter partículas entre 250 e 500 µm e armazenada a 4 °C (Hu et al., 2025). As extrações foram conduzidas em um sistema de fluido supercrítico modelo SF2000 (Thar Technologies, EUA), equipado com um vaso de extração de 2 L e dois separadores de 0,5 L com controle independente de pressão para o fracionamento (Hu et al., 2025).

Durante o processo, 50 g de polpa de café foram submetidos à extração sob temperatura de 65 °C, pressão de 23 MPa e 9% de etanol (p/p em relação ao CO₂), com fluxo de CO₂ de 83 g/min por 120 minutos (Hu et al., 2025). Após a extração, foi promovida uma queda de pressão no primeiro separador a 4 MPa, resultando na separação do CO₂ gasoso e do etanol líquido contendo os compostos extraídos. O etanol foi então evaporado em evaporador rotatório sob vácuo a 40 °C até peso constante, sendo o rendimento calculado com base na massa de extrato seco obtida (Hu et al., 2025).

O rendimento de extração foi de 5,8 mg/g de polpa de café (CP), valor 3,8 vezes menor do que o obtido pela extração aquosa e 6,7 vezes menor do que pela extração etanólica convencional, indicando uma menor eficiência do CO₂ supercrítico em termos de massa total extraída. Entretanto, o método supercrítico demonstrou alta seletividade, alcançando 106,3 mg de cafeína por grama de extrato, valor superior ao obtido por extrações convencionais, o que evidencia a capacidade do processo de gerar extratos altamente enriquecidos em cafeína (Hu et al., 2025).

Esses resultados indicam que, embora o rendimento total de extrato seja menor, o processo de extração com fluido supercrítico (EFS) utilizando etanol como cossolvente permite a obtenção de extratos de polpa de café com alta concentração de cafeína e compostos fenólicos de forte atividade antioxidante, tornando-os promissores para aplicações nas indústrias alimentícia, cosmética e farmacêutica. Assim, a extração com CO₂ supercrítico modificado com etanol representa uma abordagem inovadora e sustentável para a valorização da polpa do café, sendo as condições otimizadas de 65 °C, 23 MPa e 9% de etanol cruciais para maximizar a eficiência e a seletividade do processo (Hu et al., 2025).

3.3.2 Extração com CO₂ supercrítico a partir da casca do café.

O estudo de Tello, Viguera e Calvo (2011) avaliou a viabilidade técnica da extração de cafeína a partir de cascas de café *Coffea canephora* var. Robusta utilizando dióxido de carbono em condições supercríticas, um método reconhecido por sua alta eficiência e sustentável. As cascas de café utilizadas foram obtidas em Manaus, Brasil, e apresentaram composição inicial de 1,0% de gordura, 16,4% de umidade e 1,1% de cafeína (Tello et al., 2011). A matéria-prima foi armazenada em condições secas e à temperatura ambiente até o momento da extração.

Durante a etapa de preparação, os autores verificaram que a umidificação prévia das cascas era essencial para otimizar o rendimento do processo, enquanto a moagem não era

necessária. No caso das cascas moídas, foram utilizados redistribuidores e esferas plásticas para evitar aglomeração no leito do extrator, mas os melhores resultados foram obtidos com as cascas inteiras (Tello et al., 2011).

A extração foi conduzida em uma unidade de laboratório de fluxo contínuo de CO₂ supercrítico, composta por um extrator de 50 mL de aço inoxidável 316, um sistema de controle de pressão e um dispositivo de coleta de amostras. O CO₂ líquido foi resfriado a 258 K (-15 °C) para evitar a cavitação, pressurizado por uma bomba de membrana e aquecido antes de entrar no extrator. As cascas de café foram então carregadas no sistema, formando um leito fixo, e o CO₂ foi bombeado até atingir as condições de operação desejadas (Tello et al., 2011).

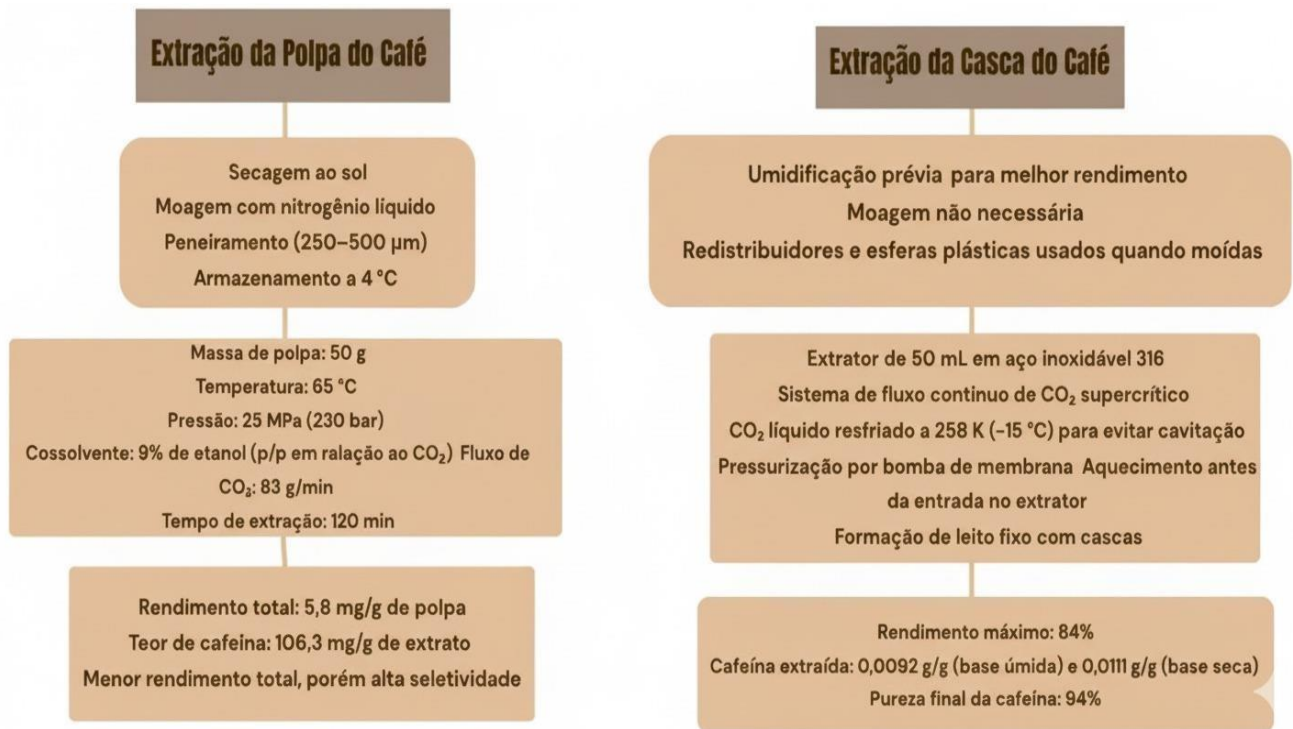
Após a extração, o extrato foi coletado por despressurização e a recuperação da cafeína foi realizada por lavagem com 40 mL de água ultrapura e CO₂ a 60 bar e 323 K (50 °C), repetida duas vezes para garantir a máxima eficiência. A solução obtida foi evaporada a 323 K para isolar o precipitado de cafeína (Tello et al., 2011).

A quantificação da cafeína foi feita por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência. Os resultados demonstraram que o aumento da temperatura e da pressão promoveu maior eficiência na extração (Tello et al., 2011).

A uma pressão constante de 300 bar, o rendimento aumentou de aproximadamente 10% a 313 K (40 °C) para cerca de 35% a 373 K (100 °C). Sob as condições de 373 K e 300 bar, com uma razão solvente/matéria-prima de 197 kg de CO₂ por kg de casca de café, foi obtido um rendimento máximo de extração de 84%, correspondendo a 0,0092 g de cafeína por grama de casca (base úmida) e 0,0111 g/g (base seca). Após o processo de lavagem, a pureza da cafeína alcançada foi de 94% (Tello et al., 2011).

A Figura 8 representa um diagrama com o passo a passo da extração com CO₂ supercrítico, fazendo o comparativo da mesma, entre a polpa e a casca do café:

Figura 8 - Diagrama de blocos da extração com CO₂ supercrítico, entre a polpa e a casca do café.



Fonte: Autores (2025).

3.4 Extração com Solventes Eutéticos Profundos (DES)

O estudo de Loukri et al. (2022) desenvolveu um método de extração verde para a recuperação de cafeína da polpa de café (*Coffea arabica*, cultivar Catuai) utilizando um solvente eutético profundo (DES). A polpa empregada apresentou 10,36% de umidade e foi caracterizada por conter 75,95% de carboidratos, 7,71% de proteínas, 0,75% de lipídios e 5,23% de cinzas, com tamanho médio de partícula de 0,24 mm. O DES foi sintetizado a partir de cloreto de colina (aceitador de ligação de hidrogênio – HBA) e glicerol (doador de ligação de hidrogênio – HBD) em razão molar 1:3, sendo os componentes misturados a 600 rpm e 70 °C por uma hora, até a formação de uma mistura homogênea e transparente.

Durante o processo de extração, a polpa de café foi misturada com uma solução aquosa de DES e submetida à agitação constante de 600 rpm em banho-maria com temperatura controlada. As variáveis de extração — temperatura (T), razão líquido-sólido (L/S) e concentração de DES (CDES) — foram estudadas e otimizadas por meio da metodologia de superfície de resposta. As condições otimizadas para maximizar o teor de cafeína (CCaf) e a atividade antirradical (AAR) foram definidas como 55 °C, razão solvente/polpa de 47 mL/g e concentração de DES de 70% p/v em solução aquosa (Loukri et al., 2022).

Após o processo, as amostras foram centrifugadas a 9000 rpm por 5 minutos, e o sobrenadante límpido foi coletado sob vácuo e armazenado a 5 °C para análises subsequentes. O maior rendimento de cafeína, de 5,451 mg/g de polpa seca, foi obtido sob as condições de 70% p/v de DES, razão líquido-sólido de 20 mL/g e temperatura de 70 °C (Ponto de Design 5), evidenciando a eficácia do sistema cloreto de colina–glicerol na extração de cafeína da polpa de café (Loukri et al., 2022).

Os resultados mostraram que a solução aquosa de DES é um solvente altamente eficaz para fitoquímicos presentes na polpa de café, apresentando maior rendimento de cafeína em comparação a outros solventes verdes. O modelo cinético de Peleg foi aplicado para descrever a extração, proporcionando melhor compreensão dos mecanismos envolvidos (Loukri et al., 2022).

De forma geral, a extração de cafeína com solventes eutéticos profundos (DES), especialmente a combinação cloreto de colina–glicerol, representa uma alternativa sustentável e eficiente aos métodos convencionais. Sob condições otimizadas de temperatura, razão solvente/polpa e concentração de DES, o processo alcançou rendimentos significativos de cafeína, destacando-se pelo uso de um solvente biodegradável, de baixa toxicidade e economicamente viável, o que reforça seu potencial para a valorização de subprodutos agroindustriais (Loukri et al., 2022).

A Tabela 4, retrata de forma comparativa os métodos de extração de cafeína da polpa e da casca do café.

Tabela 4 - Comparativo dos Métodos de Extração de Cafeína de Polpa e Casca de Café

Método de extração	Subproduto utilizado	Solvente	Condições ótimas de extração.	Rendimento de cafeína	Referência
Solido-liquido convencional	Polpa do café	Água	5.5(min) 96(°C)	3.7 ± 0.1 g/kg de polpa (base seca)	(Serna-Jiménez et al., 2023)

Assistida por Ultrassom (USAE)	Polpa do café	Água	8.0 min 90 °C 370W (Potência nominal)	15.6 ± 0.3 g/kg de polpa (base seca)	(Serna-Jiménez et al., 2023)
Solido-liquido com pré-tratamento (torrefação)	Casca do café	Água	15 bar	2.213 mg/g (base seca)	(Capuci et al., 2024).
Extração Soxhlet	Polpa do café	Etanol 95%	60 min 75-80 °C	24.5 ± 0,46 mg/g (base seca)	(Preedalikit et al., 2023).
CO ₂ Supercrítico Modificado com Etanol	Polpa do café	CO ₂ supercrítico e Etanol (cossolvente)	120 min 65 °C 9% de etanol (p/p em relação ao CO ₂) 23 MPa	5.8 mg/g (base seca)	(Hu et al. 2025).
CO ₂ Supercrítico	Casca do café	CO ₂ supercrítico	100°C 197 kg de CO ₂ por kg de casca de café	11,1 mg/g (base seca)	(Tello et al., 2011)

Extração	Polpa do	Cloreto de	55 °C	5,451 mg/g	(Loukri et al.,
com	café	colina e		de polpa	2022).
Solventes		glicerol	Razão	seca	
Eutéticos			solvente/polpa		
Profundos			de 47 mL/g		
			Concentração		
			de DES de		
			70% p/v em		
			solução		
			aquosa		

Fonte: Autores (2025).

3.5 Discussão Comparativa

A análise dos estudos demonstra uma clara tendência na pesquisa de extração de cafeína em resíduos de café: a migração de métodos convencionais para tecnologias de extração verde e de intensificação, buscando maior eficiência e sustentabilidade.

3.5.1 Eficiência e Seletividade

A Extração Assistida por Ultrassom se destaca pela sua capacidade de intensificar o processo extrativo em curtos períodos e com menor consumo de energia. O rendimento de 15,6 g/kg de polpa é um dos mais altos para métodos de extração sólido-líquido assistida (Serna-Jiménez et al., 2023).

Em termos de seletividade e pureza, a Extração com Fluidos Supercríticos é inigualável. Embora o rendimento total de extrato seja menor, a concentração de cafeína no extrato (106,3 mg/g de extrato) e a pureza final justificam o uso da Extração com fluidos supercríticos para aplicações que exigem alta qualidade, como nas indústrias farmacêutica e cosmética. A necessidade de umidificação prévia da casca ou a adição de um cossolvente polar são estratégias metodológicas cruciais para o sucesso desta técnica. (Hu et al., 2025; Tello et al., 2011)

3.5.2 Sustentabilidade e Inovação

A introdução de Solventes eutéticos profundos representa a fronteira da inovação. Estes solventes verdes oferecem uma alternativa aos solventes orgânicos tradicionais, sendo biodegradáveis e de baixa toxicidade. A otimização do solvente eutético profundo (ChCl:Glicerol) a 55 °C demonstra a versatilidade destas novas abordagens (Loukri et al., 2022).

3.5.3 Otimização da Matriz

O pré-tratamento da matéria-prima, como a torrefação, é uma variável metodológica importante. A torra controlada da casca de café demonstrou ser eficaz para aumentar a extração subsequente com água (Capuci et al., 2024).

4 CONCLUSÃO

O presente trabalho permitiu alcançar o objetivo geral de elaborar uma revisão bibliográfica detalhada sobre os métodos de extração de cafeína a partir de subprodutos do beneficiamento do café, especificamente a polpa e a casca. A análise crítica das técnicas disponíveis evidenciou um cenário em constante evolução, onde métodos convencionais convivem com tecnologias emergentes mais eficientes e sustentáveis.

Conclui-se que os subprodutos do café, polpa e casca, são fontes viáveis e promissoras para a extração de cafeína, um composto de alto valor agregado para as indústrias farmacêutica, alimentícia e cosmética. A composição química desses resíduos, com teores de cafeína que variam entre aproximadamente 1,2% e 1,3% na casca e 1,3% na polpa (em base seca), justifica técnica e economicamente o seu aproveitamento.

A comparação entre os diferentes métodos de extração revelou que as técnicas modernas apresentam vantagens significativas em relação às tradicionais. A Extração Assistida por Ultrassom (USAE) mostrou-se notavelmente superior à extração sólido-líquido convencional, tanto em rendimento (concentração de cafeína de 206,6 mg/L contra 49,9 mg/L) quanto em eficiência energética (consumo 3,4 vezes menor). A Extração com CO₂ supercrítico, embora possa apresentar rendimento total de extrato menor, destaca-se pela alta seletividade para a cafeína, produzindo um extrato altamente enriquecido. Já a extração com solventes eutéticos

profundos (DES) configura-se como uma alternativa verde e eficaz, com rendimentos competitivos e alinhada aos princípios da química verde.

Técnicas como a Soxhlet e a extração ácido-base permanecem como métodos robustos e amplamente utilizados, porém, geralmente envolvem o uso de solventes menos sustentáveis e maiores demandas de tempo e energia.

Portanto, a implementação de processos de extração eficientes e sustentáveis para a obtenção de cafeína a partir de resíduos do café não apenas contribui para a redução do passivo ambiental associado à cafeicultura, como também agrega valor a um subproduto abundante e subutilizado. Esta prática insere-se perfeitamente nos conceitos de bioeconomia e economia circular, criando novas oportunidades de negócio e fortalecendo a sustentabilidade da cadeia produtiva do café. Para trabalhos futuros, recomenda-se a investigação da viabilidade técnico-econômica e o escalonamento industrial dos métodos mais promissores, bem como a exploração integrada de outros compostos bioativos presentes nesses resíduos.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMECA, G. M. et al. Composição química e capacidade antioxidante da polpa do café = Chemical composition and antioxidant capacity of coffee pulp. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 42, n. 3, p. 307-313, 2018. DOI: 10.1590/1413-70542018423000818. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cagro/a/XMkWdCykYGnzsJrXRHKLxYk/?lang=pt>. Acesso em: 27 out. 2025.
- ANDRADE, K. S. **Avaliação das técnicas de extração e do potencial antioxidante dos extratos obtidos a partir de casca e de borra de café (Coffea arabica L.)**. 2011. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/30376296.pdf>. Acesso em: 14 out. 2025.
- ANDRADE, S. F. **Potencial bioativo de extratos obtidos a partir do resíduo industrial do café torrado utilizando a técnica de ultrassom assistida**. 2022. 54 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2022. Disponível em: <https://ri.ufs.br/handle/riufs/16215>. Acesso em: 20 out. 2025.
- ARYA, S. S. et al. The wastes of coffee bean processing for utilization in food: a review. **Journal of Food Science and Technology**, v. 59, n. 2, p. 429-444, mar. 2021. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8814275/>. Acesso em: 20 out. 2025.
- BARCELOS, A. F.; PAVAN, M. A.; et al. Características químicas da polpa e da casca de café e seus efeitos na produção do cafeeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 25, n. 2, p. 369-374, 2001.
- BRAND, D.; ROUSSOS, S.; et al. Biological detoxification of coffee husk. *Biotechnology Letters*, v. 22, n. 4, p. 289-292, 2000.
- BRASIL, N. M. **Extração e análise da cafeína presente em diferentes amostras e resíduos de café, chá e erva-mate**. 2022. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Farmácia) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2022. Disponível em: <https://repositorio.unipampa.edu.br/handle/rii/7026>. Acesso em: 20 out. 2025.
- BRESSANI, R.; ESTRADA, E.; JARQUÍN, R. Pulpa y pergamino de café. I. Composición química y contenido de aminoácidos de la proteína de la pulpa. *Turrialba, Turrialba*, v. 22, n. 3, p. 299-304, jul./set. 1972.
- CAPUCI, A. P. S. **Cristalização da cafeína extraída da casca do café**. 2019. 184 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/28785/1/Cristaliza%C3%A7%C3%A3oCafe%C3%ADnaExtra%C3%ADda.pdf>. Acesso em: 20 out. 2025.

CAPUCI, A. P. S. et al. Extraction and Crystallization of Caffeine from Coffee Husks (Coffea Arabica Var. Catuaí). **Waste and Biomass Valorization**, v. 15, p. 4947–4963, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02409-9>. Acesso em: 22 out. 2025.

CARNEIRO, L. S. **Extração da cafeína a partir do chá preto e sua aplicação em creme cosmético**. 2021. 30 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Farmácia) – Centro Universitário Campo Real, Guarapuava, 2021. Disponível em: <https://www.unifaccamp.edu.br/repository/artigo/arquivo/08122021090914.pdf>. Acesso em: 20 out. 2025.

CHANAKYA, H. N.; DE ALWIS, A. A. P. Environmental Issues and Management in Primary Coffee Processing. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 82, n. 4, p. 291-300, jul. 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582004711763>. Acesso em: 20 out. 2025.

DOS SANTOS, M. D.; GUEDES, J. S.; et al. Coffee by-products as a source of bioactive compounds for food and non-food applications: A review. *Food Research International*, v. 175, p. 113731, 2024.

EUROPEAN FOOD SAFETY AUTHORITY (EFSA). **Technical Report on the notification of cherry pulp from Coffea spp. as a traditional food from a third country pursuant to Article 14 of Regulation (EU) 2015/2283**. 2021. Disponível em: <https://www.efsa.europa.eu/en/supporting/pub/en-6657>. Acesso em: 20 out. 2025.

FAUDONE, G.; ARIFI, S.; MERK, D. The medicinal chemistry of caffeine. **Journal of Medicinal Chemistry**, Washington, v. 64, n. 11, p. 7156-7178, 2021. DOI: 10.1021/acs.jmedchem.1c00261. Acesso em: 8 out. 2025.

FEBRIANTO, N. A.; ZHU, F. Coffee bean processing: Emerging methods and their effects on chemical, biological and sensory properties. **Food Chemistry**, v. 412, art. 135489, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135489>.

FERNANDES, G. **Extração e purificação de cafeína da casca de café**. 2007. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/15255/1/GFernandesDISSPRT.pdf>. Acesso em: 07 out. 2025.

FILHO, L. C.; ROUSSOS, S.; et al. Produção de cafeinase por fermentação no estado sólido a partir de casca de café. *Brazilian Journal of Microbiology*, v. 31, n. 2, p. 150-154, 2000.

HAWACH FILTER PAPER. **Soxhlet Extractor and Soxhlet Extraction Method**. 2025. Disponível em: <https://www.hawachfilterpaper.com/soxhlet-extractor-and-soxhlet-extraction-method/>. Acesso em: 14 out. 2025.

HERZYK, E.; GAWLIK-DZIKI, U.; et al. Ultrasound-Assisted Extraction as a “Green” Tool for the Recovery of Bioactive Compounds from Food By-Products: A Comprehensive Review. *Molecules*, v. 29, n. 1, p. 255, 2024.

HIELSCHER. **Descafeinação sem solventes com ultrassom de potência**. [S.l., s.d.]b. Disponível em: <https://www.hielscher.com/pt/solvent-free-decaffeination-with-power-ultrasound.htm>. Acesso em: 14 out. 2025.

HIELSCHER. **Extração ultra-sônica de cafeína**. [S.l., s.d.]a. Disponível em: <https://www.hielscher.com/pt/ultrasonic-extraction-of-caffeine-and-other-active-compounds.htm>. Acesso em: 14 out. 2025.

HU, S. et al. Valorization of coffee pulp as bioactive food ingredient by sustainable extraction methodologies. *Current Research in Food Science*, v. 6, p. 100475, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100475>. Acesso em: 27 out. 2025.

HU, S.; MARTÍN-CABREJAS, M. Á.; MARTÍN-TRUEBA, M.; CAÑAS, S.; REBOLLO-HERNÁNZ, M.; AGUILERA, Y.; BENÍTEZ, V.; GIL-RAMÍREZ, A. **Tailored recovery of antioxidant fractions enriched in caffeine and phenolic compounds from coffee pulp using ethanol-modified supercritical carbon dioxide**. *Food Chemistry*, 2025. DOI: 10.1016/j.foodchem.2025.xxx (ou conforme edição). Acesso em: 04 nov. 2025.

KHAW, K. Y. et al. Solvent supercritical fluid technologies to extract bioactive compounds from natural sources: a review. *Molecules*, v. 22, n. 7, art. 1186, 14 jul. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules22071186>. Acesso em: 27 out. 2025.

LA SCALIA, G. Coffee biowaste valorization within circular economy. *Frontiers in Environmental Science*, v. 9, p. 741981, 2021. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8449833/>. Acesso em: 20 out. 2025.

LOUKRI, A. et al. Green extraction of caffeine from coffee pulp using a deep eutectic solvent (DES). *Applied Food Research*, v. 2, n. 2, p. 100176, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100176>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772502222001366>. Acesso em: 15 out. 2025.

MAIMULYANTI, A. et al. Development of natural deep eutectic solvent (NADES) based on choline chloride as a green solvent to extract phenolic compound from coffee husk waste. *Arabian Journal of Chemistry*, v. 16, n. 4, p. 104634, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878535223000953>. Acesso em: 20 out. 2025.

MAZZAFERA, P.; CARVALHO, A. A descafeinação do café. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 43, n. 5, p. 343-347, 1991.

MENEZES, E. G. T. et al. Caracterização e pré-tratamento da polpa de café. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 7., 2011, Araxá. **Anais...** Araxá: Embrapa Café, 2011. Disponível em: http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/spcb_anais/simposio7/330.pdf. Acesso em: 20 out. 2025.

NAVAJAS-PORRAS, B. et al. The Valorization of Coffee By-Products and Waste Through the Use of Green Extraction Techniques: A Bibliometric Analysis. **Applied Sciences**, v. 15, n. 3, p. 1505, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/3/1505>. Acesso em: 20 out. 2025.

NEVES, D. A.; ZUIN, V. G.; et al. Aproveitamento de resíduos da indústria de alimentos para obtenção de compostos bioativos. **Química Nova**, v. 39, n. 6, p. 616-628, 2016.

NOZARI, B. Supercritical CO₂ Technology for Biomass Extraction: A Review. **ScienceDirect**, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669025008945>. Acesso em: 13 out. 2025.

OLIVEIRA SILVA, M. F. de; NETO, F. L. M. Bioeconomia circular e recursos renováveis de base biológica: alternativas para a cafeicultura brasileira. **Cadernos de Ciências Sociais Aplicadas**, v. 21, n. 38, 2024. Disponível em: <https://periodicos2.uesb.br/ccsa/article/view/15493>. Acesso em: 20 out. 2025.

PELUSO, M. Coffee By-Products: Economic Opportunities for Sustainability and Innovation in the Coffee Industry. **Proceedings**, v. 89, n. 1, p. 6, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2504-3900/89/1/6>. Acesso em: 20 out. 2025.

PEREIRA, G. V. M. et al. Exploring the impacts of postharvest processing on the aroma formation of coffee bean—A review. **Food Chemistry**, v. 272, p. 441-452, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.061>.

PREEDALIKIT, W. et al. Comparison of Biological Activities and Protective Effects on PAH-Induced Oxidative Damage of Different Coffee Cherry Pulp Extracts. **Foods**, Basel, v. 12, n. 23, p. 4292, 2023. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10705964/>. Acesso em: 20 out. 2025.

ROMÁN-MONTALVO, D. et al. Extraction of caffeine from coffee husk employing choline-based ionic liquids: Optimization of the process and theoretical study on solute-salts interactions. **Journal of Molecular Liquids**, v. 396, p. 123985, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167732224003428>. Acesso em: 20 out. 2025.

ROMERO, N. G. **Extração de compostos fenólicos a partir de café e sua caracterização química e funcional**. 2017. 129 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Segurança Alimentar) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2017. Acesso em: 15 out. 2025.

SALDAÑA, M. D. A.; MAZZAFERA, P.; LANÇAS, F. M. **Supercritical fluid extraction of methylxanthines from guarana, maté and cocoa**. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 8, n. 4, p. 407-414, 1997.

SALDAÑA, M. D. A.; MOHAMED, R. S.; MAZZAFERA, P. **Extraction of caffeine, theobromine, and catechins from guarana using supercritical CO₂ and ethanol**. In: **SHAHIDI, F. (Ed.). Tree Nuts: Composition, Phytochemicals, and Health Effects**. Boca Raton: CRC Press, 2000. p. 97-112.

SERNA-JIMÉNEZ, J. A. et al. Advanced extraction of caffeine and polyphenols from coffee pulp: Comparison of conventional and ultrasound-assisted methods. *LWT*, v. 177, p. 114571, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643823001500>. Acesso em: 20 out. 2025.

SŁOTA, P. et al. Supercritical Fluid Extraction—A Sustainable and Selective Technique for Bioactive Compounds. *Applied Sciences*, v. 15, n. 11, p. 5914, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/11/5914>. Acesso em: 13 out. 2025.

SOCCOL, C. R. Resíduo de café: um substrato promissor para a produção industrial de bioprodutos com alto valor agregado. In: **SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL**, 1., [S.l., 2002]. 16 p. PDF. Disponível em: <https://scispace.com/pdf/residuo-de-cafe-um-substrato-promissor-para-a-producao-1e3sag42n5.pdf>. Acesso em: 07 out. 2025.

TEBALDI, T. S. **Otimização do processo de extração da cafeína da casca de café da espécie Coffea arabica**. [S.l.]: Universidade de Uberaba, [2018]. Disponível em: <https://dspace.uniube.br/bitstream/123456789/929/1/OTIMIZA%C3%87%C3%83O%20DO%20PROCESSO%20DE%20EXTRA%C3%87%C3%83O%20DA%20CAFE%C3%8DNA%20DA%20CASCA%20DE%20CAF%C3%89%20DA%20ESP%C3%89CIE%20Coffea%20arabica.PDF>. Acesso em: 20 out. 2025.

TELLO, J.; VIGUERA, M.; CALVO, L. Extraction of caffeine from Robusta coffee (*Coffea canephora* var. Robusta) husks using supercritical carbon dioxide. *The Journal of Supercritical Fluids*, v. 59, p. 53-60, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2011.07.018>. Acesso em: 22 out. 2025.

THOMPSON, L. H.; DORAISWAMY, L. K. Sonochemistry: Science and Engineering. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 38, n. 4, p. 1215-1249, 1999.

TORRES-VALENZUELA, L. S.; BALLESTEROS-GÓMEZ, A.; RUBIO, S. Supramolecular solvent extraction of bioactives from coffee cherry pulp. *Journal of Food Engineering*, v. 278, p. 109933, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.109933>. Acesso em: 04 nov. 2025.

TRAN, T. H.; NGUYEN, S. V.; et al. A comprehensive review on the valorization of coffee by-products: A focus on extraction of bioactive compounds. *Food Research International*, v. 161, p. 111833, 2022.

TSIGKOU, K. et al. Coffee processing waste: Unlocking opportunities for sustainable development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 210, p. 115263, mar. 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032124009894>. Acesso em: 20 out. 2025.

UWINEZA, P. A. et al. Recent Advances in Supercritical Fluid Extraction: A Review. **Molecules**, v. 25, n. 24, p. 5867, 2020. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7504334/>. Acesso em: 13 out. 2025.

YILDIRIM, M. et al. Green Extraction of Plant Materials Using Supercritical CO₂: Insights into Methods, Analysis, and Bioactivity. **Plants**, v. 13, n. 16, p. 2295, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/13/16/2295>. Acesso em: 13 out. 2025.