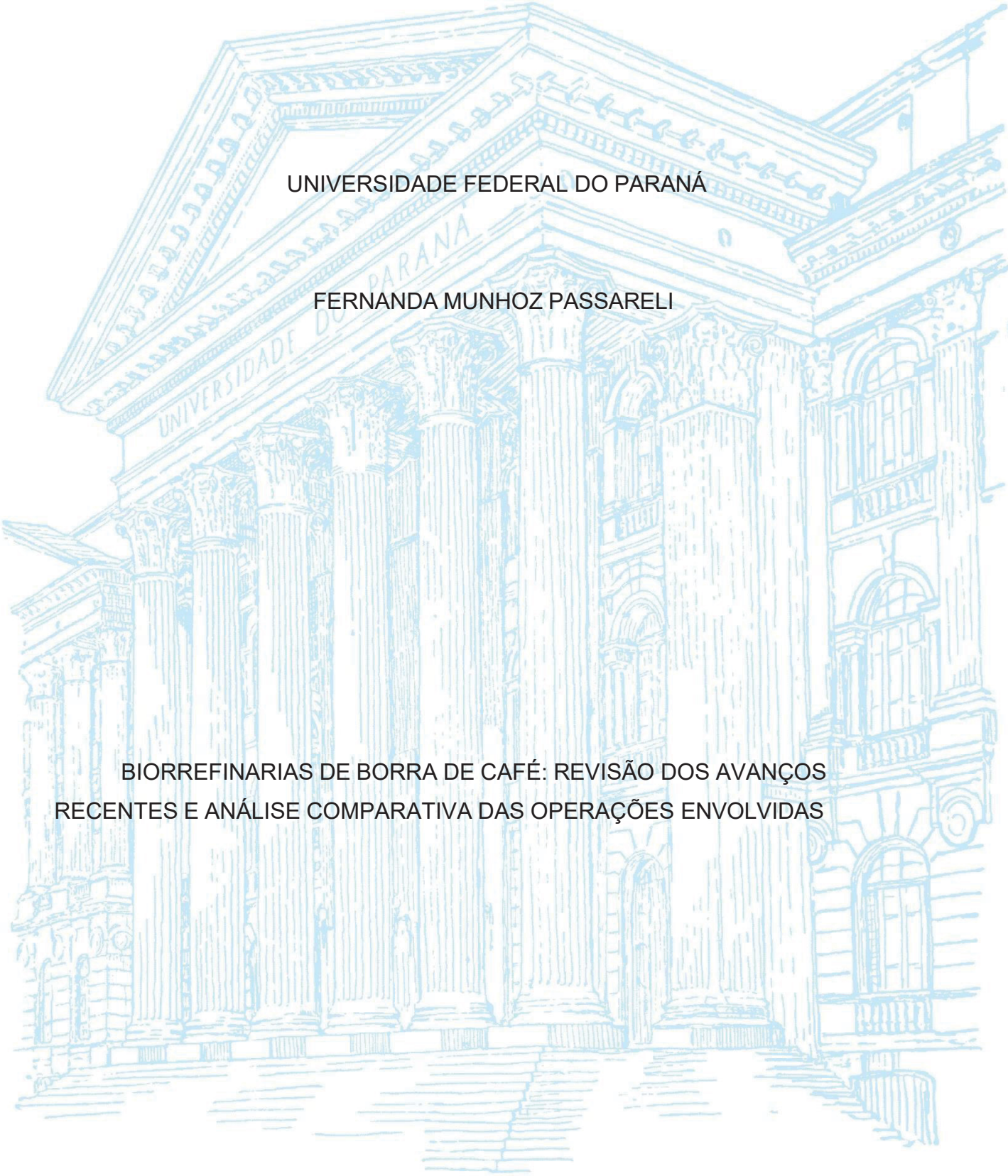




UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FERNANDA MUNHOZ PASSARELI

BIORREFINARIAS DE BORRA DE CAFÉ: REVISÃO DOS AVANÇOS
RECENTES E ANÁLISE COMPARATIVA DAS OPERAÇÕES ENVOLVIDAS

CURITIBA

2025

FERNANDA MUNHOZ PASSARELI

BIORREFINARIAS DE BORRA DE CAFÉ: REVISÃO DOS AVANÇOS
RECENTES E ANÁLISE COMPARATIVA DAS OPERAÇÕES ENVOLVIDAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação
em Engenharia Química, Setor de Tecnologia,
Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à
obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Luís Ricardo Shigueyuki Kanda

Coorientador: Prof. Dr. Marcos Lucio Corazza

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Passareli, Fernanda Munhoz

Biorrefinarias de borra de café: revisão dos avanços recentes e análise comparativa das operações envolvidas. / Fernanda Munhoz Passareli. – Curitiba, 2025.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Luís Ricardo Shigueyuki Kanda

Coorientador: Prof. Dr. Marcos Lucio Corazza

1. Café. 2. Biorrefinaria. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Kanda, Luís Ricardo Shigueyuki. IV. Corazza, Marcos Lucio. V. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585

ATA Nº191

ATA DE SESSÃO PÚBLICA DE DEFESA DE MESTRADO PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRA EM ENGENHARIA QUÍMICA

No dia treze de março de dois mil e vinte e cinco às 13:30 horas, na sala Miniauditório, Prédio da Engenharia Química no Centro Politécnico, foram instaladas as atividades pertinentes ao rito de defesa de dissertação da mestrand **FERNANDA MUNHOZ PASSARELI**, intitulada: **BIORREFINARIAS DE BORRA DE CAFÉ: REVISÃO DOS AVANÇOS RECENTES E ANÁLISE COMPARATIVA DAS OPERAÇÕES ENVOLVIDAS**, sob orientação do Prof. Dr. LUÍS RICARDO SHIGUEYUKI KANDA. A Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA QUÍMICA da Universidade Federal do Paraná, foi constituída pelos seguintes Membros: LUÍS RICARDO SHIGUEYUKI KANDA (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ), FABIANE OLIVEIRA FARIAS (PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS - UFPR), FERNANDO AUGUSTO PEDERSEN VOLL (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ). A presidência iniciou os ritos definidos pelo Colegiado do Programa e, após exarados os pareceres dos membros do comitê examinador e da respectiva contra argumentação, ocorreu a leitura do parecer final da banca examinadora, que decidiu pela APROVAÇÃO. Este resultado deverá ser homologado pelo Colegiado do programa, mediante o atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca dentro dos prazos regimentais definidos pelo programa. A outorga de título de mestra está condicionada ao atendimento de todos os requisitos e prazos determinados no regimento do Programa de Pós-Graduação. Nada mais havendo a tratar a presidência deu por encerrada a sessão, da qual eu, LUÍS RICARDO SHIGUEYUKI KANDA, lavrei a presente ata, que vai assinada por mim e pelos demais membros da Comissão Examinadora.

CURITIBA, 13 de Março de 2025.

Assinatura Eletrônica

13/03/2025 17:25:09.0

LUÍS RICARDO SHIGUEYUKI KANDA

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

13/03/2025 20:12:49.0

FABIANE OLIVEIRA FARIAS

Avaliador Externo (PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS - UFPR)

Assinatura Eletrônica

14/03/2025 13:16:58.0

FERNANDO AUGUSTO PEDERSEN VOLL

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA QUÍMICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **FERNANDA MUNHOZ PASSARELI**, intitulada: **BIORREFINARIAS DE BORRA DE CAFÉ: REVISÃO DOS AVANÇOS RECENTES E ANÁLISE COMPARATIVA DAS OPERAÇÕES ENVOLVIDAS**, sob orientação do Prof. Dr. LUÍS RICARDO SHIGUEYUKI KANDA, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 13 de Março de 2025.

Assinatura Eletrônica

13/03/2025 17:25:09.0

LUÍS RICARDO SHIGUEYUKI KANDA

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

13/03/2025 20:12:49.0

FABIANE OLIVEIRA FARIAS

Avaliador Externo (PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS - UFPR)

Assinatura Eletrônica

14/03/2025 13:16:58.0

FERNANDO AUGUSTO PEDERSEN VOLL

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

À minha família por todo o amor, apoio e incentivo ao longo de toda a minha vida.

Ao professor Dr. Luís Ricardo Shigueyuki Kanda pela orientação, paciência e disposição ao longo desta jornada acadêmica. Por todas as sugestões e explicações que foram necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Dr. Marcos Lúcio Corazza pela coorientação e auxílio. Suas contribuições foram essenciais para a realização deste trabalho.

Aos demais professores do PPGEQ e à secretária do PPGEQ pelo suporte prestado. Aos colegas de laboratório pelo incentivo e amizade.

Agradeço a CAPES pelo auxílio financeiro prestado ao longo dessa etapa.

“A vitalidade é demonstrada não apenas pela persistência, mas pela capacidade de começar de novo.” (F. Scott Fitzgerald)

RESUMO

Devido ao alto consumo de café, a borra de café é um resíduo descartado em grandes quantidades. Porém, devido a sua composição, que inclui diversos compostos, como lipídeos, proteínas, alcaloides, entre outros, esse material tem um grande potencial para obtenção de compostos de alto valor agregado para as indústrias farmacêutica e alimentícia. As biorrefinarias utilizando borra de café são uma alternativa que visa o aproveitamento de todo o potencial dessa matéria-prima, com várias possibilidades de operações unitárias, de acordo com os produtos de interesse. Um aspecto fundamental é que, por se tratar de uma biomassa complexa, com vários grupos funcionais presentes, existem diversas opções de processos compreendendo várias combinações possíveis das operações unitárias envolvidas. Assim, a metodologia PRISMA foi utilizada para fazer a Revisão da Literatura considerando biorrefinarias de borra de café. A base de dados escolhida foi o Google Acadêmico, por englobar as publicações científicas de diversas revistas; o idioma dos artigos selecionados foi o inglês. As palavras chaves das pesquisas com essa metodologia incluíram os métodos de extração de solutos e foram “*spent coffee grounds supercritical coffee beans*”, “*spent coffee grounds soxhlet coffee beans*”, “*spent coffee grounds ultrasound coffee beans*”, “*spent coffee grounds microwave coffee beans*”, “*spent coffee grounds pyrolysis coffee beans*”, “*spent coffee grounds hydrothermal liquefaction coffee beans*”, “*spent coffee grounds PLE coffee beans*”, “*biomass biorefinery*”, “*spent coffee grounds biorefinery*” e “*biorefinery economic analysis*” e o período analisado foi de 2010 a 2025. Com os resultados da busca na literatura, foram elaboradas propostas de biorrefinaria em forma de diagramas de bloco. A partir das pesquisas realizadas observa-se que diferentes técnicas de extração são indicadas para a recuperação de diferentes compostos e que o grau de complexidade de cada uma influencia no *scale-up*, nos custos e na análise ambiental do processo. Conclui-se que a primeira operação deve ser a extração com solventes polares, seguida da secagem e outras etapas, pois a umidade da biomassa é aproveitada nessa primeira etapa de extração e a remoção da umidade na secagem favorece as outras etapas. A descafeinação também foi uma das operações consideradas e, de acordo com a revisão realizada, pode ter até 98% de rendimento em extrações assistidas por micro-ondas. A deslipidificação foi outra operação pesquisada e pode ser feita através de diversas técnicas, que também foram comparadas ao longo da pesquisa, indicando que a mais vantajosa é a extração com fluidos supercríticos. A pirólise e a hidrotermoliquefação são processos unitários nos quais o interesse aumentou progressivamente ao longo dos anos, assim como a proposição de biorrefinarias. O estudo dessas temáticas deve ser valorizado considerando, além da questão ambiental, a identificação das condições ótimas dos processos e a realização de comparações entre as diferentes propostas de biorrefinarias, facilitando o desenvolvimento e conscientizando a sociedade a respeito do tema.

Palavras-chave: borra de café; biorrefinaria; proposta de biorrefinaria; metodologia

PRISMA

ABSTRACT

Due to the high consumption of coffee, coffee grounds are discarded in large quantities. However, due to their composition, which includes various compounds such as lipids, proteins, alkaloids, among others, this material has great potential for obtaining high-value-added compounds for the pharmaceutical and food industries. Biorefineries using spent coffee grounds are an alternative that aims to take advantage of the full potential of this raw material, with several possibilities of unit operations, depending on the products of interest. A fundamental aspect is that, since it is a complex biomass with the presence of several functional groups, there are several process options comprising various possible combinations of the involved unit operations. Hence, the PRISMA methodology was used to conduct the Literature Review considering a biorefinery based on spent coffee grounds. The chosen database was Google Scholar, as it encompasses scientific publications from various journals; the language of the selected articles was English. The keywords for searches using this methodology included solute extraction methods and were “spent coffee grounds supercritical coffee beans,” “spent coffee grounds soxhlet coffee beans,” “spent coffee grounds ultrasound coffee beans,” “spent coffee grounds microwave coffee beans,” “spent coffee grounds pyrolysis coffee beans,” “spent coffee grounds hydrothermal liquefaction coffee beans,” “spent coffee grounds PLE coffee beans,” “biomass biorefinery,” “spent coffee grounds biorefinery” and “biorefinery economic analysis,” and the period analyzed was from 2010 to 2025. With the search results from the literature, biorefinery proposals were elaborated in the form of block diagrams. It is observed that different extraction techniques are indicated for the recovery of different compounds and that the complexity degree of each one influences the scale-up, costs, and environmental analysis of the process. It is concluded that the first operation should be the extraction with polar solvents, followed by drying and other steps, since the moisture of the biomass is utilized in this first extraction step, and the moisture removal during drying favors the other steps. Decaffeination was another unit operation considered and according to the conducted literature review, it can reach up to 98% yield for microwave-assisted extractions. Delipidification was another operation researched that can be done through various techniques, which were compared throughout the research, indicating supercritical fluid extraction as the most promising. Pyrolysis and hydrothermal liquefaction are processes in which interest has progressively increased over the years, as well as the proposition of biorefineries. The study of these topics should be valued considering not only the environmental issue but also the identification of the optimal conditions of the processes, and making comparisons of the proposed biorefineries, facilitating the development and raising awareness about this topic of interest.

Keywords: spent coffee grounds; biorefinery; biorefinery proposal; PRISMA methodology.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO CONCEITO DE UMA BIORREFINARIA	21
FIGURA 2 – PROCESSO DE PRODUÇÃO DO CAFÉ	26
FIGURA 3 – ILUSTRAÇÃO DA ESTRUTURA DE UMA EXTRAÇÃO SOXHLET	33
FIGURA 4 – ESTRUTURA DO ETANOL	34
FIGURA 5 – ESTRUTURA DO HEXANO.....	34
FIGURA 6 - ESTRUTURA DO DICLOROMETANO.....	34
FIGURA 7 - ESTRUTURA DO ACETATO DE ETILA	34
FIGURA 8 - ESTRUTURA DA MOLÉCULA DA ÁGUA.....	34
FIGURA 9 - ESTRUTURA DO ÁCIDO PALMÍTICO	34
FIGURA 10 - ESTRUTURA DO ÁCIDO LINOLEICO	35
FIGURA 11 - RESUMO QUANTITATIVO DA PESQUISA SOXHLET.....	42
FIGURA 12 - RESULTADOS QUANTITATIVOS DA PESQUISA SOBRE A EXTRAÇÃO SUPERCRÍTICA.....	51
FIGURA 13 - RESULTADOS QUANTITATIVOS DA PESQUISA FEITA COM A METODOLOGIA PRISMA SOBRE A EXTRAÇÃO ASSISTIDA POR ULTRASSOM DE BORRA DE CAFÉ	56
FIGURA 14 - RESULTADO QUANTITATIVO DA PESQUISA FEITA SOBRE EXTRAÇÕES ASSISTIDAS POR MICRO-ONDAS COM A BORRA DE CAFÉ	63
FIGURA 15 - RESULTADOS QUANTITATIVOS DA PESQUISA FEITA COM A METODOLOGIA PRISMA SOBRE EXTRAÇÃO COM LÍQUIDOS PRESSURIZADOS DA BORRA DE CAFÉ.....	66
FIGURA 16 - RESULTADO QUANTITATIVO DAS PESQUISAS FEITAS COM A METODOLOGIA PRISMA SOBRE A HIDROTERMOLIQUEFAÇÃO COM A BORRA DE CAFÉ.....	73
FIGURA 17 - RESULTADO QUANTITATIVO DA PESQUISA FEITA COM A METODOLOGIA PRISMA SOBRE PIRÓLISE DE BORRA DE CAFÉ	78
FIGURA 18 - RESULTADOS QUANTITATIVOS DA PESQUISA FEITA COM A METODOLOGIA PRISMA SOBRE GERAÇÃO DE ENERGIA.....	79
FIGURA 19 - RESULTADOS QUANTITATIVOS DA PESQUISA FEITA COM A	

METODOLOGIA PRISMA SOBRE BIORREFINARIAS GERAIS.....	82
FIGURA 20 - RESULTADOS QUANTITATIVOS DA PESQUISA FEITA COM A METODOLOGIA PRISMA SOBRE BIORREFINARIAS COM BORRA DE CAFÉ	86
FIGURA 21 – RESULTADOS QUANTITATIVOS DA PESQUISA SOBRE BIORREFINARIAS COM DIFERENTES MATÉRIAS-PRIMAS COM DESTAQUE PARA FATORES ECONÔMICOS E ENERGÉTICOS.....	88
FIGURA 22 – PRIMEIRA PROPOSTA DE PROCESSO	94
FIGURA 23 – SEGUNDA PROPOSTA DE PROCESSO.....	95
FIGURA 24 – TERCEIRA PROPOSTA DE PROCESSO	97
FIGURA 25 – QUARTA PROPOSTA DE PROCESSO	98
FIGURA 26 – QUINTA PROPOSTA DE PROCESSO	99
FIGURA 27 – SEXTA PROPOSTA DE PROCESSO	101
FIGURA 28 - SÉTIMA PROPOSTA DE PROCESSO	102

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – COMPARAÇÃO DOS RENDIMENTOS DA EXTRAÇÃO DO ÓLEO DA BORRA DE CAFÉ ENCONTRADOS NA LITERATURA.....	38
GRÁFICO 2 – COMPARAÇÃO DOS VALORES ENCONTRADOS NA LITERATURA DOS ÁCIDOS LINOLEICO E PALMÍTICO NO EXTRATO OBTIDO EM EXTRAÇÕES COM FLUIDO SUPERCRÍTICO.....	49
GRÁFICO 3 – COMPARAÇÃO DA QUANTIDADE DE PUBLICAÇÕES NO PERÍODO SELECIONADO E SEM O CRITÉRIO DE ANO DE PUBLICAÇÃO	91
GRÁFICO 4 – COMPARAÇÃO DA QUANTIDADE DE PUBLICAÇÕES.	92
GRÁFICO 5 - COMPARAÇÃO DA QUANTIDADE DE PUBLICAÇÕES ANUAIS SOBRE OS TEMAS DE EXTRAÇÃO/REAÇÃO COM BORRA DE CAFÉ.....	93
GRÁFICO 6 - COMPARAÇÃO DA QUANTIDADE DE PUBLICAÇÕES ANUAIS SOBRE OS TEMAS DE BIORREFINARIAS.....	93

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – COMPOSIÇÃO DA BORRA DE CAFÉ	22
QUADRO 2 – VARIAÇÃO DA QUANTIDADE DE CAFEÍNA E SACAROSE DE ACORDO COM O PROCESSAMENTO E A ALTITUDE DO CAFÉ	28
QUADRO 3 – COMPARAÇÃO DA ANÁLISE ELEMENTAR DA BIOMASSA, BIO-ÓLEO E BIOCARVÃO.....	75
QUADRO 4 – RENDIMENTOS DE BIO-ÓLEO E BIOCARVÃO OBTIDOS POR MALAGÓN-ROMERO <i>ET AL.</i> (2023).....	76
QUADRO 5 – COMPARAÇÃO DA ANÁLISE ELEMENTAR DO BIO-ÓLEO EM DIFERENTES TEMPERATURAS	77

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – AVALIAÇÃO DO GRAU DE TORRA DO GRÃO DE CAFÉ.....	24
TABELA 2 – MUDANÇAS OBSERVADAS NOS GRÃOS DE CAFÉ APÓS A TORRA	25
TABELA 3 – RELAÇÃO DO GRAU DE MOAGEM COM O PREPARO DO CAFÉ.....	25
TABELA 4 – COMPARAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DE CAFÉ ARÁBICA APÓS O PROCESSAMENTO ÚMIDO.	27
TABELA 5 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE GRÃO CRU (<i>IN NATURA</i>) DE <i>COFFEA ARABICA</i> L. E <i>C. CANEPHORA</i> VAR. ROBUSTA.....	29
TABELA 6 – PERFIL DE ÁCIDOS GRAXOS EM MAIOR PROPORÇÃO COM EXTRAÇÃO CONVENCIONAL DE BORRA DE CAFÉ ARÁBICA COM SOLVENTE	38
TABELA 7 – COMPARAÇÃO DE PERFIS DE ÁCIDOS GRAXOS OBTIDOS COM HEXANO.....	39
TABELA 8 – COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DE ÓLEOS OBTIDOS COM DIFERENTES SOLVENTES	40
TABELA 9 – COMPARAÇÃO DA CAPACIDADE CALORÍFICA DE ÓLEOS OBTIDOS COM DIFERENTES SOLVENTES.....	41
TABELA 10 – PERFIL DE ÁCIDOS GRAXOS DE BORRA DE CAFÉ TIPO ARÁBICA	47
TABELA 11 – QUANTIDADES DE FENÓLICOS TOTAIS EXTRAÍDAS EM DIFERENTES CONDIÇÕES.....	50
TABELA 12 – CONDIÇÕES UTILIZADAS POR ZHANG <i>ET AL.</i> (2021).....	54
TABELA 13 – COMPARAÇÃO DE RENDIMENTOS GLOBAIS DE EXTRAÇÃO COM A CASCA DE CAFÉ E COM A BORRA DE CAFÉ.....	56
TABELA 14 – RENDIMENTOS DE EXTRAÇÃO DE CAFEÍNA EM DIFERENTES CONDIÇÕES	60
TABELA 15 – COMPOSIÇÃO DOS EXTRATOS OBTIDOS DE CAFÉ ARÁBICA	61
TABELA 16 – RENDIMENTOS DE CARBOIDRATOS E DE EXTRAÇÃO OBTIDOS POR PASSOS E COIMBRA	62

TABELA 17 – RENDIMENTOS DE ÓLEO, BIOCARVÃO E GÁS EM DIFERENTES TEMPERATURAS.....	71
TABELA 18 - COMPARAÇÃO DE DADOS DOS ENSAIOS DE MARX <i>ET AL.</i> (2020).	72
TABELA 19 - COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DO BIO-ÓLEO.	72
TABELA 20 – BIOMASSAS UTILIZADAS EM BIORREFINARIAS	83

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

%	porcento
atm	atmosfera
°C	graus celsius
g	grama
h	horas
K	Kelvin
kg	quilograma
kg/h	quilogramas por hora
m/m	massa/ massa
min	minutos
mPa	mega Pascal
s	segundos
t	toneladas
t/h	toneladas por hora
v/v	volume/ volume

LISTA DE SÍMBOLOS

©	copyright
@	arroba
®	marca registrada
Σ	somatório de números
Π	produtório de números

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 PROBLEMA	16
1.2 OBJETIVOS	16
1.2.1 Objetivo geral	16
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
1.3 JUSTIFICATIVA	17
1.4 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA.....	18
2 BIORREFINARIAS.....	19
2.1 DEFINIÇÕES DE BIORREFINARIAS.....	19
2.2 CLASSIFICAÇÕES DAS BIORREFINARIAS	20
2.3 PROCESSOS POSSÍVEIS EM BIORREFINARIAS	20
2.4 BORRA DE CAFÉ	21
2.4.1 Descarte e reutilização da borra de café	21
2.4.2 Composição da borra de café.....	22
2.4.3 Fração proteica da borra de café.....	22
2.4.4 Fração de alcaloides da borra de café	22
2.4.5 Fração de lipídeos da borra de café	23
2.5 CAFÉ.....	23
2.5.1 Classificação do café.....	24
2.5.2 Descrição do fruto do café.....	25
2.5.3 Formas de processamento do grão de café	26
2.5.4 Composição do café após processamento úmido	27
2.5.5 Composição do café após processamento seco	28
2.5.6 Torrefação do café	28
2.5.7 Composição do café.....	28
3 MATERIAL E MÉTODOS	30
3.1 METODOLOGIA PRISMA.....	30
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	32
4.1 MÉTODOS DE EXTRAÇÃO ABORDADOS.....	32
4.1.1 Extração convencional (Soxhlet)	32

4.1.1.1 Extração convencional com a borra de café	36
4.1.1.2 Quantidade e perfil de ácidos graxos obtido a partir da extração soxhlet	38
4.1.1.3 Composição elementar do óleo extraído por Soxhlet	40
4.1.1.4 Capacidade calorífica do óleo de borra de café extraído por Soxhlet.....	41
4.1.1.5 Quantidade de fenólicos totais obtidos com a extração Soxhlet.....	42
4.1.1.6 Resumo da pesquisa feita com a metodologia PRISMA.....	42
4.1.2 Extração com fluidos supercríticos	44
4.1.2.1 Extração com fluido supercrítico aplicada à borra de café.....	45
4.1.2.2 Perfil de ácidos graxos obtido a partir da extração com fluidos supercríticos	46
4.1.2.3 Adição de cossolventes	47
4.1.2.4 Quantidade de fenólicos totais extraída com fluido supercrítico	49
4.1.2.5 Resumo dos resultados da Metodologia PRISMA.....	50
4.1.3 Extração Assistida por Ultrassom.....	53
4.1.3.1 Extração Assistida por Ultrassom aplicada à borra de café	54
4.1.3.2 Resumo das pesquisas feitas para a Metodologia PRISMA.....	56
4.1.4 Extração Assistida por Micro-ondas	58
4.1.4.1 Extração Assistida por Micro-ondas aplicada à borra de café	59
4.1.4.2 Perfil de ácidos graxos dos extratos	60
4.1.4.3 Caracterização do extrato obtido com as micro-ondas.....	61
4.1.4.4 Resumo das pesquisas feitas com a metodologia PRISMA	63
4.1.5 Pesquisa bibliográfica sobre a extração com líquidos pressurizados (PLE) com borra de café	64
4.1.5.1 Cafeína e quantidade de fenólicos totais extraída através do PLE.....	65
4.1.5.2 Resumo das pesquisas feitas com a metodologia PRISMA sobre extração com líquidos pressurizados da borra de café	66
4.1.6 Maceração dos grãos de café e da borra de café.....	67
4.1.6. 1 Resultados da metodologia PRISMA.....	67
4.1.7 Hidrotermoliquefação e pirólise da borra de café e dos grãos de café	69
4.1.7.1 Hidrotermoliquefação da borra de café e dos grãos de café.....	69
4.1.7.1.1 Rendimentos da hidrotermoliquefação em bio-óleo, biogás e biocarvão.....	70

4.1.7.1.2 Características do bio-óleo obtido a partir da hidrotermoliquefação da borra de café e dos grãos de café.....	71
4.1.7.1.3 Resumo com as pesquisas da metodologia PRISMA	73
4.1.8 Pirólise aplicada à borra de café e ao grão de café	74
4.1.8.1 Rendimentos em bio-óleo e biocarvão obtidos a partir da pirólise.....	74
4.1.8.2 Resumo das pesquisas feitas com a metodologia PRISMA para a pirólise de borra de café	78
4.1. 9 Pesquisa bibliográfica sobre geração de energia.....	79
4.1.9.1 Resultados da pesquisa sobre geração de energia.....	79
4.1.10 Pesquisa bibliográfica sobre biorrefinarias gerais.....	81
4.1.11 Pesquisa de biorrefinarias que utilizam borra de café	85
4.1.12 Biorrefinarias de diferentes matérias primas com destaque para fatores econômicos e energéticos	87
4.1.13 Análise crítica das pesquisas realizadas com a metodologia PRISMA	89
4.2 PROPOSTAS DE PROCESSO	94
4.2.1 Análise econômica qualitativa dos processos propostos (resultados).....	102
5 CONCLUSÃO	104
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	105
REFERÊNCIAS.....	106
APÊNDICE 1 – TABELAS COM OS RESULTADOS DA PESQUISA COM A METODOLOGIA PRISMA	170

1 INTRODUÇÃO

O café é uma das bebidas mais consumidas mundialmente e um dos resíduos gerados nesse processo é a borra de café. Toneladas desse material são produzidas diariamente em ambiente residencial, nas cafeterias e na produção industrial de café solúvel. Esse material é considerado um resíduo, portanto, as destinações que são dadas são o aterro sanitário, além do uso para geração de energia em caldeiras, através do processo de combustão (Campos-vega et al., 2015).

Devido à variedade de compostos que existem na borra de café, esse é um material com alta carga orgânica, composto, por exemplo, por lipídeos e ácidos orgânicos, que contaminam o solo quando descartado incorretamente. Por outro lado, a borra de café contém diversos compostos que são de alto valor agregado, principalmente para as indústrias farmacêutica e de alimentos. A escolha da temática foi feita de acordo com os trabalhos do grupo de pesquisa e considerando a questão da economia circular e da quantidade de borra de café que é gerada anualmente.

1.1 PROBLEMA

Considerando o atual panorama ambiental, os locais para disposição de resíduos sólidos são limitados e a produção anual de borra de café é realizada em grandes quantidades. Portanto, devem ser estudadas alternativas para o aproveitamento desse resíduo e, por consequência, obter compostos de alto valor agregado presentes nessa biomassa.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos da dissertação estão apresentados a seguir:

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral é sugerir propostas de biorrefinaria utilizando a borra de café como matéria prima, com foco na análise comparativa dos processos propostos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar revisão bibliográfica sobre os últimos avanços no processamento da borra de café e os principais produtos obtidos, utilizando a metodologia PRISMA;
- Elaborar estratégias para o processamento da borra de café utilizando o conceito de biorrefinarias;
- Avaliar os efeitos das variáveis de processo;
- Realizar uma análise comparativa dos processos propostos.

1.3 JUSTIFICATIVA

A presença de diversos compostos de interesse na borra de café, que são produzidos por maneiras artificiais e muitas vezes utilizando reagentes nocivos ao meio ambiente, motiva o estudo de alternativas que permitam o aproveitamento dessa biomassa.

Alguns compostos mais conhecidos, como a cafeína, por exemplo, são utilizados tanto em medicamentos como em alimentos. Já o ácido palmítico mantém a estabilidade em cosméticos e atua na maciez da pele; na indústria alimentícia, é usado em alimentos processados, por exemplo, margarina, cremes e em produtos de panificação.

Portanto, propor processos de obtenção dos compostos presentes na borra de café, utilizando a ideia de biorrefinarias, é necessário para criar processos industriais mais sustentáveis e obter compostos que podem ser aplicados em outros produtos.

A proposição destes processos será feita através das seguintes etapas: escolha das temáticas, considerando os trabalhos publicados no grupo de pesquisa “Laboratório de Cinética e Termodinâmica Aplicada” (LACTA) e também a importância da economia circular; seguida da pesquisa de cada temática utilizando a metodologia PRISMA, para obter uma varredura ampla dos trabalhos publicados a respeito dos temas de busca, mas também delimitar os temas de busca possíveis considerando o processamento da borra de café. Além disso, essa metodologia já foi utilizada em outra dissertação de mestrado de uma estudante do LACTA.

1.4 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

Os locais destinados à disposição de resíduos sólidos estão tornando-se cada vez mais limitados e a identificação dos compostos de interesse contidos nas diversas biomassas, sejam lignocelulósicas ou não, motiva a pesquisa com foco em biorrefinarias, primeiramente de forma geral, depois, com foco na utilização da borra de café. Devido a algumas propriedades dessa biomassa, ela já é destinada à geração de energia em caldeiras, porém, altas quantidades desse material são descartadas anualmente e o aproveitamento utilizando o conceito de biorrefinarias é benéfico para vários setores industriais.

A pesquisa sobre biorrefinarias aborda diversos temas, entre eles estão as dificuldades de implementação de uma biorrefinaria considerando as biomassas existentes. Existem diversos processos de conversão possíveis para esses materiais, por exemplo, fermentação, além do processamento térmico, entre outros. Visando escolher um processo de conversão que seja viável economicamente e seja adequado ao aproveitamento dos compostos de interesse, caracterizar a biomassa é fundamental (OLIVEIRA et al., 2025). As biorrefinarias também estão incluídas no conceito de Economia Circular, que é compreendida como um ciclo contínuo de desenvolvimento positivo que preserva os recursos naturais (ELLEN MACARTHUR, 2015).

Após a escolha da matéria-prima, um desafio é a implementação de uma biorrefinaria integrada que seja capaz de extrair ou recuperar diversos produtos a partir desta biomassa. (MENEZES, 2019) realizou uma pesquisa exploratória que apresentou algumas alternativas integradas de produção de biocombustíveis a partir de biomassas lignocelulósicas, mostrando que nem sempre todos os produtos obtidos ao final do processo podem ser utilizados. Por exemplo, o uso dos óleos vegetais em motores a diesel não é indicado devido as diferenças em relação ao diesel de petróleo.

Isto evidencia a importância de conhecer os compostos presentes na matéria-prima e as formas de processamento, de modo estes compostos de interesse sejam separados da matriz original e purificados, possibilitando sua exploração dentro do conceito de biorrefinaria. Como estas biomassas possuem composições complexas, há inúmeras alternativas de processamento, que devem ser listadas e analisadas, para que seja determinado o processo mais vantajoso para a implementação de uma biorrefinaria desta biomassa.

2 BIORREFINARIAS

A seção a seguir apresenta as informações referentes às biorrefinarias: definições, classificações e processos possíveis.

2.1 DEFINIÇÕES DE BIORREFINARIAS

A definição de biorrefinarias apresentada pela Agência Internacional de Energia (IEA) é o processamento sustentável de biomassa em produtos comercializáveis e energia (2010). É válido observar que o funcionamento de uma biorrefinaria e de uma refinaria de petróleo são similares, pois, a partir de uma mesma matéria-prima, são obtidos diversos produtos, sejam eles intermediários ou finais.

(DE JONG; JUNGMEIER, (2015) indicam que a principal diferença entre uma refinaria e uma biorrefinaria é a natureza da matéria-prima, que é homogênea em uma refinaria e heterogênea para as biorrefinarias. Devido a essa heterogeneidade, é necessário combinar diversos processos, aumentando os custos e dificuldades do processo.

As biorrefinarias oferecem uma série de vantagens significativas para a sustentabilidade ambiental e a economia global. Elas permitem a conversão eficiente de biomassa em uma variedade de produtos úteis, como biocombustíveis, produtos químicos, materiais e energia. Isso reduz a dependência de combustíveis fósseis, diminui as emissões de gases de efeito estufa e promove o uso de recursos renováveis. Além disso, as biorrefinarias ajudam a valorizar resíduos agroindustriais e urbanos, contribuindo para a economia circular e a gestão sustentável de resíduos (El Hajjaji et al., 2020). A diversificação dos produtos obtidos também abre novas oportunidades de mercado e pode gerar emprego em áreas rurais, fortalecendo economias locais. Em resumo, as biorrefinarias desempenham um papel crucial na transição para uma economia mais verde e sustentável, promovendo inovação e eficiência no uso de recursos biológicos (Kubik, 2009).

Um problema que surge é a competição do uso da biomassa para uso voltado à produção de energia e à alimentação, porém, a ampla variedade de biomassas que podem ser processadas em uma biorrefinaria elimina essa dependência. Além disso, o uso de resíduos da produção de alimentos também é uma possibilidade a se considerar.

2.2 CLASSIFICAÇÕES DAS BIORREFINARIAS

O conceito de biorrefinarias não é unânime entre os autores e organizações, ou seja, não há um conceito padrão. Outras formas de classificação foram elaboradas, por exemplo, CHERUBINI; WELLISCH; WILLKE (2009) desenvolveram uma forma que considera uma limitação nos sistemas, avaliando de forma genérica os tipos de biorrefinaria.

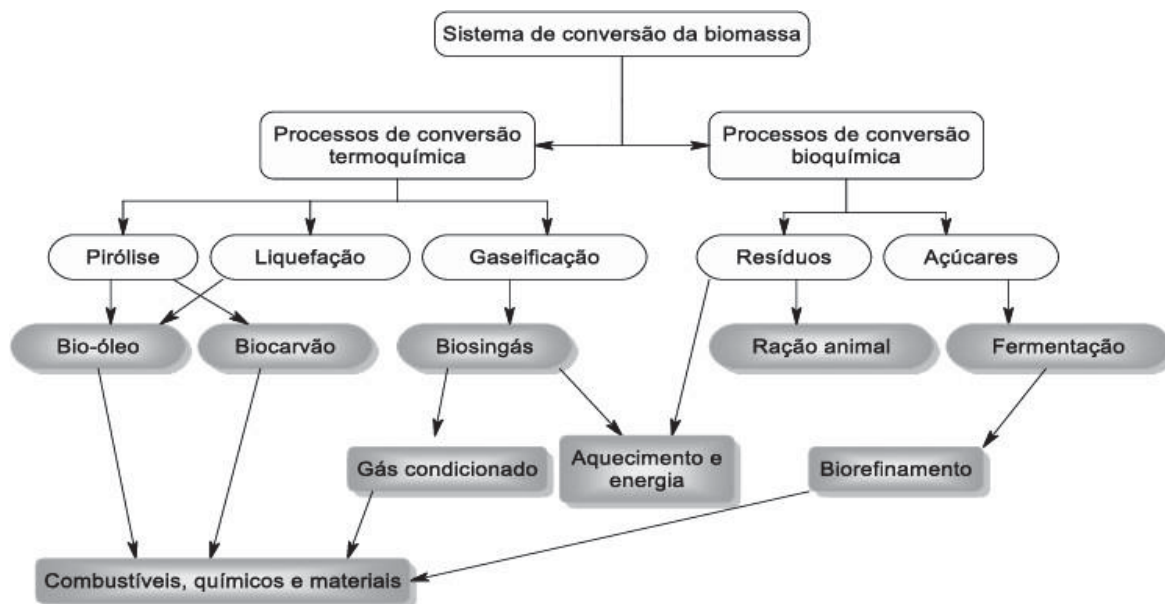
De acordo com (Demirbas, 2009) e (IEA BIOENERGY, 2010), as classificações das biorrefinarias podem ser feitas através do tipo de plataforma aplicada ao processo, dos tipos de produtos fabricados, da matéria-prima utilizada e dos tipos de conversão existentes no processo. Considerando os principais fatores de agrupamento existentes é possível citar o agrupamento dos produtos em produtos energéticos (por exemplo, biocombustíveis) e materiais (por exemplo, produtos químicos, alimentos); já os agrupamentos dos processos de conversão se dividem em bioquímicos (por exemplo, fermentação e conversão enzimática), termoquímicos (por exemplo, pirólise e liquefação), químicos (por exemplo, hidrólise e transesterificação) e mecânicos (por exemplo, pressão ou fracionamento).

Quando a classificação é feita através do tipo de plataforma, refere-se aos elementos intermediários, obtidos da matéria-prima, que geram diversos produtos. A matéria-prima utilizada pode ser classificada como primária, secundária ou terciária: primária quando é colhida diretamente da agricultura ou de florestas; secundária quando é um resíduo gerado a partir do processamento de um material e terciária quando é um resíduo produzido a partir de atividades humanas ou um pós-consumo industrial (SANTOS, 2020).

2.3 PROCESSOS POSSÍVEIS EM BIORREFINARIAS

Em uma biorrefinaria, a biomassa passa por sistemas de conversão que visam extrair os compostos de interesse contidos na biomassa. Esses sistemas podem ser de conversão termoquímica, bioquímica ou uma combinação das duas possibilidades. A figura a seguir ilustra os processos existentes:

FIGURA 1. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO CONCEITO DE UMA BIORREFINARIA



Fonte: Adaptado de FATIH DEMIRBAS, 2009

2.4 BORRA DE CAFÉ

A borra de café é um subproduto gerado a partir da produção do café, seja em ambiente doméstico, comercial (em cafeterias) ou industrial (produção de café solúvel). Apesar de ser considerada um resíduo, esse material contém altas quantidades de componentes orgânicos, por exemplo, ácidos graxos, lignina, celulose, hemicelulose, entre outros.

Esses compostos podem gerar outros de alto valor agregado, por isso foram relatadas pesquisas visando a produção de biodiesel (CAETANO; SILVA; MATA, 2012), adsorção de íons metálicos (Fiol; Escudero; Villaescusa, 2008), como fonte de açúcares (Mussatto et al., 2011), entre outros.

2.4.1 Descarte e reutilização da borra de café

Esse resíduo pode ser utilizado na produção de energia renovável. De acordo com Campos-Vega *et al.* (2015), a Nestlé® utilizou esse material como fonte de energia em 2020, em mais de 20 fábricas localizadas na Europa. Na grande maioria das fábricas de café solúvel, os resíduos são coletados por empresas especializadas, que são responsáveis por sua venda. Esses resíduos são destinados a diferentes propósitos: compostagem, jardinagem, crescimento de cogumelos, entre outros.

2.4.2 Composição da borra de café

Segundo Mussato *et al.* (2011), a composição da borra de café está apresentada no quadro a seguir.

QUADRO 1 - COMPOSIÇÃO DA BORRA DE CAFÉ

Componente	Composição (g/ 100 g de massa seca)
Celulose	12,40 ± 0,79
Hemicelulose	39,10 ± 1,94
Arabinose	3,60 ± 0,52
Manose	19,07 ± 0,85
Galactose	16,43 ± 1,66
Lignina	23,90 ± 1,70
Insolúvel	17,59 ± 1,56
Solúvel	6,31 ± 0,37
Cinzas	1,30 ± 0,10
Proteína	17,44 ± 0,10
Nitrogênio	2,79 ± 0,10

Fonte: Mussato *et al.* (2011)

Observando o quadro anterior, conclui-se que o teor de celulose, hemicelulose e lignina compõe grande parte da borra de café. Uma fração menor é composta por cinzas, proteínas e nitrogênio.

2.4.3 Fração proteica da borra de café

A quantidade de proteínas pode ser considerada significativa, com 13,6% do peso em base seca. Algumas substâncias presentes são os aminoácidos, por exemplo, a leucina, valina, entre outras, que são importantes para a nutrição humana. Os aminoácidos essenciais compõem quase metade dos aminoácidos presentes na borra de café (Rogers *et al.*, 1999).

2.4.4 Fração de alcaloides da borra de café

Os compostos nitrogenados são responsáveis pelo sabor e qualidade do café,

passando por transformações durante o processo de torrefação, principalmente os alcaloides que compõe de 3-4% em massa seca do grão de café. A cafeína é uma das substâncias mais conhecidas do grão de café, é classificada como um alcaloide e está presente tanto no grão do café como na borra do café, em uma concentração de 6,14 mg de cafeína/ g de borra de café seca (Panusa et al., 2013).

O método de extração escolhido impacta na obtenção dos componentes, de acordo com as propriedades físico-químicas. O uso de solventes polares, por exemplo, etanol e água, facilita a extração da cafeína, porém, a quantidade extraída depende de outros fatores, por exemplo, temperatura, pressão, entre outros. Quando a extração é realizada através das técnicas de baixa pressão, por exemplo, a extração convencional e o ultrassom, a concentração obtida de cafeína varia entre 0,734 a 41,3 µg/mg de extrato (Andrade et al., 2012).

2.4.5 Fração de lipídeos da borra de café

Referente a presença de lipídeos na borra de café, geralmente há entre 10% e 15% (Jenkins et al., 2014), porém, dependendo do método de extração selecionado, por exemplo, Soxhlet utilizando hexano como solvente, a quantidade pode ser maior. As quantidades de lipídeos encontradas na borra de café, gerada a partir de diversos processos, é de 9,3% a 16,2% no processo de café expresso (Cruz et al., 2012), de 10% a 15% no café produzido em residências e entre 14 e 15,4% no café solúvel produzido industrialmente.

As variações nas quantidades de lipídeos podem ser causadas por diversos fatores, por exemplo, a origem do grão de café que foi torrado para gerar a borra de café e a forma de processamento. Na produção de café expresso e na de café solúvel existem diferenças de tempos de extração dos componentes do café que influenciam na composição final.

2.5 CAFÉ

O café é uma das bebidas mais consumidas no mundo e tem a produção estimada em, aproximadamente, 165 milhões de sacas em 2018-2019 (“ABIC – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ”, 2008]). Os resíduos gerados são tóxicos e geram problemas ambientais, fator que motiva o reaproveitamento, seja

de forma caseira ou industrial. Dentre as espécies existentes de café, as duas principais para o setor agroeconômico são a *Coffea arábica* (café arábica) e a *Coffea canephora* (café robusta) (Halal, 2008).

Segundo (ROSSETTI, 2007), o café arábica é uma planta cultivada em altitudes maiores, geralmente plantada nos trópicos. É uma espécie complexa, com 44 cromossomos, portanto, só pode fazer cruzamentos com plantas da mesma espécie, além de ter sabor suave e aromático. Esse grão produz cafés mais requintados e de melhor qualidade. De acordo com “BASILICO.”, (2008) o café robusta pode ser cultivado no nível do mar e apresenta sabor único, mais adstringente e amargo. Apresenta raízes mais profundas com árvores mais resistentes. Segundo (“Café Damasco”, 2008), essa variedade de café apresenta mais sólidos solúveis e maior teor de cafeína em comparação com o café arábica, logo, é mais utilizado na produção de café solúvel.

2.5.1 Classificação do café

A normativa nº 8 do Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2003) apresenta regras de classificação do café, segundo os defeitos observados no grão. No total são sete defeitos que podem ser observados: grãos não descascados, grãos com coloração mais escura, grãos com malformação ou que não foram beneficiados e grãos em forma de concha ou que foram danificados.

Referente a torra dos grãos de café, a Associação Brasileira de Indústria de café (ABIC) determinou, em 2008, três graus de torra, além das características almejadas em cada grau e a indicação de aplicação. As informações estão apresentadas na tabela a seguir.

TABELA 1 – AVALIAÇÃO DO GRAU DE TORRA DO GRÃO DE CAFÉ

Grau de torra	Características	Equipamento
Clara	Acentuada acidez, suavidade do aroma e sabor, menor amargor	Ideal para máquinas de café expresso
Média	Acentuados aroma e sabor	Ideal para coador de pano ou filtro de papel
Escura	Acentuado sabor amargo, acidez menor, bebida mais escura	

Fonte: Associação Brasileira de Indústria de café - ABIC, 2008.

BICHO et al., (2012) avaliaram o aumento de volume em porcentagem, além da perda de massa e do teor de cinzas e umidade dos grãos de café Arábica e Robusta após a torra. A tabela a seguir apresenta alguns dos resultados obtidos.

TABELA 2 – MUDANÇAS OBSERVADAS NOS GRÃOS DE CAFÉ APÓS A TORRA.

Efeitos avaliados	Café Arábica	Café Robusta
Aumento de volume em %	40,2 ± 0,50	48,1 ± 0,50
Perda de massa (%)	10,5 ± 0,20	10,1 ± 0,40
Teor de cinzas (%)	4,54 ± 0,14	4,60 ± 0,05
Teor de umidade (%)	9,06 ± 0,03	2,42 ± 0,01

Fonte: Adaptado de Bicho *et al.* (2012)

Na temperatura de torra de 200 °C, o café Robusta aumentou mais de volume e teve menor perda de massa, com teor de umidade muito baixo. Portanto, a umidade do café Arábica é maior, porém, ainda abaixo dos 10%.

Segundo a Associação Brasileira de Indústria de café (2008), o grau de moagem do café é classificado de acordo com a retenção em peneiras granulométricas n° 12 (1,70 mm), n° 16 (1,18 mm), n° 20 (0,84 mm), n° 30 (0,59 mm). Os grãos devem estar inteiros e frios para a etapa de moagem. Essa informação é crucial para a etapa de preparo do café, pois, quanto maior o grão, mais fácil a passagem da água. A tabela a seguir apresenta a relação do grau de moagem com o preparo do café.

TABELA 3 - RELAÇÃO DO GRAU DE MOAGEM COM O PREPARO DO CAFÉ

Grau de moagem	Preparo
Pulverizado	Café árabe, onde o pó não é coado
Fina/Média	Filtração (filtros de papel, coador de pano)
média	Café expresso
grossa	Percolação - cafeteira italiana

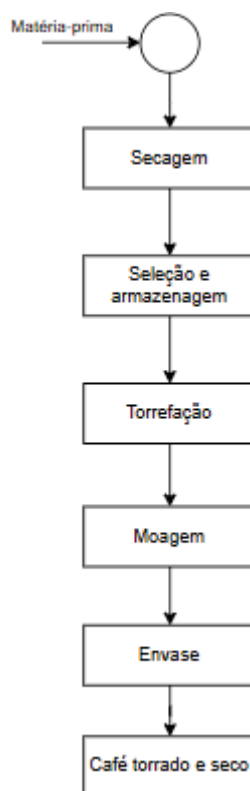
Fonte: Associação Brasileira de Indústria de Café - ABIC, 2008.

2.5.2 Descrição do fruto do café

O fruto do café é composto pelo exocarpo, mesocarpo e o endocarpo, este conhecido como pergaminho, que envolve a semente. A polpa (mesocarpo externo) contém 29% do peso seco do fruto inteiro, sendo que essa porcentagem é dividida em cerca de 76% de água, 10% de proteína, 2% de fibras e 4% de extrato livre de nitrogênio (HALAL, 2008). Esse extrato livre de nitrogênio contém substâncias que podem ter alto valor agregado, além de serem utilizadas em outros produtos, por exemplo, cafeína,

ácidos clorogênicos, ácido cafeico. Além disso, contém celulose, hemicelulose e lignina, entre outras substâncias. A figura a seguir apresenta o processo de produção do café.

FIGURA 2 – PROCESSO DE PRODUÇÃO DO CAFÉ



Fonte: Adaptada de (Novais et al., 2021)

2.5.3 Formas de processamento do grão de café

O processamento por via seca é feito com as seguintes etapas: o fruto com casca passa pela secagem e o café gerado é classificado como natural. Uma alternativa é, antes da secagem, o grão colhido passa por um separador de café, que garante a secagem uniforme. Um fenômeno que ocorre durante a secagem é a transferência do sabor adocicado (HALAL, 2008)

O processamento por via úmida é feito através da retirada da casca e da polpa do fruto maduro, evitando o desenvolvimento de micro-organismos (MALTA, 2011). O preparo do café ocorre na etapa de fermentação seguida da lavagem, para eliminar a mucilagem. Uma vantagem dessa forma de processamento é a redução do volume para secagem e, conseqüentemente, do tempo de secagem. A qualidade do produto melhora, porém, aumenta o custo operacional e os investimentos em infraestrutura

(HALAL, 2008).

Outra maneira de processamento do café é a semiúmida. Essa prática ocorre principalmente em lugares com alta pluviosidade e umidade. Os frutos são descascados e em seguida secos, sem a fermentação (HALAL, 2008).

(PEÑUELA-MARTÍNEZ et al., (2023) avaliaram a umidade do grão de café produzido em duas regiões com altitudes diferentes, uma com a altitude variando entre 1816 m e 1580 m; a segunda região tem altitude variando entre 1489 m e 1210 m. A região com maiores altitudes tem maior umidade relativa do ar e menor período anual de exposição solar; enquanto a região com menor altitude tem comportamento oposto. Uma consequência é que cafés produzidos em altitudes maiores requerem maior tempo de secagem.

2.5.4 Composição do café após processamento úmido

De acordo com (PEREIRA; VILLELA; ANDRADE, 2001), o café boia (que secou na planta, portanto apresenta densidade menor do que os demais no processo de lavagem) contém 7,28% de açúcares totais e 6,38% de açúcares não redutores.

JOËT et al., (2010) compararam valores de composição de grãos de café arábica *in natura* e após o processamento úmido, conforme observado na tabela a seguir.

TABELA 4 – COMPARAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DE CAFÉ ARÁBICA APÓS O PROCESSAMENTO ÚMIDO.

Composto	Sementes secas	Processamento úmido
Glicose	0,261 ± 0,056	0,031 ± 0,033
Frutose	0,122 ± 0,051	0,031 ± 0,033
Sacarose	8,081 ± 0,785	7,956 ± 0,532
Rafinose	0,013 ± 0,008	0,021 ± 0,016
Cafeína	0,736 ± 0,099	0,725 ± 0,066
Ácidos Clorogênicos Totais	7,359 ± 0,499	7,646 ± 0,655
Lipídeos Totais	16,022 ± 0,941	16,912 ± 0,707
Palmítico	35,637 ± 0,878	35,419 ± 1,027
Esteárico	7,022 ± 0,717	7,086 ± 0,980
Oleico	7,438 ± 0,828	7,209 ± 1,027
Linoleico	43,581 ± 1,359	44,024 ± 1,859
Linolênico	1,898 ± 0,169	1,882 ± 0,136

Fonte: Adaptado de Joët et al (2010)

2.5.5 Composição do café após processamento seco

PEREIRA; VILLELA; ANDRADE, (2001) processaram o café com a secagem do grão com a polpa e a mucilagem, concluindo que o produto resultante apresenta maior quantidade de açúcares redutores, com 7,29%. Em relação aos açúcares totais, foram mensurados 8,44%

MARTO et al., (2016) realizaram o processamento seco do café arábica e observaram diferenças nos valores de cafeína e sacarose: de 10,67 g/kg para 14,20 g/kg e de 53,16 g/kg para 89,51 g/kg, respectivamente. Foram avaliadas as diferenças de composição apresentadas de acordo com as altitudes maiores que 1200 m, entre 1000 m e 1200 m e menor que 1000 m, com os processamentos úmido e seco.

O quadro a seguir apresenta alguns resultados obtidos para o genótipo Acaia por MARTO et al., (2016).

QUADRO 2 – VARIAÇÃO DA QUANTIDADE DE CAFEÍNA E SACAROSE DE ACORDO COM O PROCESSAMENTO E A ALTITUDE DO CAFÉ.

Altitude	Processamento	Cafeína (g/kg)	Sacarose (g/kg)
Maior que 1200 m	Úmido	13,49	62,68
Maior que 1200 m	Seco	13,47	71,38
Entre 1000 m e 1200 m	Úmido	12,49	55,42
Entre 1000 m e 1200 m	Seco	12,94	71,94
Menor que 1000 m	Úmido	12,64	59,23
Menor que 1000 m	Seco	12,88	72,44

Fonte: Adaptado de (MARTO et al., (2016)

2.5.6 Torrefação do café

O café verde é colocado no elevador e transportado para o torrador. O torrador funciona a gás e o café é torrado a 200 °C, por no máximo 25 min. Os compostos voláteis são liberados pelo exaustor. Em seguida, o café passa por um sistema de resfriamento com ar frio por 5 min (GONZALEZ, 2004).

2.5.7 Composição do café

A composição química de grão cru (*in natura*) de *Coffea arabica* L. e *C. canephora* var. robusta estão indicadas na tabela a seguir.

TABELA 5 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE GRÃO CRU (*IN NATURA*) DE *COFFEA ARABICA* L. E C. *CANEPHORA* VAR. ROBUSTA

Componente	Café Arábica (%)	Café Robusta (%)
Cafeína	0,7 – 1,4	1,2 – 2,4
Trigonelina	1,0 – 1,2	0,6 – 0,7
Minerais	3 – 4,2	3 – 4,2
Lignina	1 – 3	1 – 3
Proteínas	11,0 – 13,0	11,0 – 13,0
Aminoácidos livres	0,2 – 0,8	0,2 – 0,8
Óleos	7,7 – 16,0	7,7 – 16,0
Ceras	0,2 – 0,3	0,2 – 0,3
Ácidos clorogênicos	3,5 – 7,3	7,0 – 14,0
totais		
Ácidos alifáticos	2 – 2,9	1,3 – 2,2
não voláteis		
Ácidos voláteis	0,1	0,1
Carboidratos solúveis	9 – 12,5	6,0 – 11,5
Polissacarídeos insolúveis	46 – 53	34 – 44

Fonte(Belitz; Grosch; Schieberle, 2009)

É possível observar na tabela anterior que o café Arábica contém maior teor de polissacarídeos insolúveis, que são principalmente celulose e hemicelulose, em comparação com o café Robusta. O café Robusta apresenta uma quantidade maior de cafeína em comparação com o café Arábica, assim como o teor de ácidos clorogênicos totais.

Os dois tipos de café possuem diferenças marcantes em alguns componentes, o que contribui para as características distintas de sabor, aroma e efeitos no corpo de cada um. O Café Arábica é frequentemente preferido por seu sabor mais suave e complexo, enquanto o Café Robusta é conhecido por sua robustez e maior teor de cafeína.

Conhecer a composição da borra do café é fundamental para o processamento em uma biorrefinaria, pois permite a otimização dos processos de extração e conversão de seus componentes bioativos em produtos de alto valor. A borra do café contém diversos compostos importantes, como polifenóis, antioxidantes, lipídeos e carboidratos, que podem ser transformados em biocombustíveis, bioplásticos, aditivos alimentares e outros produtos químicos valiosos. Ao entender detalhadamente sua composição, é possível desenvolver métodos mais eficientes e sustentáveis de processamento, maximizar a recuperação de compostos úteis e minimizar resíduos, contribuindo para

a viabilidade econômica e ambiental das biorrefinarias. Além disso, a valorização desses resíduos agroindustriais alinhada aos princípios da economia circular ajuda a reduzir o impacto ambiental e promove a utilização integral dos recursos disponíveis.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 METODOLOGIA PRISMA

O levantamento de informações foi obtido a partir do escopo da dissertação e da realização de uma revisão bibliográfica utilizando a metodologia PRISMA. Os critérios de escolha das técnicas de extração e das reações foram os trabalhos de pesquisa publicados pelo grupo LACTA e também os produtos que seriam obtidos ao final de cada etapa. Com o objetivo de compreender o que foi pesquisado acerca da extração Soxhlet, com fluido supercrítico, fluido pressurizado, utilizando ultrassom e micro-ondas com borra de café ou grãos de café como matéria-prima, e dos métodos de reação citados, que são a pirólise e a hidrotermoliquefação. Além disso, visando elaborar uma proposta de biorrefinaria, era necessário conhecer o que já tinha sido proposto, tanto para a borra de café como para outras biomassas.

Os critérios utilizados nas pesquisas foram as palavras chaves que representam os métodos de extração e de reação, além do intervalo de tempo de publicação dos artigos e das etapas de metodologia e resultados dos artigos, pois, para que os artigos fossem selecionados, o método pesquisado deveria ser mencionado na etapa de metodologia e de resultados, com valores que pudessem ser relacionados com as respectivas condições dos experimentos realizados. Os critérios utilizados para a escolha dos artigos foram as palavras-chave e o período de 2010-2025, em seguida, os artigos foram selecionados pelo título. Se o título continha a maior parte das palavras-chave, era verificado se a técnica de extração/reação estava presente nos tópicos de metodologia e resultados, e se os resultados eram somente da técnica procurada. Para auxiliar na busca, era feita a procura de palavras-chave nos artigos.

Caso a técnica de extração/reação estivesse presente nos tópicos de metodologia e resultados, era feita a leitura integral do artigo e a possível inserção do mesmo na dissertação.

Em seguida, visando sugerir processos de biorrefinarias aplicadas à borra de café, foram aplicadas outras metodologias detalhadas a seguir. A declaração Principais

Itens para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-análises (PRISMA) é utilizada em revisões bibliográficas e tem uma lista de checagem de 27 itens. Essa metodologia descreve uma forma de avaliação dos dados disponíveis nos estudos já realizados, considerando a forma de coleta e análise dos dados de maneira reprodutível (Page et al., 2021). Os 27 itens estão divididos entre as categorias, principalmente, de título, *abstract*, introdução, métodos, resultados, discussão e conclusão.

A escolha do banco de dados é fundamental para garantir a qualidade dos dados coletados, assim como a abrangência deles. Se uma base de dados com poucas publicações for escolhida, não é possível dizer que a aplicação da metodologia percorreu a bibliografia existente de maneira eficiente. Por isso, o banco de dados escolhido foi o Google Acadêmico, pois abrange as publicações que foram feitas em editoras de revistas científicas, por exemplo, Elsevier, Springer, entre outras, assim como monografias, dissertações e teses.

Entre as variáveis de seleção para a aplicação da metodologia PRISMA está também o idioma. Nesta aplicação da metodologia, o idioma escolhido foi o inglês, por abranger maior número de publicações, feitas por pesquisadores de diversos países. A seleção das palavras-chave também é um fator crucial na obtenção de resultados. Nesta aplicação, foram utilizadas a matéria prima de interesse, o método de extração ou reação e, como não foram reportadas na literatura somente extrações com o resíduo, que é a borra de café, mas também com os grãos e as cascas de café, incluíram-se esses tópicos visando uma busca mais completa.

A próxima etapa é a elaboração de diagramas de bloco com as propostas estruturadas após a análise da pesquisa realizada com a metodologia PRISMA. As etapas que serão inseridas podem abranger mais de uma técnica de extração/reação, ou não. A escolha das etapas que serão colocadas nos diagramas são feitas de acordo com os produtos de interesse em cada etapa, sendo este o principal critério de decisão. Os diagramas de bloco permitem a visualização completa do processo, com a saída dos produtos obtidos em cada etapa, além da escolha da ordem do processo, que pode ser modificada visando o aproveitamento de algum composto de valor agregado, por exemplo, a cafeína. A estruturação dos diagramas será feita desta maneira permitindo a análise de cada etapa e identificando qual o melhor arranjo possível, dentre os que forem apresentados.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 MÉTODOS DE EXTRAÇÃO ABORDADOS

Os métodos de extração existentes são muitos e variam em alguns fatores, por exemplo, os mecanismos utilizados e os solventes escolhidos. Outros fatores de avaliação são o nível de complexidade envolvido no processo, além do aparato tecnológico necessário.

4.1.1 Extração convencional (Soxhlet)

Franz von Soxhlet determinou, em 1879, que a duração e a eficácia do processo de extração de lipídeos dependem da granulometria da amostra. No processo de liberação exaustiva, ocorrem três etapas: a entrada do solvente na matriz sólida, a formação de uma micela intracelular e a difusão do extrato na micela externa. O solvente entra na matriz sólida, dissolvendo os compostos desejados e criando uma micela intracelular, ou seja, encapsulando os compostos solúveis. Os compostos dissolvidos no solvente se difundem para fora da matriz sólida e acumulam-se na micela externa. Quando ocorre a virada do ciclo, após o solvente atingir a altura do sifão, esses compostos na micela externa são transportados para o balão volumétrico.

A extração por Soxhlet é o tratamento sucessivo e intermitente de uma amostra que está imersa em um solvente puro, que pode ser n-hexano, éter de petróleo ou éter dietílico. Durante esta extração Soxhlet, diversos mecanismos físicos e químicos interagem para garantir a eficiência do processo de extração. Primeiro, a percolação do solvente vaporizado, que condensa e se infiltra através da amostra sólida, dissolvendo os compostos de interesse. Em seguida, ocorre a difusão, onde os compostos dissolvidos se movem do interior das partículas sólidas para a superfície, sendo coletados pelo solvente. O refluxo contínuo é essencial, onde o solvente saturado retorna ao balão de ebulição, é vaporizado novamente e continua o ciclo de extração (Brum; Arruda; Regitano-d'Arce, 2009). Além disso, o equilíbrio dinâmico é estabelecido entre o solvente e a amostra, assegurando a extração eficaz dos compostos ao longo do tempo. A capilaridade também desempenha um papel importante, aumentando a área de contato entre o solvente e os compostos, facilitando a extração. Esses mecanismos combinados tornam a extração por Soxhlet

uma técnica eficiente e robusta para recuperar componentes valiosos de amostras sólidas.

A extração por Soxhlet é amplamente utilizada devido à sua alta eficiência e precisão na extração de compostos específicos de amostras sólidas, utilizando uma ampla gama de solventes. Esse método contínuo de lavagem com solvente garante a extração completa dos compostos desejados, sendo versátil para diferentes aplicações. No entanto, possui algumas desvantagens, como o tempo prolongado necessário para o processo, que pode variar de 6 a 48 h, e a exposição contínua ao calor, que podem degradar compostos sensíveis à temperatura. Além disso, o método exige grandes quantidades de solvente, o que pode ser custoso e ambientalmente prejudicial. Diante disso, alternativas como as extrações assistida por ultrassom ou utilizando micro-ondas podem ser mais rápidas e sustentáveis, dependendo da necessidade específica da aplicação.

Para quantificar o extrato obtido, é feita a pesagem do balão volumétrico vazio, antes da extração, e após a extração, já com o extrato. A diferença dos dois valores é a quantidade de extrato obtida, que é utilizada para calcular o rendimento da extração, em relação a quantidade de biomassa utilizada na extração. A extração por Soxhlet realizada em laboratório utiliza o extrator Soxhlet em si e um balão volumétrico de fundo chato, além do condensador. Todos esses elementos estão representados na figura a seguir.

FIGURA 3 - ILUSTRAÇÃO DA ESTRUTURA DE UMA EXTRAÇÃO SOXHLET.



Fonte: Mercado Livre.

Na sequência, são apresentadas figuras com a estrutura dos solventes mais utilizados na extração Soxhlet, além de dois compostos disponíveis no extrato, os ácidos linoleico e palmítico.

FIGURA 4 – ESTRUTURA DO ETANOL



Fonte: Nist

FIGURA 5 – ESTRUTURA DO HEXANO



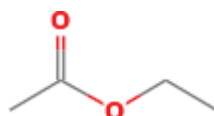
Fonte: Nist

FIGURA 6 – ESTRUTURA DO DICLOROMETANO



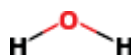
Fonte: Nist

FIGURA 7 – ESTRUTURA DO ACETATO DE ETILA



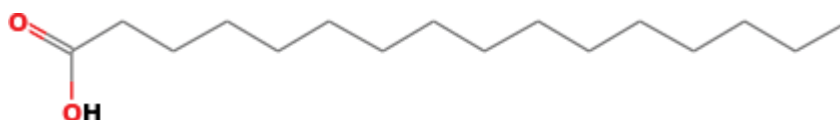
Fonte: Nist

FIGURA 8 – ESTRUTURA DA MOLÉCULA DA ÁGUA



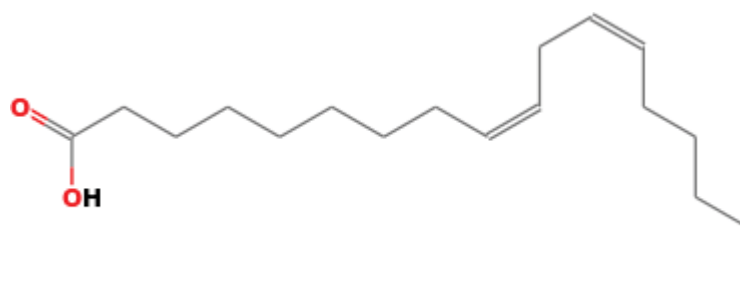
Fonte: Nist

FIGURA 9 – ESTRUTURA DO ÁCIDO PALMÍTICO



Fonte: Nist

FIGURA 10 – ESTRUTURA DO ÁCIDO LINOLEICO



Fonte: Nist

A estrutura dos ácidos linoleico e palmítico apresenta semelhanças que permitem a extração desses compostos da biomassa por solventes de baixa polaridade, resultando em altos rendimentos. Cada solvente utilizado possui uma estrutura que possibilita a recuperação de diversos componentes a partir de um único solvente.

4.1.1.1 Extração soxhlet com a borra de café

Na busca pela literatura, foram utilizadas diversas condições e solventes na extração convencional da borra de café e dos grãos de café Arábica e Robusta. O etanol, metanol, isopropanol, pentano, benzeno, tolueno, n-heptano, n-octano e n-hexano são alguns solventes utilizados. Foram realizadas também extrações por Soxhlet sequenciais com solventes polares e apolares combinados. Esses experimentos foram realizados tanto com o café arábica como com o café robusta.

MANIRAKIZA; COVACI; SCHEPENS, (2001) destacam que a extração por Soxhlet é uma técnica eficaz para a extração de lipídeos. Utilizando borra de café e hidrocarbonetos (pentano, benzeno, tolueno, N-Heptano, N-Octano), os rendimentos variaram de 14% a 26%. Já com álcoois (etanol, metanol, isopropanol), os rendimentos foram de 6% a 21% devido à maior polaridade dos solventes. A taxa de recuperação geral dos compostos desejados é mantida.

EFTHYMIPOULOS et al., (2018) e AL-HAMAMRE et al., (2012) utilizaram solventes apolares (pentano, hexano e tolueno) para quantificar o óleo em base seca, obtendo rendimentos diferentes. Efthymiopoulos *et al.* (2018), ao utilizar borra de café instantâneo, obtiveram maiores rendimentos com pentano, tolueno e etanol, enquanto AL-HAMAMRE et al., (2012), que utilizaram borra de café fornecida por uma cafeteria local, obtiveram rendimentos mais baixos com os mesmos solventes. Essa diferença de rendimentos pode ser justificada pelas diferentes formas de processamento do grão de café, além das espécies de café terem composições ligeiramente diferentes. Também é necessário considerar que a borra de café utilizada nos experimentos pode ser um blend dos cafés Arábica e Robusta.

ABDULLAH; BULENT KOC, (2013) e AHANGARI; SARGOLZAEI, (2013) utilizaram hexano como solvente, sendo que AHANGARI; SARGOLZAEI, (2013) obtiveram um rendimento maior em óleo, mesmo com um experimento conduzido por menos tempo, ambos utilizando misturas de café como matéria-prima.

TSUKUI et al., (2014), BALLESTEROS et al., (2015) e DONG et al., (2017)

utilizaram éter de petróleo como solvente para a extração convencional, obtendo diferentes rendimentos de óleo em base seca e quantidade de açúcares. DONG et al., (2017) realizaram o experimento com grãos de café *Robusta* com duração de 16 h a 18 h, obtendo $6,63 \pm 0,65$ g de óleo/100 g de grão de café, enquanto Tsukui *et al.* (2014) obtiveram $86,0 \pm 2,6$ g de óleo/kg de grão de café, com uma fração de solvente: biomassa de 4:1. BALLESTEROS et al., (2015) obtiveram quase 40% em açúcares utilizando o mesmo solvente na extração Soxhlet. Ou seja, o éter de petróleo é capaz de extrair compostos pertencentes a diferentes classificações químicas, com estruturas distintas.

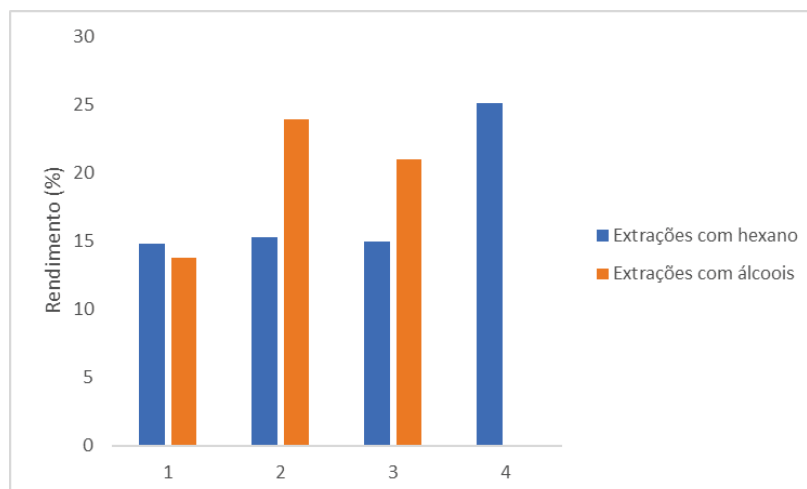
SOMNUK; EAWLEX; PRATEEPCHAIKUL, (2017) realizaram extrações com etanol hidratado, etanol anidro e metanol, obtendo maior rendimento com o etanol anidro devido à ausência de água. LOYAO et al., (2018) utilizaram acetato de etila e n-propanol para extrair lipídeos após 4 h, enquanto outros solventes requereram mais tempo, por exemplo, n-hexano, etanol e isopropanol. MUANGRAT; PONGSIRIKUL, (2019) obtiveram 13,75% de óleo com propanol em 6 h. Lauberts *et al.* (2022) realizaram extrações sequenciais com hexano, acetato de etila, etanol e água, obtendo maiores rendimentos com solventes polares, de óleo e compostos polares. MARX et al., (2022) usaram 250 mL de hexano para extrair 161 g/kg SCG de óleo. (Panpraneecharoen*; Chumanee, 2020) concluíram que 2 h de extração com n-hexano são suficientes para obter rendimentos similares a 6 h. Chale-Chumbo *et al.* (2023) obtiveram 27,11% de óleo em 2 h com metanol.

É possível concluir que as extrações sequenciais, com solventes de diferentes polaridades em cada etapa, geram maiores rendimentos em óleo e que solventes polares também extraem óleo, embora, quando utilizado o hexano, um solvente apolar, os rendimentos sejam maiores.

Le *et al.* (2017) avaliaram a extração de fenólicos totais usando ultrassom, micro-ondas e métodos convencionais, observando que a razão sólido:solvente de 1:10 na extração convencional produziu o maior rendimento (9%).

Após a análise de alguns trabalhos publicados, a variação dos rendimentos encontrados pelos autores Muangrat, Pongsirikol (2019); AL-HAMAMRE et al., (2012); Kondamudi, Mohapatra, Misra (2008); (Efthymiopoulos et al., 2019) está apresentada no gráfico a seguir:

GRÁFICO 1 - COMPARAÇÃO DOS RENDIMENTOS DA EXTRAÇÃO DO ÓLEO DA BORRA DE CAFÉ ENCONTRADOS NA LITERATURA



1: Muangrat, Pongsirikol (2019); 2: Al-hamamre *et al.* (2012); 3: Kondamudi, Mohapatra, Misra (2008); 4: Efthymiopoulos *et al.* (2019)

É possível observar no gráfico anterior que os rendimentos encontrados nas extrações convencionais com o hexano variam de acordo com os tempos de extração e com o tipo de café utilizado na geração da borra de café. Em relação as extrações com os álcoois, o maior rendimento foi alcançado com o uso do etanol e o menor com o uso do propanol. O isopropanol levou à um valor intermediário de rendimento.

4.1.1.2 Quantidade e perfil de ácidos graxos obtido a partir da extração Soxhlet

KRESNA *et al.*, (2024) compararam o perfil de ácidos graxos obtidos após a extração convencional dos cafés arábica e robusta, com os solventes hexano e etanol. A tabela a seguir apresenta os resultados obtidos para o café arábica.

TABELA 6 – PERFIL DE ÁCIDOS GRAXOS EM MAIOR PROPORÇÃO COM EXTRAÇÃO CONVENCIONAL DE BORRA DE CAFÉ ARÁBICA COM SOLVENTE

Ácidos graxos	Café arábica		Café robusta	
	Solvente: Etanol	Solvente: Hexano	Solvente: Etanol	Solvente: Hexano
Ácido palmítico	20,25%	9,41%	21,29%	16,54%
Ácido esteárico	3,24%	4,7%	2,91%	6,28%
Ácido linoleico	-	5,37%	10,3%	16,87%

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

Observando a tabela anterior, é possível verificar que foi extraída maior quantidade de ácidos graxos do café Robusta, com ambos os solventes. O teor de ácido

linoleico extraído com o etanol não foi informado pelos autores. Já as diferenças de extração do ácido palmítico com o etanol e com o hexano são justificadas pelo fato de que o ácido palmítico é saturado, portanto, é mais resistente a altas temperaturas, dificultando a extração em solventes com menor temperatura de ebulição. Lauberts *et al.* (2022) observaram que o perfil de ácidos graxos, com ênfase no ácido linoleico e palmítico, é similar ao de outros estudos. Jin, Zhang e Ma (2018) utilizaram extração convencional com borra de café, que tinha 62% de umidade sem realizar a secagem, e n-heptano como solvente, observando que o perfil de ácidos graxos, apesar das variações, é semelhante ao obtido com hexano em outros estudos.

Marx *et al.* (2020) realizaram extrações Soxhlet com hexano, utilizando 250 mL de solvente e 60 g de borra de café, e obtiveram um teor de ácidos graxos de 51,1% do óleo, sendo 30% ácidos graxos insaturados e 21,1% ácidos graxos saturados. Além disso, Al-Hamamre *et al.* (2022) avaliaram a quantidade de ácidos graxos livres em óleos extraídos convencionalmente da borra de café com sete solventes. A porcentagem de ácidos graxos livres variou de acordo com os solventes: acetona, pentano, hexano, etanol, tolueno, clorofórmio e isopropanol, e concluiu-se que a polaridade não é um fator determinante para obter óleos com altos teores de ácidos graxos livres, mas que fatores como o tempo de extração podem ter mais influência e que a polaridade pode influenciar a presença de determinados compostos no extrato final, além do rendimento.

A tabela a seguir compara o perfil de ácidos graxos de publicações que utilizaram o n-hexano como solvente e a borra de café como matéria prima.

TABELA 7 – COMPARAÇÃO DE PERFIS DE ÁCIDOS GRAXOS OBTIDOS COM HEXANO

Ácidos graxos	Hanif <i>et al.</i> (2019)	Nasti <i>et al.</i> (2021)	Panpraneecharoen e Chumanee (2020)
Ácido mirístico (C14:0) (% m/m)	-	-	0,07 ± 0,01
Ácido palmítico (C16:0) (% m/m)	11,03	29,0	33,75 ± 0,15
Ácido palmitoleico (C16:1) (% m/m)	-	-	-
Ácido esteárico (C18:0) (% m/m)	12,99	6,8	7,26 ± 0,32
Ácido oleico (C18:1) (% m/m)	-	9,2	7,72 ± 0,13
Ácido linoleico (C18:2) (% m/m)	-	32,0	44,64 ± 0,37
Ácido linolênico (C18:3) (% m/m)	-	-	2,16 ± 0,01
Ácido araquídico (C20:0) (% m/m)	1,99	10,6	3,04 ± 0,08

HANIF *et al.*, (2019) utilizaram borra de café proveniente de grãos de café Robusta, Nast *et al* (2021) utilizaram casca de café e Panpraneecharoen e Chumanee (2020) utilizaram borra de café oriunda de grãos de café Arábica. HANIF *et al.*, (2019) e

NASTI et al., (2021) apresentam grandes diferenças na quantificação do ácido palmítico e esteárico, enquanto NASTI et al., (2021) e Panpraneecharoen e Chumanee (2020) mostram menores diferenças numéricas e perfis de ácidos graxos similares. Ambos os estudos destacam o ácido linoleico e palmítico como os principais ácidos graxos no óleo da borra de café, com porcentagens semelhantes de ácidos graxos saturados e insaturados, e uma porcentagem de ácidos graxos livres de $7,52 \pm 1,23$ (Panpraneecharoen e Chumanee, 2020).

Haile (2014) realizou extrações convencionais com borra de café usando hexano, éter e uma mistura de isopropanol e hexano, encontrando ácidos linoleico (37,3%) e palmítico (35,8%) como os principais componentes dos extratos. A partir dos autores mencionados, verifica-se que os ácidos linoleico e palmítico compõem grande quantidade dos ácidos graxos presentes na borra de café, que são extraídos em quantidades diferentes de acordo com o solvente utilizado.

4.1.1.3 Composição elementar do óleo extraído por Soxhlet

Al-Hamamre *et al.* (2012) fizeram a análise da composição elementar dos óleos de borra de café extraídos com pentano, hexano, tolueno, clorofórmio, acetona, isopropanol e etanol. Referente à porcentagem de carbono no óleo, os solventes que produziram óleos com maior porcentagem de carbono são, respectivamente, a acetona, o etanol, o pentano, o hexano, o isopropanol e o clorofórmio. Referente à porcentagem de hidrogênio no óleo, os solventes que produziram óleos com maior porcentagem de hidrogênio são, respectivamente, tolueno, acetona, etanol, pentano, hexano, isopropanol e clorofórmio. O nitrogênio e o oxigênio são detectados em menores quantidades, enquanto o enxofre não foi detectado em nenhum óleo.

A tabela a seguir apresenta os resultados obtidos.

TABELA 8 – COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DE ÓLEOS OBTIDOS COM DIFERENTES SOLVENTES

Solvente	C (% m/m)	H (% m/m)	N (% m/m)	S (% m/m)	O (% m/m)
Pentano	79,83	11,23	0,21	0	8,73
Hexano	79,07	11,07	0,23	0	9,63
Tolueno	78,63	11,91	0,45	0	9,01
Clorofórmio	76,16	10,69	0,15	0	13,0
Acetona	81,17	11,45	0,13	0	7,25
Isopropanol	77,52	10,90	0,19	0	11,39
Etanol	80,49	11,33	0,23	0	7,95

Fonte: AL-HAMAMRE *et al.* (2012)

4.1.1.4 Capacidade calorífica do óleo de borra de café extraído por Soxhlet

A diferença entre HHV (*Higher Heating Value*) e LHV (*Lower Heating Value*) está relacionada à quantidade de energia disponível em um combustível quando ele é completamente queimado. O HHV, também conhecido como poder calorífico superior, é a quantidade total de energia liberada pela combustão completa de uma unidade de combustível, incluindo a energia contida no vapor d'água formado durante a combustão, considerando a condensação do vapor e a recuperação do calor latente de vaporização. Já o LHV, ou poder calorífico inferior, é a quantidade de energia liberada pela combustão completa de uma unidade de combustível, excluindo a energia contida no vapor d'água formado, ou seja, não considera o calor recuperado da condensação do vapor d'água. Em resumo, o HHV é sempre maior que o LHV porque inclui o calor adicional recuperado pela condensação do vapor d'água, enquanto o LHV não.

A capacidade calorífica varia de acordo com o solvente utilizado na extração do óleo da borra de café. De acordo com Al-Hamamre *et al.* (2012), os valores de capacidade calorífica superior e inferior foram mensurados para óleos extraídos da borra de café com solventes polares e apolares. Os resultados apresentados por Al-Hamamre *et al.* (2012) são reproduzidos na Tabela a seguir. O óleo extraído com pentano e tolueno é mais adequado para geração de energia devido à maior capacidade calorífica, enquanto a acetona produziu óleo com maior capacidade calorífica entre os analisados (AL-HAMAMRE *et al.*, 2012). Acetona e isopropanol possuem diferenças químicas que justificam a variação na capacidade calorífica dos óleos extraídos. O óleo extraído com etanol tem capacidade calorífica semelhante ao da acetona, e o do isopropanol é semelhante ao do clorofórmio. Marx *et al.* (2020) obtiveram com hexano uma capacidade calorífica superior de 38,7 MJ/kg, maior do que os resultados de Al-Hamamre *et al.* (2012).

TABELA 9 – COMPARAÇÃO DA CAPACIDADE CALORÍFICA DE ÓLEOS OBTIDOS COM DIFERENTES SOLVENTES.

Solventes	Capacidade calorífica superior (kJ/kg)	Capacidade calorífica inferior (kJ/kg)
Pentano	39.007	36.694
Hexano	38.220	35.940
Tolueno	38.649	36.122
Clorofórmio	35.859	33.656
Acetona	38.872	36.513
Isopropanol	36.901	34.656

Etanol

38.836

36.502

 Fonte: Adaptado de AL-HAMAMRE *et al.* (2012)

As diferentes capacidades caloríficas são justificadas , porque os diferentes solventes geram óleos com concentrações maiores ou menores de impurezas, além de que a presença de ácidos graxos saturados ou insaturados modifica a densidade energética do óleo.

4.1.1.5 Quantidade de fenólicos totais obtidos com a extração soxhlet

Chale-Chumbo *et al.* (2023) verificaram que o etanol extraiu a maior quantidade de compostos fenólicos em 120 min, com 180 mg GAE/100 g de borra de café seca. Lauberts *et al.* (2022) observaram que, em extrações únicas, o etanol 96% resultou em maior quantidade de fenólicos. No entanto, em extrações sequenciais, o etanol 60% foi mais eficaz devido à polaridade dos compostos extraídos.

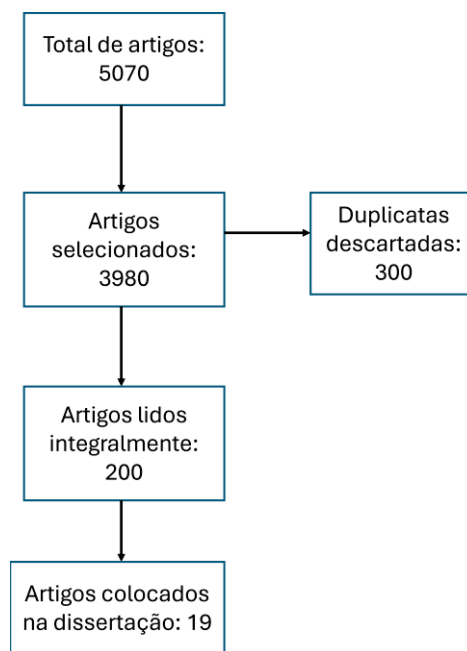
É importante perceber as tendências de comportamento de sólido/solvente visando a economia de solvente, além de compreender quais outros fatores internos ou externos auxiliam na extração de compostos fenólicos

4.1.1.6 Resumo da pesquisa feita com a metodologia PRISMA

O uso da metodologia PRISMA para a extração convencional com a borra de café permitiu a filtragem dos artigos para a análise aprofundada de 200 deles. Aplicando a metodologia PRISMA no Google Acadêmico com as palavras chave “*spent coffee grounds*” “*soxhlet*” “*coffee beans*”, foram encontrados 5070 resultados, sem que fosse aplicado nenhum filtro de pesquisa.

A figura a seguir apresenta o resumo dos artigos pesquisados com a metodologia PRISMA:

FIGURA 11 – RESUMO QUANTITATIVO DA PESQUISA SOXHLET.



Fonte: A autora (2025)

A figura anterior indica que, após uma grande quantidade de resultados encontrados, foi necessário selecionar os artigos que incluíssem a extração convencional como uma etapa da metodologia e que os resultados fossem atribuídos diretamente aos experimentos de extração convencional, e não apenas uma etapa para outros processos executados. A Tabela 21 apresenta os resultados completos sobre a extração Soxhlet obtidos a partir da pesquisa realizada e está disponibilizada no Apêndice.

A extração convencional permite recuperar compostos fenólicos e óleos da borra de café. Efthymiopoulos *et al.* (2018) usaram extração acelerada com solvente e descobriram que o aumento da temperatura não favoreceu a extração de óleo com solventes não polares, mas o etanol teve melhor desempenho. Solventes polares e apolares podem ser usados na extração convencional, resultando em diferentes rendimentos de óleo.

BRAVO *et al.*, (2013) e Al-Hamamre *et al.*(2012) avaliaram a capacidade antioxidante com diferentes solventes. De acordo com Al-Hamamre *et al.* (2012), o isopropanol e o tolueno geram extratos com maior capacidade antioxidante. Bravo *et al.* (2013) observaram que, após a remoção do óleo, o extrato obtido possui alta capacidade antioxidante, assim como os extratos obtidos a partir da água neutra (pH 7,0). CALIXTO *et al.*, (2011) fizeram um processo parecido com Al-Hamamre *et al.* (2012), convertendo os ácidos graxos livres em ésteres metílicos de ácidos graxos.

ACEVEDO et al., (2013) extraíram diterpenos, por exemplo, cafestol e óleo, de diferentes maneiras. A extração Soxhlet obteve a maior quantidade de óleo, quase 30%, além de o óleo extraído ser uma fonte de compostos polifenólicos e 50% de ácidos graxos poli-insaturados. O foco de Ballesteros *et al.* (2015) foi a extração de polissacarídeos, determinando as propriedades antioxidantes deles, sendo que essa hipótese foi confirmada após as análises realizadas.

HAILE; ASFAW; ASFAW, (2013) e (Caetano; SILVA; MATA, 2012) utilizaram borra de café para produzir biodiesel, ambos usando hexano como solvente comum, mas Caetano *et al.* (2012) usaram uma variedade maior de solventes. Haile, Asfaw e Asfaw (2013) também caracterizaram o resíduo sólido. PHIMSEN et al., (2016), KWON; YI; JEON, (2013) e Caetano *et al.* (2012) reportaram a produção biocombustíveis da borra de café: Caetano *et al.* (2012) reportaram a produção de biodiesel, Kwon *et al.* (2013) reportaram a produção de bioetanol e biodiesel e Phimsen *et al.* (2016) reportaram a produção de combustível bio-hidrogenado.

Os trabalhos abordados na tabela disponibilizada no apêndice indicam que o mais comum é a obtenção de óleo a partir da extração convencional, porém, incorporando complexidade ao processo, é possível extrair e identificar outros compostos de valor agregado, além de mensurar outras propriedades dos produtos obtidos, por exemplo, a capacidade antioxidante. Atualmente, um número cada vez maior de pesquisas vem buscando realizar análises mais complexas e não somente a caracterização do óleo.

A caracterização do óleo é fundamental para determinadas aplicações, por exemplo, a produção de biodiesel, no qual a acidez do óleo utilizado no processo deve ser limitada. O número cada vez maior de solventes utilizados indica que podem ser obtidos óleos ricos em outros compostos que não somente os ácidos graxos presentes na biomassa. Verifica-se também que os tempos de extração e as quantidades de solventes utilizadas nessa forma de extração não são adequados para a adaptação desse processo a nível industrial, considerando também que não são aplicados somente solventes ambientalmente seguros.

4.1.2 Extração com fluidos supercríticos

Um fluido é caracterizado como supercrítico quando está acima da temperatura e pressão críticas, por isso, não pode ser liquefeito com o aumento de pressão e possui

características tanto de vapor quanto de líquido. A seletividade de um fluido supercrítico pode ser modificada com o uso de outros solventes, ou modificadores, assim como outro efeito é o aumento da solubilidade de compostos polares de interesse (Queiroz; Collins; Jardim, 2001). Os modificadores (ou cossolventes) são aditivos que são adicionados ao fluido supercrítico para melhorar a eficiência do processo de extração. Eles podem aumentar a solubilidade dos compostos de interesse, reduzir a interação entre o composto e a matriz, e melhorar a taxa de difusão do solvente na matriz sólida.

A seleção dos modificadores é feita visando aumentar as interações moleculares do solvente com os compostos de interesse. O metanol e o etanol são os solventes mais utilizados para esse fim, devido a capacidade de realizar interações do tipo dipolo-dipolo e ligações de hidrogênio com moléculas que contém grupos funcionais polares (Azevedo et al., 2008). O metanol é um cossolvente comum, mas é tóxico, enquanto o etanol é menos tóxico e vem sendo cada vez mais utilizado em extrações de compostos bioativos. O etanol, sendo menos polar que o metanol, pode aumentar a solubilidade de compostos de maior polaridade quando usado em combinação com CO₂ supercrítico, melhorando a eficiência da extração sem comprometer a segurança do processo (SANTOS, 2011).

4.1.2.1 Extração com fluido supercrítico aplicada à borra de café.

Considerando o comportamento do CO₂ em estado supercrítico, quanto maior o aumento de pressão, maior a solubilidade dos solutos, principalmente os que são apolares. Isso se deve ao fato de que o CO₂, quando em altas pressões e temperaturas, mais especificamente a partir de 7,38 MPa e 304,1 K, possui um comportamento tanto de gás como de líquido, estando no estado supercrítico e tornando-se compressível e com aumento de densidade. De acordo com PIRES, (2021), o CO₂ é um solvente apolar com um grande momento quadrupolo, bem como uma ligação polar C=O. Essa ligação polar confere ao CO₂ supercrítico a capacidade de solubilizar vários compostos que contenham grupos hidroxilo, carbonilo ou flúor na sua composição, além de ser miscível com acetona, metanol e isopropanol, entre outros solventes. A presença de um cossolvente pode modificar os rendimentos originalmente obtidos somente com o CO₂, pois melhora a capacidade de extração dos compostos polares, caso o cossolvente seja polar.

Através da análise dos artigos selecionados após a aplicação da metodologia

PRISMA, foi possível verificar que, quando o CO₂ supercrítico é utilizado como solvente, a pressão é um fator determinante. A pressão está diretamente relacionada com a densidade do gás carbônico influenciando na solubilidade dos solutos no gás carbônico. O poder de solvatação, a baixa viscosidade e a difusividade agem na entrada do solvente na biomassa sólida, considerando também o tamanho médio de partícula da biomassa, que pode aumentar a área de contato do sólido e favorecer a extração de compostos de interesse.

Muangrat *et al.* (2019) utilizaram borra de café Arábica para extração de óleo com fluidos supercríticos. Em condições de 20 MPa e 50 °C por 2 h, o rendimento foi $12,11 \pm 1,33\%$. As maiores quantidades de óleo e ácidos graxos livres ($3,21\% \pm 0,09$) foram obtidas após 3 h a 50 °C e 22,5 MPa, com rendimento de $13,65\% \pm 0,08$. A 60 °C, o rendimento foi $12,36 \pm 0,15\%$.

ANDRADE *et al.*, (2012) avaliaram a extração de óleo de borra e casca de café utilizando CO₂ supercrítico. As melhores condições para a casca do café foram 50 °C e 30 MPa, resultando em $1,97 \pm 0,56\%$ de rendimento, enquanto a pior foi 60 °C e 10 MPa. Para a borra de café, as melhores condições foram 40 °C e 30 MPa, com rendimento de $10,5 \pm 0,2\%$. A pressão foi um fator determinante para aumentar o rendimento, enquanto o aumento da temperatura não favoreceu a extração.

Observa-se que a pressão tem um papel importante nas extrações com CO₂ supercrítico e a temperatura exerce menos influência, pois os maiores rendimentos foram obtidos em maiores pressões e temperaturas não tão altas.

4.1.2.2 Perfil de ácidos graxos obtido a partir da extração com fluidos supercríticos

Referente ao perfil de ácidos graxos, Muangrat *et al.* (2019) avaliaram a porcentagem dos principais ácidos graxos em óleos obtidos com três diferentes condições de processo: 40 °C/17,5 MPa/2 h, 60 °C/20 MPa/3 h e 50 °C/20 MPa/2 h. É possível verificar que o efeito de três variáveis distintas foi investigado ao longo dos experimentos, resultando em diferentes perfis de ácidos graxos. A tabela a seguir apresenta os resultados para os ácidos graxos mais representativos.

TABELA 10 – PERFIL DE ÁCIDOS GRAXOS DE BORRA DE CAFÉ TIPO ARÁBICA

g de ácidos graxos/100g de borra de café	40 °C/ 17,5 MPa/2h	60°C/20 MPa/ 3h	50°C / 20 MPa/ 2h
Ácido palmítico	41,83 ± 2,12	36,67 ± 0,21	32,98 ± 0,81
Ácido linoleico	34,99 ± 2,31	40,08 ± 0,27	42,45 ± 0,12
Ácido oleico	7,75 ± 0,52	8,30 ± 0,14	7,50 ± 0,04
Total de ácidos graxos saturados	54,54 ± 3,27	49,27 ± 0,07	48,00 ± 0,29

Fonte: Muangrat *et al.* (2019)

A tabela apresentada anteriormente destaca a variação no teor de ácidos graxos na borra de café sob diferentes condições de extração. O ácido palmítico atinge seu maior teor a 40 °C/17,5 MPa por 2 h (41,83 ± 2,12 g/100 g), mas diminui com temperaturas e pressões mais altas. Já o ácido linoleico aumenta de 34,99 ± 2,31 g/100 g a 40 °C para 42,45 ± 0,12 g/100 g a 50 °C, indicando melhor extração em temperaturas mais altas. O ácido oleico permanece estável entre 7,50 ± 0,04 g/100 g e 8,30 ± 0,14 g/100 g, independentemente das condições. Temperaturas mais altas e maior pressão favorecem a extração de ácidos graxos insaturados em detrimento dos saturados, o que é essencial para otimizar processos de extração de ácidos graxos específicos.

4.1.2.3 Adição de cossolventes

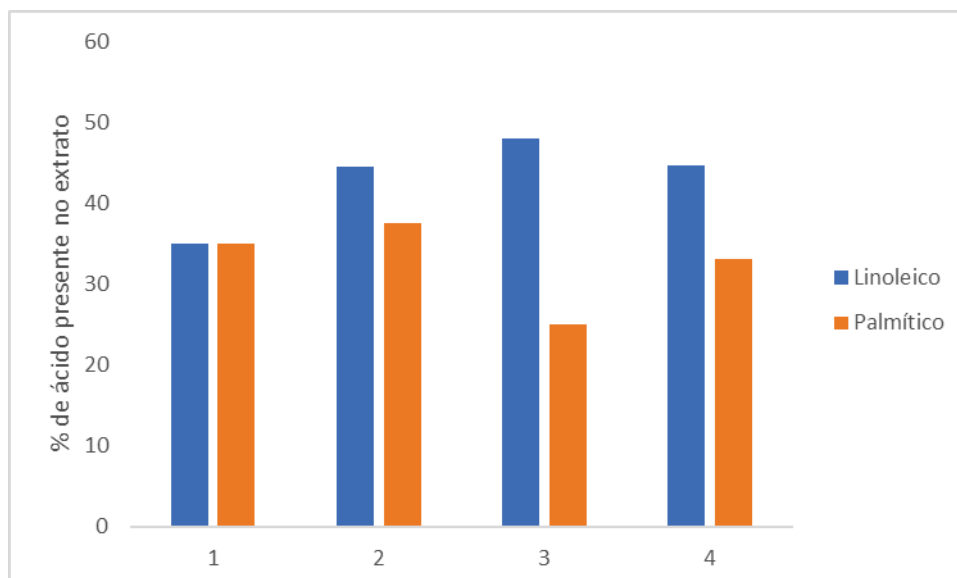
Conforme reportado por (Martins; Lopes; Andrade, 2013), a adição de um cossolvente polar aumenta a densidade ao redor das moléculas, especialmente as que contém o soluto, porque preenche os espaços intermoleculares. Por consequência, interações físico-químicas específicas entre o cossolvente e o soluto, por exemplo, ligações de hidrogênio se formam, e há a melhora da solubilidade dos lipídeos no solvente. Para que o efeito desejado ocorra, a mistura de solvente e cossolvente deve estar no estado supercrítico e ser completamente miscível nas condições da extração. A solubilidade pode aumentar de maneira seletiva, porém, isso não ocorre com o aumento da densidade do fluido supercrítico.

Andrade *et al.* (2012) avaliaram a extração de óleo de cascas de café e borra de café usando CO₂ supercrítico com etanol como cossolvente. Para as cascas de café, com 4% e 8% de cossolvente a 20 MPa e 50 °C, os rendimentos foram 2,1 ± 0,7% e 2,2 ± 0,2%, respectivamente. Para as cascas de café, verifica-se, por meio dos

rendimentos, que o uso de mais cossolvente não é justificável. Com a borra de café, usando 8% e 15% de cossolvente a 10 MPa e 60 °C, os rendimentos foram $6,3 \pm 0,5\%$ e $14 \pm 2\%$, respectivamente, mostrando um aumento expressivo ao quase dobrara porcentagem de cossolvente.

Vale ressaltar que, em todos os perfis de ácidos graxos que foram analisados a partir das extrações com borra de café, os compostos que foram encontrados em maior quantidade foram os ácidos linoleico e palmítico. As quantidades de cada um que foram encontradas variam entre uma publicação e outra. No gráfico a seguir, serão apresentados os dados publicados por COUTO et al., (2009), DE MELO et al., (2014), AKGÜN et al., (2014) e RIBEIRO et al., (2013) sobre o perfil de ácidos graxos, mais especificamente sobre os valores encontrados de ácidos linoleico e palmítico.

GRÁFICO 2 - COMPARAÇÃO DOS VALORES ENCONTRADOS NA LITERATURA DOS ÁCIDOS LINOLEICO E PALMÍTICO NO EXTRATO OBTIDO EM EXTRAÇÕES COM FLUIDO SUPERCRÍTICO.



1: Couto *et al.* (2009); 2: Melo *et al.* (2014) ; 3: Akgun *et al.* (2014) ; 4: Ribeiro *et al.* (2014)

As maiores frações de ácido linoleico são obtidas em extrações com fluido supercrítico que tem no mínimo 60 min de duração e pressões entre 19 MPa e 40 MPa. O ácido palmítico só não está em menor quantidade em comparação com o palmítico no experimento realizado por Couto *et al.* (2009), que teve como condições de processo: 3 h de duração, 15 a 30 MPa e temperaturas entre 40 e 60 °C.

4.1.2.4 Quantidade de fenólicos totais extraída com fluido supercrítico

Andrade *et al.* (2012) mensuraram a quantidade de fenólicos totais nos extratos da casca de café e borra de café usando CO₂ supercrítico. Para a casca de café, extratos foram obtidos a 10 MPa e 40 °C, 50 °C e 60 °C, bem como a 20 MPa e 30 MPa nas mesmas temperaturas. A condição de 20 MPa e 50 °C foi repetida com 4% e 8% de etanol como cossolvente. A tabela a seguir apresenta os resultados obtidos para a casca de café e a borra de café.

TABELA 11 – QUANTIDADES DE FENÓLICOS TOTAIS EXTRAÍDAS EM DIFERENTES CONDIÇÕES.

Condição do ensaio	Fenólicos totais (g CAE/ g extrato) para a casca de café	Fenólicos totais (g CAE/ g extrato) para a borra de café
10 MPa/313,15 K	23 ± 2,0	46,1 ± 3,5
10 MPa/323,15 K	16,1 ± 0,5	56,7 ± 2,3
10 MPa/333,15 K	20,6 ± 0,8	30,9 ± 0,8
20 MPa/313,15 K	20,6 ± 0,8	38,6 ± 5,6
20 MPa/323,15 K	20,9 ± 0,9	24,1 ± 0,8
20 MPa/333,15 K	19,8 ± 0,1	42,1 ± 13,6
30 MPa/313,15 K	21,5 ± 0,8	35,7 ± 1,9
30 MPa/323,15 K	28,1 ± 1,3	36,1 ± 0,8
30 MPa/323,15 K	17,2 ± 0,8	37,2 ± 1,9
20 MPa/323,15 K com 4% de etanol	26 ± 2,0	57 ± 3,0
20 MPa/323,15 K com 8% de etanol	36 ± 1,0	42 ± 2,0

Fonte: Andrade *et al.* (2012)

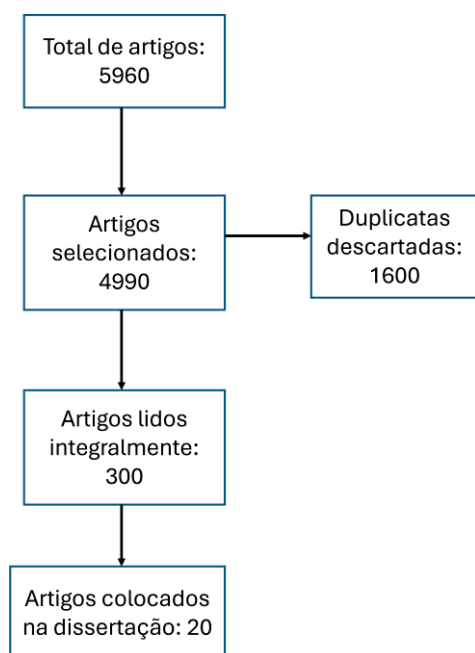
O uso de cossolventes aumenta a quantidade de compostos fenólicos obtidos a partir das matérias-primas, combinando as propriedades apolares do CO₂ supercrítico com as polares do etanol, permitindo que mais compostos sejam extraídos. Quando apenas o CO₂ supercrítico é utilizado, a pressão é crucial: a maior quantidade de compostos fenólicos na borra de café ocorre a 100 bar e 50 °C ou 40 °C, enquanto na casca de café ocorre a 300 bar e 50 °C.

4.1.2.5 Resumo dos resultados da Metodologia PRISMA

Na busca utilizando a metodologia PRISMA com as palavras chave “*spent coffee grounds*” “*supercritical fluid*” “*coffee beans*”, foram encontrados 5960 resultados no Google Acadêmico. A partir de uma visão geral, é possível afirmar que o CO₂ é um dos fluidos mais utilizados nesse tipo de extração, apesar de não ser a única opção disponível. As variáveis que podem ser combinadas são a pressão, a temperatura, o tempo de extração e a razão de CO₂ e sólido, visando aumentar o rendimento obtido.

A figura a seguir apresenta um resumo quantitativo da pesquisa com a metodologia PRISMA sobre a extração com fluidos supercríticos:

FIGURA 12 – RESULTADOS QUANTITATIVOS DA PESQUISA SOBRE A EXTRAÇÃO SUPERCRÍTICA



Fonte: A autora (2025)

A figura anterior permite verificar que, após o descarte dos artigos publicados, a quantidade de publicações lidas e selecionadas, os critérios de seleção aplicados foram capazes de filtrar grande parte dos artigos encontrados. Os artigos lidos integralmente passaram pelos seguintes critérios: que a extração supercrítica fosse citada tanto na seção de metodologia como na de resultados e que os resultados não fossem associados a nenhuma outra forma de processamento do extrato. A Tabela 22 apresenta os resultados completos obtidos a partir da pesquisa realizada e está disponibilizada no Apêndice.

BARBOSA et al., (2014) e Acevedo *et al.* (2013) buscaram obter óleos ricos em diterpenos. Barbosa et al. (2014) encontraram a condição ótima a 19 MPa e 55 °C, com 5% de etanol como co-solvente, enquanto Acevedo *et al.* (2013) obteve melhores rendimentos com saponificação. DE OLIVEIRA et al., (2014) quantificaram os diterpenos e identificaram que a pressão influencia na quantidade de fenólicos totais extraídos, mas não afeta a quantidade de diterpenos, que foi maior com extração por fluido supercrítico.

(Hurtado-Benavides; Dorado; Sánchez-Camargo, 2016) avaliaram a extração de óleo de grãos de café torrado, identificando que 33 MPa e 36 °C são condições ótimas,

com maior presença de ácidos linoleico e palmítico. Ahangari e Sargolzaei (2012) compararam óleos extraídos por diferentes técnicas e constataram que não há diferenças significativas em termos de perfil de ácidos graxos entre extração com fluido supercrítico e Soxhlet, quando os solventes possuem polaridades semelhantes.

A fração lipídica da borra de café pode ser valorizada em produtos para cuidados com a pele. Ribeiro *et al.* (2013) não só extraíram a fração lipídica, mas também produziram uma emulsão, comprovando seus benefícios e aprovação em cosméticos. MARTO *et al.*, (2016) utilizaram essa fração na produção de protetor solar, empregando emulsificação a frio com dois estabilizadores e caracterizando propriedades mecânicas, reológicas e de adesão à pele.

Cruz *et al.* (2014) e Ahangari e Sargolzaei (2012) obtiveram teores semelhantes de óleo utilizando CO₂ supercrítico. As condições ótimas dependem de maior tempo de extração, temperaturas não tão altas e pressões mais altas. Andrade *et al.* (2012) obteve 9% de óleo a 20 MPa e 11% a 30 MPa sem cossolventes. Com 10% de etanol a 40 MPa, Bitencourt *et al.* (2020) obteve 25% de óleo. Georgieva *et al.* (2018) observou que temperaturas mais altas reduzem o rendimento, obtendo apenas 12% de óleo com as mesmas condições de BITENCOURT *et al.*, (2020).

Referente a extração de diversos compostos de maneira sequencial, Akgun *et al.* (2014) e Bitencourt *et al.* (2020) extraíram óleo da borra de café, porém, Bitencourt *et al.* (2020) deu foco aos fenólicos presentes no óleo. A extração em dois passos é considerada eficiente na obtenção de compostos fenólicos. Como é possível analisar diferentes matérias primas, MANNA; BUGNONE; BANCHERO, (2015) extraíram triglicerídeos e polifenóis de diferentes biomassas, visando a valorização dos resíduos alimentares.

A solubilidade dos solutos no solvente é determinante para um bom rendimento de extração. Como, quando na utilização de fluidos supercríticos, o CO₂ é uma escolha comumente realizada, CORNELIO-SANTIAGO *et al.*, (2017) tinham como objetivo avaliar a solubilidade do óleo de café verde em CO₂ supercrítico. A solubilidade dependeu de fatores como pressão e temperatura, sendo que, em condições isobáricas, o aumento da temperatura é favorável à solubilidade do óleo.

Melo *et al.* (2014) realizaram uma análise aprofundada da extração com fluido supercrítico em um contexto de biorrefinaria. Provou que o processo é viável técnica e

economicamente com extrações de 2 h aos 30 MPa e 50 °C. A solubilidade e a difusão intraparticular, além dos coeficientes de transferência de massa, são fatores que podem influenciar muito o processo.

Em relação aos trabalhos apresentados na tabela disponibilizada no apêndice, alguns se destacaram por mostrar possíveis aplicações aos produtos gerados a partir da extração com fluido supercrítico. Os artigos publicados mais recentemente usam o etanol com mais frequência, por ser um cossolvente que facilita a extração dos solutos, além de ser considerado um solvente verde, ou seja, menos prejudicial ao meio ambiente. Essa técnica de extração é mais viável para um *scale-up* em relação à extração convencional, porém, as altas pressões utilizadas exigiriam equipamentos com espessuras consideráveis, além de bombas para injeção do CO₂ pressurizado e compressor para pressurizar o CO₂ expandido, o que acarretaria em altos custos de capital e de produção.

4.1.3 Extração Assistida por Ultrassom

O ultrassom é uma técnica que utiliza irradiação acima de 20 kHz até 100 kHz visando extrair compostos de alto valor agregado)(*Bondam et al., 2022*). Nesse método, as ondas mecânicas se propagam através do meio em ciclos de compressão e rarefação, promovendo a cavitação. Esse fenômeno acarreta o aumento da temperatura e da pressão no meio, gerando os microjatos que são responsáveis pela ruptura das partículas sólidas. As altas frequências favorecem a ruptura da parede celular das moléculas, facilitando a extração dos solutos (Pingret; Fabiano-Tixier; Chemat, 2013)(*FERREIRA et al., 2020*). Alguns parâmetros determinantes para o processo são as frequências utilizadas, o solvente combinado com as frequências e o tempo de tratamento.

Uma explicação mais detalhada sobre o fenômeno da cavitação é apresentada por *GHAFOOR et al., (2014)*: a sonicação produz a cavitação, que é a formação de bolhas que colapsam de forma explosiva, gerando uma alta pressão localizada e elevação da temperatura naquele local. As implosões assimétricas das bolhas geradas através da cavitação, na interface sólido-líquido, geram microjatos. Isso ocorre e, por consequência, melhora a transferência de massa. De acordo com (*Cheeke, 2012*), a cavitação costuma ocorrer em altas frequências na faixa de 20 a 1000 kHz.

4.1.3.1 Extração Assistida por Ultrassom aplicada à borra de café

Utilizar esse tipo de extração permite alterar os intervalos das seguintes variáveis: potência do ultrassom, frequência, tempo de extração e a presença ou não de um cossolvente. Zhang *et al.* (2021) realizaram a extração assistida por ultrassom aplicada à borra de café, utilizando 1 g de matéria prima e avaliando o efeito das variáveis apresentadas na tabela a seguir:

TABELA 12 – CONDIÇÕES UTILIZADAS POR ZHANG *ET AL.* (2021)

Variável	Valor
Potência (W)	156,195 e 234
Temperatura (°C)	55,65 e 75
Tempo (min)	15;22,5 e 30
Frequência (kHz)	80

Fonte: Zhang *et al.* (2021)

Visando extrair polissacarídeos, as condições ideais são de 60 °C e 195 W. Já com o objetivo de extrair os polifenóis, a potência de 195 W também é recomendada.

GOH *et al.*, (2020) aplicaram a mesma metodologia, variando tempos de extração e a razão sólido/líquido, e concluíram que a amplitude ultrassônica acima de 30%, com hexano como solvente e 30 min de extração, resulta no rendimento ótimo. (Yoo *et al.*, 2018) observaram que a extração assistida por ultrassom com solventes eutéticos aumenta a quantidade de polifenóis e ácidos clorogênicos extraídos. Eles usaram 50 mg de borra de café e 0,85 mL de solvente, com extração de 45 min. Cubas *et al.* (2020) utilizaram 5 g de borra de café seca e realizaram extração assistida por ultrassom por 10 min a 40 kHz, observando porcentagens similares de ácido palmítico (40%) e linoleico (38%).

Abdullah e Koc (2013) aplicaram um pré-tratamento com ultrassom e extração com hexano, obtendo rendimento quase total de óleo com 150 mL de hexano em 30 min a 300 W. Andrade *et al.* (2012) utilizaram ultrassom a 55 kHz e 120 W para extrair óleo de borra de café, usando 7 g de borra e 210 mL de solvente (hexano, diclorometano, acetato de etila ou etanol) em cada ensaio, com os rendimentos variando conforme o solvente utilizado. Os rendimentos obtidos estão apresentados na tabela a seguir.

O solvente que produziu maior rendimento em porcentagem de óleo foi o etanol, tanto para a casca de café como para a borra. Os solventes hexano, diclorometano e

acetato de etila produziram quantidades bem semelhantes de óleo na extração com a borra de café.

TABELA 13 – COMPARAÇÃO DE RENDIMENTOS GLOBAIS DE EXTRAÇÃO COM A CASCA DE CAFÉ E COM A BORRA DE CAFÉ.

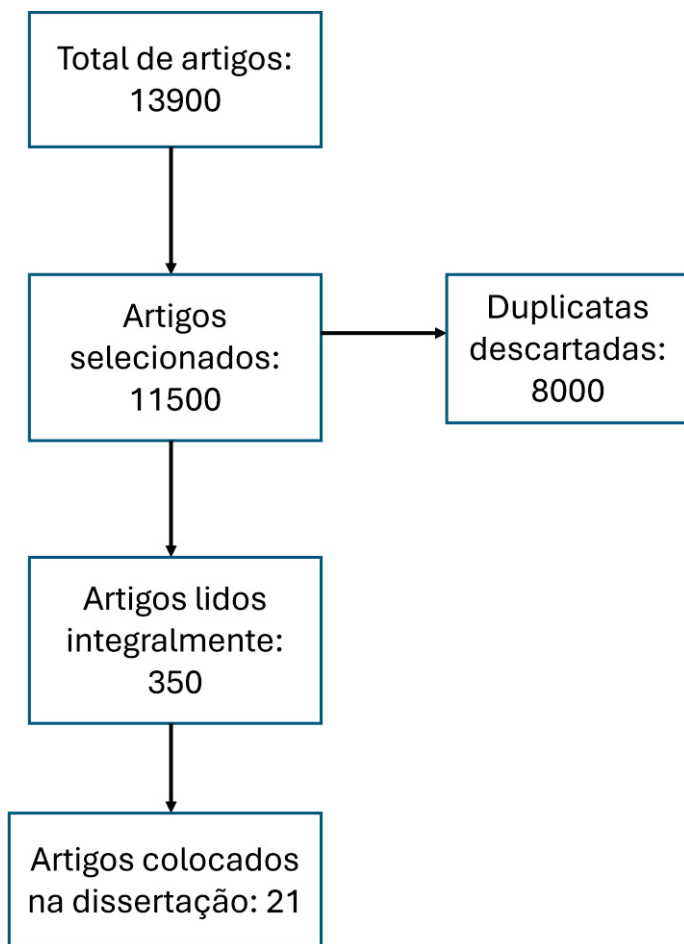
Solvente	Rendimento global da casca de café (%)	Rendimento global da borra de café (%)
Hexano	1,45 ± 0,01	9 ± 1,00
Diclorometano	2,3 ± 0,10	9,9 ± 0,10
Acetato de etila	2,1 ± 0,10	9,7 ± 0,10
Etanol	3,1 ± 0,40	12,2 ± 0,50

Fonte: Andrade *et al.* (2012)

4.1.3.2 Resumo das pesquisas feitas para a Metodologia PRISMA

A pesquisa com as palavras chave “*spent coffee grounds*” “*ultrasound*” “*coffee beans*” no Google Acadêmico apresentou os resultados quantitativos descritos no diagrama a seguir.

FIGURA 13 – RESULTADOS QUANTITATIVOS DA PESQUISA FEITA COM A METODOLOGIA PRISMA SOBRE A EXTRAÇÃO ASSISTIDA POR ULTRASSOM DE BORRA DE CAFÉ.



Fonte: A autora (2025)

A figura anterior, em relação a outras apresentadas anteriormente nos tópicos de resultados, indica que foi feita maior quantidade de publicações sobre o tema da extração assistida por ultrassom, do que para outros, como a extração com fluidos supercríticos.

A Tabela 23 apresenta os resultados completos obtidos com a pesquisa realizada e está disponibilizada no Apêndice. Andrade *et al.* (2012) usaram várias técnicas de extração com casca e borra de café, obtendo melhores resultados com ultrassom e etanol do que com fluido supercrítico. (Okur *et al.*, 2021) também compararam técnicas e concluíram que a extração assistida por ultrassom é mais conveniente para ácidos clorogênicos, considerando que os solventes utilizados são polares. (Toda *et al.*, 2022) não encontraram ganhos significativos de rendimento em óleo com ultrassom, enquanto Beaudor *et al.* (2023) recuperaram 83% dos polifenóis usando ultrassom e etanol. Tran *et al.* (2022) observaram que o ultrassom é eficaz na recuperação de compostos bioativos, mas com rendimentos menores do que a extração

assistida por micro-ondas.

(Chindapan; Puangngoen; Devahastin, 2025) extraíram cafeína com água como solvente, atingindo 98% de recuperação. (Giroto et al., 2023) também focaram na recuperação de cafeína e compostos antioxidantes, com a sonificação melhorando a extração de ambos. O teor de fenólicos totais variou com o tempo e a potência, sendo maior quanto maior esses fatores. Severini, Derossi e Fiore (2016) usaram metanol e água como cossolventes, resultando em maior teor de fenólicos totais extraídos.

Goh *et al.* (2020) realizaram um estudo com foco na produção de biodiesel ao final do processo. Após a extração do óleo utilizando o ultrassom, com tempo reduzido em relação a extração convencional, o biodiesel produzido foi considerado promissor. Verificou-se que, quanto mais recente é o trabalho, mais complexas tornaram-se as extrações com o ultrassom, com diferentes tempos e intensidades de sonicação, porém, os produtos encontrados foram semelhantes. Poucos foram os autores que aplicaram o óleo obtido em algum produto destinado à indústria, tornando essa pesquisa importante para temas como o desenvolvimento de novos produtos ou a substituição de algumas matérias-primas, seja por fatores econômicos ou ambientais. Essa técnica de extração é mais amplamente utilizada na recuperação de compostos termicamente sensíveis e/ou de maior valor agregado, por exemplo, a cafeína, com altas taxas de recuperação em alguns casos. Porém, a questão energética é um fator que deve ser considerado para a implementação em larga escala desse processo, ou seja, os custos totais do processo, inclusive o custo energético de manutenção de potências altas por alguns intervalos de tempo, devem ser comparados com o valor de venda dos produtos obtidos.

4.1.4 Extração Assistida por Micro-ondas

O método de extração por micro-ondas é semelhante ao ultrassom, usando ondas eletromagnéticas de 0,3 a 300 GHz (Tsukui, Rezende, 2016). A interação do campo elétrico com a matriz sólida aquece o meio após a retirada do campo, e o equipamento deve converter energia elétrica em calor, considerando as propriedades dielétricas do material. Solventes polares têm melhor absorção e o método evita a degradação de componentes termicamente sensíveis, controlando temperatura e tempo de extração (Bondam *et al.*, 2022). A quebra das moléculas ocorre de forma semelhante ao ultrassom.

4.1.4.1 Extração Assistida por Micro-ondas aplicada à borra de café

(Upadhyay; Ramalakshmi; Jagan Mohan Rao, 2012) aplicaram a extração assistida por micro-ondas à borra de café, observando que os rendimentos de cafeína e ácidos clorogênicos com metanol foram menores do que com água devido à maior constante dielétrica e polaridade da água, que absorve melhor as micro-ondas. A eficiência máxima foi atingida a 50 °C, tanto para ácidos clorogênicos quanto para cafeína. A maior potência testada foi de 800 W, com o maior rendimento. Comparando os métodos, a extração por micro-ondas teve melhor rendimento e economia, dispensando o uso de solventes.

(Savić; Savić Gajić; Gajić, 2024) realizaram a extração assistida por micro-ondas visando extrair cafeína da borra de café em uma frequência de 2450 MHz e a água foi escolhida como solvente. As condições ótimas de processo são 2 min de extração, 500 W e uma razão líquido/sólido de 15 mL/g, com extração de 1 g de cafeína para 100 g de borra de café seca. A tabela a seguir indica alguns resultados obtidos para análise posterior.

TABELA 14 – RENDIMENTOS DE EXTRAÇÃO DE CAFEÍNA EM DIFERENTES CONDIÇÕES.

Tempo de extração (min)	Razão Líquido-sólido (mL/g)	Potência das micro-ondas (W)	Rendimento de cafeína (g/100g)
4	10	465,5	0,23 ± 0,01
6	15	465,5	0,50 ± 0,02
6	10	336,0	0,85 ± 0,02
4	15	595,0	0,64 ± 0,03
6	10	595,0	0,65 ± 0,04
4	5	595,0	0,28 ± 0,01
2	15	465,5	1,00 ± 0,07

Fonte: Savic, Gajic e Gajic (2024)

Analisando os dados do quadro anterior, é possível observar que a potência aplicada não é o único fator que melhora a extração de cafeína. A primeira etapa foi a escolha de um solvente com polaridade adequada, nesse caso, a água. Em seguida, a razão líquido-sólido influencia também o resultado, pois, quando essa razão é de 5 mL/g ou de 10 mL/g, os rendimentos atingidos são bem menores. Tran *et al.* (2022) concluíram que, quando a razão sólido-líquido é baixa, aumentar o tempo de extração melhora o rendimento em cafeína. Quando ambos os fatores estavam em níveis médios, não houve impactos consideráveis na extração de cafeína do bagaço de café. Nem sempre longos tempos de extração são favoráveis ao aumento do rendimento se o composto de interesse é termossensível, por exemplo. Por isso, com 2 min de extração a condição ideal foi atingida, e não com 6 min.

(Hibbert; Welham; Zein, 2019) utilizaram a extração assistida por micro-ondas com 24 g de borra de café seca, divididos em 6 g por recipiente. Usando 120 mL de hexano a 85 °C, observaram que quanto maior o tempo de extração, maior a quantidade de óleo extraída, com 9,79 g de óleo por 100 g de borra após 32,5 min. Avaliando temperaturas entre 70 °C e 105 °C, obtiveram 12,08 mL de óleo a 105 °C e 8,34 mL a 70 °C. Com volumes de solvente entre 100 mL e 160 mL, conseguiram 11,67 g de óleo por 100 g de borra com 160 mL de solvente.

4.1.4.2 Perfil de ácidos graxos dos extratos

Dong *et al.* (2021) realizaram experimentos de extração com ultrassom, micro-ondas e ultrassom combinada com micro-ondas. As condições da extração assistida por ultrassom são 40 kHz, 50 W, a 35 °C por 50 min, com uma razão de amostra e etanol

de 1:30 g/mL. Enquanto a extração assistida por micro-ondas foi feita a 60 °C por 30 min, com 100 mL de etanol colocado junto com a borra de café. Quando as duas extrações foram combinadas, o experimento foi realizado a 60 °C com uma proporção de 1 g de amostra para 28 mL de etanol.

A tabela a seguir compara os perfis de ácidos graxos obtidos nas extrações assistidas por micro-ondas e nas extrações em que foram utilizados tanto o ultrassom como as micro-ondas.

TABELA 15 – COMPOSIÇÃO DOS EXTRATOS OBTIDOS DE CAFÉ ARÁBICA

ÁCIDOS GRAXOS	EAUM ^A	EAM ^B	EAU ^C
ÁCIDO PALMÍTICO	38,71 ± 1,12	36,57 ± 0,31	37,38 ± 0,39
ÁCIDO ESTEÁRICO	7,02 ± 0,27	6,93 ± 0,47	6,70 ± 0,24
ÁCIDO OLEICO	9,72 ± 0,49	8,54 ± 0,62	9,89 ± 0,25
ÁCIDO LINOLEICO	40,67 ± 1,36	43,77 ± 0,41	42,06 ± 0,37

A: Extração assistida por ultrassom e micro-ondas; B: Extração assistida por micro-ondas; C: Extração assistida por ultrassom. Fonte: Dong *et al.* (2021).

É possível observar, a partir da comparação dos valores nas duas colunas, que, quando mais de um método de extração é aplicado à mesma matéria-prima, maior a quantidade de ácidos graxos extraídos. Porém, isso não se aplica ao ácido linoleico. A partir da leitura dos tópicos anteriores, conclui-se que o perfil de ácidos graxos da borra de café, seja café arábica ou café robusta, é muito semelhante. Os ácidos graxos que aparecem em maior quantidade são o linoleico seguido do palmítico. Comparando os valores apresentados na tabela anterior, a extração assistida por ultrassom é mais eficiente para os ácidos palmítico e oleico, sendo que o primeiro não apresenta insaturações e o segundo apresenta somente uma insaturação. Os valores extraídos de ácido linoleico com os dois métodos distintos estão bem próximos, entretanto, a extração assistida por micro-ondas ainda é mais eficiente se tratando desse composto que apresenta duas insaturações na cadeia carbônica.

4.1.4.3 Caracterização do extrato obtido com as micro-ondas.

(Passos; Coimbra, 2013) realizaram extrações com a tecnologia de micro-ondas com diferentes razões sólido/solvente: 1:30, 1:20, 1:12, 1:10, 1:7, e 1:5, preparando soluções com volume total de 80 mL e as extrações ocorreram a 200 °C

durante 2 min. Nos extratos obtidos, identificaram monossacarídeos, oligossacarídeos e polissacarídeos, além de outros materiais.

A tabela a seguir apresenta os principais valores obtidos para as razões de 1:5, 1:7, 1:10 e 1:30 por Passos e Coimbra (2013).

TABELA 16 – RENDIMENTOS DE CARBOIDRATOS E DE EXTRAÇÃO OBTIDOS POR PASSOS E COIMBRA (2013).

Informações	1:5	1:7	1:10	1:30
Temperatura (°C)	170	180	200	200
Carboidratos extraídos (%)	52,1	51,5	62,9	67,8
Monossacarídeos no extrato (%)	11,8	5,7	3,1	2,2
Rendimento de extração (% de massa)	14,8	20,4	19,5	29,0

Fonte: Passos e Coimbra (2013).

O maior rendimento da extração nem sempre está associado a grandes quantidades de compostos específicos. A razão de 1:30 apresentou a maior quantidade de carboidratos, mas a menor porcentagem de monossacarídeos. A maior quantidade de monossacarídeos foi obtida na condição com o menor rendimento de extração. Passos e Coimbra (2013) observaram aumento de rendimento de extração com um decréscimo simultâneo na quantidade de material presente na batelada.

(Ranic et al., 2014) utilizaram a extração assistida por micro-ondas para isolar polifenóis da borra de café e avaliar a capacidade antioxidante. Pavlović *et al.* (2013) também avaliaram o teor de fenólicos totais com um processo semelhante. Ambos usaram etanol puro ou soluções hidroetanólicas como solventes, sendo parâmetros importantes para os resultados. Pavlović *et al.* (2013) obtiveram altos rendimentos de fenólicos totais e capacidade antioxidante (DPPH) com solução hidroetanólica.

Ranic *et al.*, Pavlović *et al.* (2013), Pettinato, Casazza e Perego (2019), Campos-Vega *et al.* (2015), (Coelho et al., 2021) e (Budaraju; Mallikarjunan; Petit, 2017) identificaram ou extraíram compostos fenólicos, utilizando soluções hidroetanólicas na maioria das vezes. Essa ocorrência é um indicativo de que essa técnica não favorece apenas a obtenção de óleo, mas também a recuperação de compostos que podem ou não ser termicamente sensíveis e que têm valor agregado.

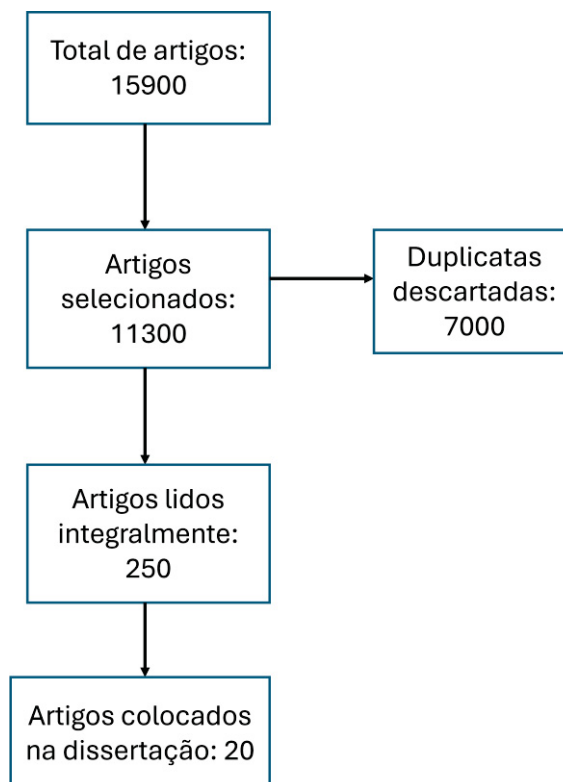
(Yordanov et al., 2016) obtiveram outro produto possível, o óleo. Foram combinadas a radiação e os solventes, chegando nas condições ótimas de 600 W e 10 min. (YORDANOV et al., 2013) fizeram um processo semelhante com um resíduo de café de máquina e a combinação de 600 W com hexano gerou o maior rendimento em óleo do estudo.

Upadhyay, Ramalakshmi, Rao (2012) e Tsukui *et al.* (2014) trabalharam com grãos de café verde. Upadhyay, Ramalakshmi, Rao (2012) obtiveram compostos fenólicos, além de ácidos clorogênicos e cafeína. Tsukui *et al.* (2014) extraíram o óleo e diterpenos, identificando que a extração assistida por micro-ondas é favorável na recuperação do cafestol, por exemplo. (Passos et al., 2015) trabalharam com a borra de café e utilizaram água pura como solvente, visando a extração de ácidos clorogênicos, em duas etapas de extração, obtendo também polissacarídeos.

4.1.4.4 Resumo das pesquisas feitas com a metodologia PRISMA

A pesquisa com as palavras chave “*spent coffee grounds microwave coffee beans*” apresentou 15.900 resultados, sem o uso de nenhum filtro. A Tabela 24 apresenta os resultados completos obtidos com a pesquisa realizada e está disponibilizada no Apêndice. A figura a seguir apresenta o resultado quantitativo da pesquisa feita sobre extrações assistidas por micro-ondas com a borra de café.

FIGURA 14 – RESULTADO QUANTITATIVO DA PESQUISA FEITA SOBRE EXTRAÇÕES ASSISTIDAS POR MICRO-ONDAS COM A BORRA DE CAFÉ.



Fonte: A autora (2025)

A figura anterior indica que a quantidade de publicações realizadas com o tema “extração assistida por micro-ondas com a borra de café” é grande, porém, a posição das informações nos artigos pesquisados, por exemplo, na introdução, foi fundamental para a seleção e leitura integral dos artigos selecionados. Essa etapa influenciou, certamente, a quantidade final de artigos colocada na dissertação.

4.1.5 Pesquisa bibliográfica sobre a extração com líquidos pressurizados (PLE) com borra de café

A Tabela 28 apresenta os resultados da pesquisa realizada e está disponibilizada no Apêndice. (Kanaan et al., 2025) realizaram extrações com líquidos pressurizados utilizando etanol e acetato de etila. Com a borra de café úmida, ambos os solventes geraram porcentagens maiores de extratos, quase 30% para as duas extrações. Essa tendência se repetiu na identificação de fenólicos nos extratos obtidos com a borra de café úmida.

Observando o experimento realizado por (Araújo et al., 2019), conclui-se que o aumento de pressão não favoreceu o processo. (Shang et al., 2017) utilizaram pressões reduzidas e temperaturas maiores em comparação com os outros autores, obtendo

maior quantidade de fenólicos e 1,33 mg de cafeína/ g de borra de café. O propano, sendo um solvente apolar, gerou rendimento intermediário em relação ao etanol e ao acetato de etila, conforme experimentos realizados por Santos (2024).

Toda *et al.* (2021) obtiveram menor quantidade de óleo em pressões maiores e temperaturas menores do que os outros autores citados. Conforme observado nos experimentos realizados por Kanaan *et al.* (2025), a redução de temperatura aumenta o rendimento em óleo com o etanol, a tendência repetiu-se com Toda *et al.* (2022), que fizeram a extração com líquido pressurizado a 50 °C e obtiveram 70% em óleo.

Vu *et al.* (2021) utilizaram uma mistura hidroetanólica, obtendo baixo rendimento em óleo. Já Silva *et al.* (2022), com uma mistura de 50% de propano e de CO₂ e 40 °C, conseguiram extrair, aproximadamente, 11% de óleo. Esse resultado foi similar ao de (Araujo *et al.*, 2024), que utilizaram somente propano como solvente. Belandria *et al.* (2016) extraíram diterpenos de grãos verdes de café, com condições ótimas de 100 °C, 100 bar com metanol.

4.1.5.1 Cafeína e quantidade de fenólicos totais extraída através do PLE

(Sato *et al.*, 2024) realizaram o processamento dos grãos de café a 473 K e 2,1 MPa por 120 min. Segundo a publicação feita pelos autores citados, o processo realizado era uma hidrotermoliquefação. Porém, analisando as condições operacionais de 200 °C, verifica-se que o procedimento realizado está mais similar à extração com líquido pressurizado do que para uma hidrotermoliquefação. O rendimento foi de 48,3 mg de cafeína /g de grãos intactos de café Arábica (0,7 a 1 mm de diâmetro). Grãos moídos grosseiramente (diâmetro >1680 µm) tiveram menor rendimento (43,5 mg/g), assim como grãos moídos mais criteriosamente (diâmetro entre 840 e 1680 µm, 43,4 mg/g). Observou-se que grãos menores resultam em menor extração de cafeína e que a temperatura de 200 °C pode causar a degradação de muitos compostos.

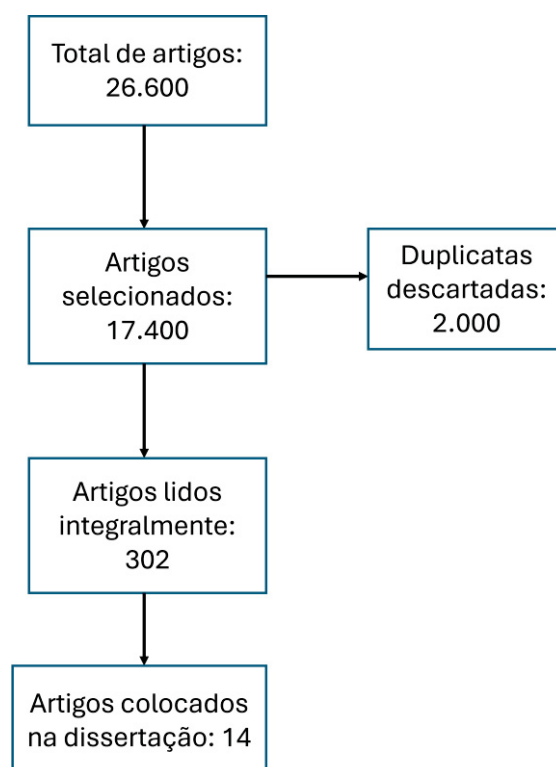
Com os grãos intactos de café Arábica, com diâmetro entre 0,7 e 1 mm, Sato *et al.* (2024) mostraram que a quantidade de fenólicos totais extraídos é de 22,0 mg GAE/g. Com a redução do diâmetro do grão para um tamanho maior que 1680 µm, 47,7 mg GAE/g de fenólicos totais foram extraídos. Com os grãos moídos de forma mais

criteriosa, com diâmetro entre 840 e 1680 μm , a quantidade de fenólicos totais extraída é de 37,5 mg GAE/g. O comportamento de extração dos compostos fenólicos é o oposto da cafeína, e a condição ideal de extração é com os grãos de café arábica com diâmetro maior que 1680 μm e menor que 0,7 mm.

4.1.5.2 Resumo das pesquisas feitas com a metodologia PRISMA sobre extração com líquidos pressurizados da borra de café

A pesquisa com as palavras-chave “*spent coffee grounds ple coffee beans*” apresentou 3340 resultados, sem o uso de nenhum filtro. A figura a seguir apresenta o resultado quantitativo da pesquisa feita com a metodologia PRISMA sobre extração com líquidos pressurizados da borra de café:

FIGURA 15 – RESULTADOS QUANTITATIVOS DA PESQUISA FEITA COM A METODOLOGIA PRISMA SOBRE EXTRAÇÃO COM LÍQUIDOS PRESSURIZADOS DA BORRA DE CAFÉ.



Fonte: A autora (2024)

A análise da figura anterior indica que os critérios de seleção utilizados filtraram grande quantidade de artigos que foram encontrados a partir das palavras-chave. Esses critérios são: de encontrar a técnica de extração/reação na metodologia, identificar os parâmetros operacionais do experimento e que os resultados sejam relacionados

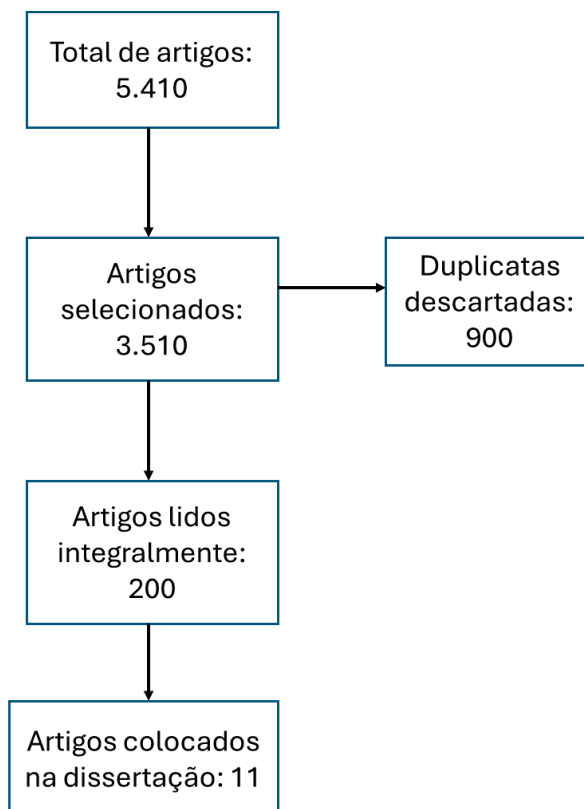
diretamente aos experimentos realizados.

4.1.6 Maceração dos grãos de café e da borra de café

A maceração é feita quando o substrato sólido, que pode passar por moagem ou não, é submerso no solvente. A escolha do solvente varia de acordo com a polaridade dos compostos que se quer extrair. Essa extração sólido-líquido pode ser feita com ou sem aquecimento e o sistema deve ser mantido em repouso até se tornar saturado. Após a extração, o solvente pode ser separado do extrato através do rota-evaporador (BARREIROS; MACHADO, 2010).

4.1.6. 1 Resultados da metodologia PRISMA

As palavras-chave utilizadas na pesquisa foram: “*spent coffee grounds maceration*”. A tabela 32, disponibilizada no anexo, apresenta alguns dos dados obtidos. A figura a seguir indica o resultado quantitativo da pesquisa feita através da metodologia PRISMA:



Fonte: A autora (2025)

Le *et al.* (2017) extraíram o óleo da borra de café por maceração e analisaram seu perfil de ácidos graxos. Comparado a outras técnicas de extração, como UAE, MAE e Soxhlet, a maceração apresentou o menor rendimento, cerca de 10%, utilizando razões sólido:solvente de 1:10, 1:15 e 1:20. De forma semelhante, Balzano *et al.* (2020) utilizaram borra de café desidratada, realizando maceração por 12 h em solução etanólica, obtendo rendimentos totais de tocoferol que variaram entre 1142 ± 49 mg/kg no café de Porto Rico e 1508 ± 14 mg/kg no café colombiano.

(Várady *et al.*, 2022) processaram café 100% arábica por maceração carbônica, técnica realizada em um ambiente rico em CO₂. O café peruano apresentou $19,9 \pm 4,26$ µg GAE/mg de fenólicos totais, $1,86 \pm 0,31$ µg QE/mg de flavonoides e uma capacidade antioxidante de $84,1 \pm 18,9$ µg TE/mg. O teor de cafeína encontrado foi de $9,45 \pm 3,88$ µg/1000 µg, o maior entre os métodos testados. Já (Bijla *et al.*, 2024) maceraram borra de café seca em 500 mL de etanol absoluto por 24 horas a 25 ± 5 °C, obtendo um rendimento de $4,70 \pm 0,06\%$, indicando que a matéria-prima continha principalmente carboidratos e algumas amostras apresentaram teor elevado de cálcio.

(Lourith *et al.*, 2022) obtiveram borra de café com 60% de umidade e a secaram a 45 °C por 48 horas. A maceração ocorreu com n-hexano, e o perfil de ácidos graxos obtido se mostrou semelhante independentemente do tempo de extração. Da mesma

forma, (KANLAYAVATTANAKUL; LOURITH; CHAIKUL, 2021) secaram a borra a 45 °C e realizaram maceração por 1 e 3 horas. A extração mais longa apresentou maior quantidade de ácidos graxos, embora o rendimento global das duas macerações tenha sido semelhante ao Soxhlet e ao refluxo, cerca de 15%.

(Fernandes; Delerue-Matos; Grosso, 2025) estudaram a maceração de um blend 50:50 de café arábica e robusta seco (<10% umidade) em duas condições: 40 °C com 1g:50 mL de água/metanol (1 hora) e 60 °C com 1g:100 mL de água/metanol (1 hora). O maior rendimento de fenólicos foi de $134,64 \pm 14,73$ mg GAE/peso seco, enquanto a maior atividade antioxidante ocorreu a 40 °C, indicando possível degradação a 60 °C. De forma semelhante, (Sheilatina et al., 2023) extraíram taninos da borra de café seca, reduzida a 30 mesh, realizando maceração com 50 g de biomassa em 100 mL de metanol, agitada a 145 rpm por 24 horas a temperatura ambiente, resultando em 5,1554 g de extrato, com rendimento de 10,30%.

Rodrigues *et al.* (2013) moeram a casca de café até aproximadamente 0,1 mm. 1 g de casca de café foi macerada por 30 min a 40 °C com 20 mL de etanol, sendo que a proporção foi de 1:1 etanol e água. Os resultados são: $18,33 \pm 0,53$ (TPC), $1,08 \pm 0,23$ (TFC) e $206,00 \pm 3,72$ (DPPH). (SUSILAWATI; AJUNDA; DEWANTI, 2024) maceraram 200 g de café robusta torrado, também com etanol (1000 mL) por 3x 24h, seguidos de um período de agitação, obtendo $1,660 \pm 0,02$ mg GAE/g em teor de fenólicos com a torra mais escura. Referente ao rendimento de taninos, Susilawati, Ajunda e Dewanti (2024) não perceberam diferenças consideráveis nas diferentes torras avaliadas (média, escura e clara).

Por fim, (Myo; Khat-udomkiri, 2022) macerou 1 g de polpa de café arábica em 46,7% m/v de propilenoglicol ou etanol, com razão líquido:sólido de 22,22 mL/g a 100 rpm, 25 °C por 24 horas. O propilenoglicol obteve maior rendimento, com $8,50 \pm 0,14$ mg GAE/g de fenólicos totais, $51,72 \pm 1,94$ mg QE/g de flavonoides e $5,63 \pm 0,10$ mg TEA/g de atividade antioxidante.

4.1.7 Hidrotermoliquefação e pirólise da borra de café e dos grãos de café

4.1.7.1 Hidrotermoliquefação da borra de café e dos grãos de café

A hidrotermoliquefação é uma maneira de processamento da biomassa que permite

obter três produtos principais: bio-óleo, gases e sólidos. A quantidade obtida de cada um desses produtos varia conforme a temperatura, a quantidade de biomassa e água que reagiram, além do tempo de retenção aplicado ao processo. De acordo com (Gollakota; Kishore; Gu, 2018), a hidrotermoliquefação da biomassa é uma maneira termoquímica de conversão de um material em combustíveis líquidos através do processamento em água quente e pressurizada até a quebra das estruturas poliméricas do sólido. As condições típicas de processamento variam entre 523 K e 647 K e pressões entre 4 e 22 MPa. As principais diferenças entre esse processo e a pirólise são as menores temperaturas e maior eficiência energética, fator que atrai o interesse dos pesquisadores.

Cada biomassa processada gera um bio-óleo de composição diferente e algumas maneiras de analisar o óleo produzido são a partir da análise elementar e da cromatografia em fase gasosa.

4.1.7.1.1 Rendimentos da hidrotermoliquefação em bio-óleo, biogás e biocarvão

Dias *et al.* (2021) realizaram a hidrotermoliquefação a 275 °C, com uma média de taxa de aquecimento de 2,3 °C por minuto, razão de líquido/sólido de 20:1 e 10 min de reação. Os grãos foram moídos antes da reação e a espécie do grão não foi identificada. Como resultado, 74% da massa seca foram convertidos no bio-óleo e em sólidos, sendo que 31% da massa inicial foi convertido em óleo e 43% em sólido.

Liakos *et al.* (2012) converteram a borra de café deslipidificada em bio-óleo e, a partir da análise de comportamento, observou que quanto maior a temperatura, maior o rendimento em óleo e menor a quantidade de sólidos obtida ao final do processo. Enquanto (Yang *et al.*, 2020) utilizaram a borra de café e realizou experimentos de hidrotermoliquefação tanto com água fresca como água salobra. Os rendimentos brutos foram muito similares para ambos os testes, a 270 °C; enquanto a quantidade de biocarvão obtida no processo com a água salobra é maior do que com a água fresca.

Yang *et al.* (2016) realizaram a hidrotermoliquefação de borra de café com diferentes quantidades de água e observaram que tempos de retenção acima de 15 min a altas temperaturas podem degradar o óleo, enquanto a quantidade de resíduos sólidos se mantém constante por 35 min. Os produtos gasosos não se degradam e aumentam após 35 min. A temperatura favorece a obtenção de óleo a partir de 250 °C, enquanto a quantidade de sólidos reduz com o aumento da temperatura desde o

início, e os gases aumentam a partir de 275 °C. A razão de água/sólido é importante, mas não determinante, em alguns métodos de extração. Avaliando as razões mássicas de 5, 10, 15 e 20 g de água para 1 g de matéria-prima, Yang et al. (2016) verificaram que, a partir da razão mássica de 15:1, a quantidade de óleo aumenta e a de gases produzidos diminui, enquanto a quantidade de sólidos diminui com o aumento da quantidade de água.

Nos experimentos realizados por Zhang *et al.* (2021), foram avaliadas diferentes temperaturas e os resultados analisados foram a porcentagem de óleo, carvão e gás. A tabela abaixo apresenta um resumo dos principais resultados obtidos:

TABELA 17 – RENDIMENTOS DE ÓLEO, BIOCARVÃO E GÁS EM DIFERENTES TEMPERATURAS.

Temperatura (°C)	Porcentagem de óleo	Porcentagem de biocarvão	Porcentagem de gás
270	25,7	25,6	8,9
295	31,2	23,8	11,8
320	21,8	21,7	12,6

Fonte: Zhang *et al.* (2021).

É possível verificar que, assim como reportado por outros autores, a porcentagem de gás aumenta conforme a temperatura. Na faixa analisada por Yang *et al.* (2016), que ia até 300 °C, a quantidade de óleo aumentou com o aumento da temperatura, porém, Zhang *et al.* (2021) mostraram que a 320 °C essa quantidade diminui, assim como a quantidade de carvão obtido.

4.1.7.1 2 Características do bio-óleo obtido a partir da hidrotermoliquefação da borra de café e dos grãos de café

Marx *et al.* (2020) realizaram ensaios de hidrotermoliquefação contínua e em batelada a 300 °C, com razão sólido/líquido de 1:10 e 50% de carregamento do reator. No ensaio em batelada, o teor de ácidos graxos foi de 94,2%, com 54,4% saturados e 39,8% insaturados. No ensaio contínuo, o teor total caiu para 22,4%, com 14,9% de insaturados. O rendimento de óleo foi de 185 g/kg SCG em batelada e 260 g/kg SCG no modo contínuo. O processo contínuo aumentou o rendimento de óleo, mas reduziu o teor de ácidos graxos.

A tabela a seguir apresenta um resumo dos resultados obtidos por Marx *et al.*

(2020).

TABELA 18 – COMPARAÇÃO DE DADOS DOS ENSAIOS DE MARX *ET AL.* (2020).

Ensaio	Capacidade calorífica superior (MJ/kg)	Rendimento em óleo (g/kg SCG)
Contínuo	37,4	260,0
Em batelada	38,6	185,0

Fonte: Marx *et al.* (2020).

Observando os dados colocados no quadro anterior, além das informações obtidas sobre o teor total de ácidos graxos nas análises contínua e em batelada, é possível concluir que o poder calorífico superior do óleo é dependente da quantidade de ácidos graxos extraídos.

Com diferentes tempos de residência em uma hidrotermoliquefação contínua, assim como Marx *et al.* (2020), von Wielligh *et al.* (2018) avaliaram o rendimento de biocarvão e de bio-óleo, sendo que com 10 min de reação, foi obtido o maior rendimento de bio-óleo e com 15 min foi obtido o maior rendimento de biocarvão.

Dias *et al.* (2021) realizaram a hidrotermoliquefação e obtiveram bio-óleo com capacidade calorífica superior de 31 MJ/kg. Yang *et al.* (2020) obtiveram a mesma capacidade calorífica com água fresca e salobra, de 31,3 MJ/kg. Yang *et al.* (2016) também verificaram uma capacidade calorífica superior de 31 MJ/kg, indicando composição inicial semelhante da matéria-prima. Além disso, Yang *et al.* (2016) produziram bio-óleo com composição elementar de 71,2% de carbono, 7,1% de hidrogênio, 3% de nitrogênio e 18,7% de oxigênio após 10 min de reação a 275 °C.

TABELA 19 – COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DO BIO-ÓLEO.

Elemento	Composição (% m/m)
C	71,2
H	7,1
N	3,0
O	18,7

Fonte: Yang *et al.* (2016).

4.1.7.1.3 Resumo com as pesquisas da metodologia PRISMA

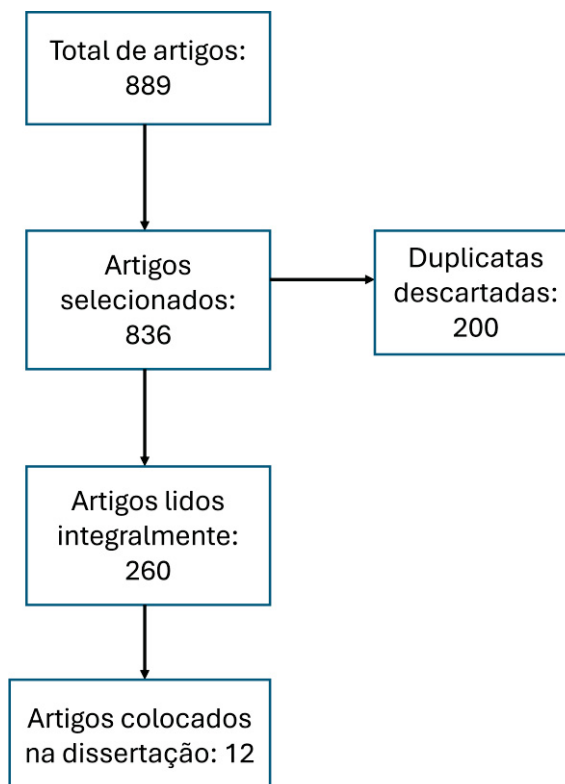
As Tabelas 26 e 27 apresentam os resultados obtidos com a pesquisa feita através da metodologia PRISMA e estão disponibilizadas no Apêndice. Yang *et al.* (2016) e (RENSBURG; SCHABORT, 2018) obtiveram bio-óleo da borra de café a partir da hidrotermoliquefação. Yang *et al.* (2016) constataram que as condições ótimas de obtenção de óleo são 275 °C, por 10 min. Rensburg e Schabort (2018) obtiveram óleo com valor maior de HHV (poder calorífico superior) do que Yang *et al.* (2016), embora com menor rendimento em óleo. Muller *et al.* (2021) obtiveram rendimento ainda menor em bio-óleo, aproximadamente 20%, com poder calorífico semelhante a Rensburg e Schabort (2018).

(Remón *et al.*, 2021) obtiveram bio-óleo e biocarvão e analisaram a composição dos dois materiais. Os autores constataram que é possível obter bio-óleo enriquecido com compostos fenólicos. (Zhang *et al.*, 2021) também elucidaram a busca por polifenóis, conseguindo 1% de massa em polifenóis.

(Liu *et al.*, 2024) utilizaram cascas de café para uma hidrotermoliquefação com catálise de FeCl₃, visando obter bio-óleo. Esse óleo continha derivados furfúricos e fenólicos, com menor quantidade de energia do que o bio-óleo obtido a partir da borra de café.

A pesquisa com as palavras chave “*spent coffee grounds hydrothermal liquefaction coffee beans*” apresentou 889 resultados, sem o uso de nenhum filtro. A figura a seguir apresenta o resultado quantitativo das pesquisas feitas com a metodologia PRISMA sobre a hidrotermoliquefação com a borra de café. Tal figura indica que, em comparação com as figuras colocadas em outros tópicos dos resultados, a quantidade de publicações sobre hidrotermoliquefação com borra de café é bem menor do que os outros temas pesquisados. Por isso, a quantidade de artigos colocada na dissertação também é menor. Isso abre margem para a realização de mais estudos sobre essa temática.

FIGURA 16 - RESULTADO QUANTITATIVO DAS PESQUISAS FEITAS COM A METODOLOGIA PRISMA SOBRE A HIDROTERMOLIQUEFAÇÃO COM A BORRA DE CAFÉ



Fonte: A autora (2025)

4.1.8 Pirólise aplicada à borra de café e ao grão de café

A pirólise é um processo de decomposição térmica do material em ausência de oxigênio. Como resultado, tem-se a quebra das ligações químicas e produz uma mistura de gases, líquidos e sólidos. Em temperaturas menores e tempos de residência do vapor maiores favorecem a produção de biocarvão. Temperaturas e tempos de residência maiores aumentam a conversão da biomassa em gás. Para a produção de líquidos o ideal é o processamento em temperaturas de 500 °C e tempo menor de residência do vapor, de até 30 s (BRIDGWATER, 2012).

4.1.8.1 Rendimentos em bio-óleo e biocarvão obtidos a partir da pirólise

(Kelkar et al., 2015) avaliaram a pirólise da borra de café entre 429 °C e 571 °C, com tempos de residência entre 23 e 42 s, considerando que a umidade da borra de café utilizada foi de aproximadamente 3%. O maior rendimento de bio-óleo (61,7%) ocorreu a 500 °C e 23 s de reação. A menor quantidade de biocarvão e a maior quantidade de gás foram obtidas a 550 °C e 28 s de reação. A 550 °C, obtiveram rendimentos de bio-óleo de 60,8% (28 s) e 54,5% (37 s). (AlMallahi et al., 2023)

obtiveram 45% de bio-óleo a 550 °C e 42% a 450 °C, rendimentos menores que os reportados por Kelkar *et al.* (2015) nas mesmas condições.

Kelkar *et al.* (2015) e AlMallahi *et al.* (2023) obtiveram diferentes tendências para a quantidade de biocarvão. Em AlMallahi *et al.* (2023), a quantidade de biocarvão decaiu com o aumento de temperatura e com o aumento no tempo de residência, que variou entre 200-550 s. Nos experimentos de Kelkar *et al.* (2015), com 32 s de tempo de residência, a quantidade de biocarvão decaiu a 550 °C e aumentou a 571 °C, avaliando tempo de residência e temperatura em conjunto.

É possível realizar a análise elementar dos produtos obtidos a partir da pirólise. Kelkar *et al.* (2015) realizaram essa análise para o bio-óleo, o biocarvão e para a biomassa, enquanto (Lee *et al.*, 2021) realizaram para a biomassa e o biocarvão Malagón-Romero *et al.* (2023) executaram essa análise para a biomassa coletada. O quadro a seguir apresenta o resultado de ambos os trabalhos.

QUADRO 3 – COMPARAÇÃO DA ANÁLISE ELEMENTAR DA BIOMASSA, BIO-ÓLEO E BIOCARVÃO.

Elementos	Lee <i>et al.</i> (2021)		Kelkar <i>et al.</i> (2015)		Malagón-Romero <i>et al.</i> (2023)	Hou, Huang, Lin (2017)
	Biomassa	Biocarvão	Biomassa	Biocarvão	Biomassa	Bio-óleo
C	56,25	78,82	52,37	75,30	48,74	42,56
H	-	-	7,31	3,52	6,53	4,32
O	29,75	10,59	36,50	0,11	40,94	46,19
N	9,34	4,7	2,42	4,40	2,08	0,62
S	0,47	0,24	0,14	0,12	0,14	
Mg	0,95	1,23	-	-		
K	0,96	1,88	-	-		

Lee *et al.* (2021) quantificaram o magnésio e o potássio utilizando a espectrometria de raios X por dispersão de energia (EDX), enquanto os outros elementos foram identificados pela análise elementar.

Lee *et al.* (2021) e Kelkar *et al.* (2015) encontraram quantidades semelhantes de carbono no biocarvão, mas a quantidade de oxigênio no biocarvão de Kelkar *et al.* (2015) foi de 0,11% enquanto no estudo de Lee *et al.* (2021) chegou a quase 11%. Em ambos os estudos, o biocarvão apresentou menor teor de nitrogênio do que a biomassa, e as quantidades de enxofre foram menores que 1%. Hou, Huang e Lin (2017) caracterizaram o bio-óleo obtido por pirólise rápida, observando uma porcentagem de carbono menor que no biocarvão e um teor de hidrogênio um pouco maior que o biocarvão de Kelkar *et al.* (2015), possivelmente devido à coleta do óleo entre 380 e 400 °C.

No biocarvão produzido por Lee *et al.* (2021), as quantidades de magnésio e potássio aumentaram em comparação com a biomassa original, devido à redução dos teores de nitrogênio e oxigênio. Kelkar *et al.* (2015) usaram temperaturas entre 450 °C e 550 °C com tempos de retenção curtos, enquanto Lee *et al.* (2021) trabalharam a 500 °C com retenção de até 10 min, explicando a diferença na quantidade de oxigênio nos biocarvões. Malagón-Romero *et al.* (2023) utilizaram borra de café com maior teor de oxigênio que os outros autores e compararam os rendimentos de óleo e biocarvão em diferentes temperaturas de pirólise.

QUADRO 4 – RENDIMENTOS DE BIO-ÓLEO E BIOCÁRVÃO OBTIDOS POR MALAGÓN-ROMERO ET AL. (2023).

Temperatura (°C)	Rampa (°C/min)	Rendimento (%)		Capacidade calorífica superior do óleo (MJ/kg)
		Bio-óleo	Bio-carvão	
400	15	22,46%	21,40%	28,91
	30	17,21%	21,02%	30,19
500	15	14,80%	21,91%	31,48
	30	17,85%	23,44%	30,33

Fonte: Malagón-Romero *et al.* (2023)

O valor de capacidade calorífica obtido por Lee *et al.* (2021) para a biomassa é de 22,59 MJ/kg e para o biocarvão é de 31,41 MJ/kg, ou seja, é um valor bem similar aos que foram obtidos por Malagón-Romero *et al.* (2023). É possível observar no quadro anterior que a porcentagem de biocarvão foi maior a 500 °C, comportamento oposto ao do bio-

óleo. A 450 °C, AlMallahi et al. (2023) obtiveram aproximadamente 42% de bio-óleo, valor bem maior do que os encontrados por Malagón-Romero *et al.* (2023).

(Vu Ly et al., 2022) utilizaram as sobras da produção do café para realizar a pirólise em um reator fluidizado na faixa de temperatura de 673 a 773 K, obtendo diferentes capacidades caloríficas para o bio-óleo produzido, assim como diferentes composições elementares. O quadro apresentado a seguir tem uma comparação da análise elementar do bio-óleo em diferentes temperaturas.

QUADRO 5 – COMPARAÇÃO DA ANÁLISE ELEMENTAR DO BIO-ÓLEO EM DIFERENTES TEMPERATURAS.

	673 K	693 K	713 K	733 K	753 K	773 K
C (% m/m)	57,82	65,14	70,62	70,32	72,36	72,52
H (% m/m)	8,79	9,45	9,18	10,41	10,39	10,32
N (% m/m)	2,02	1,78	1,03	1,12	1,28	1,68
O (% m/m)	31,34	23,59	19,13	18,14	15,95	15,47
S (% m/m)	0,03	0,04	0,04	0,01	0,02	0,01
Capacidade calorífica superior (MJ/kg).	27,91	32,66	33,47	35,42	35,83	37,80
Quantidade de biocarvão (% m/m)	28,12	26,19	23,88	22,32	22,26	21,85

Fonte: Ly *et al.* (2022)

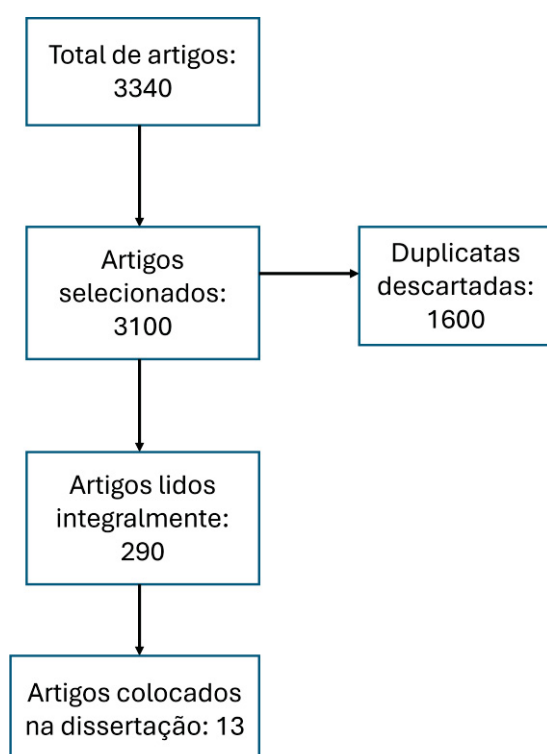
É possível observar no quadro anterior que a capacidade calorífica superior do bio-óleo aumenta conforme o aumento da temperatura da pirólise das sobras da produção do café, assim como a porcentagem de carbono. A capacidade calorífica obtida por MALAGÓN-ROMERO et al., (2023) com a borra de café é menor do que a obtida por Ly *et al.* (2022) na mesma temperatura, possivelmente porque foi utilizado somente um produto na pirólise. Entretanto, a porcentagem de biocarvão obtida na mesma temperatura é bem similar para ambos os autores. Já em 400 °C, a quantidade de biocarvão obtida por Ly *et al.* (2022) é bem maior do que a obtida por Malagón- Romero *et al.* (2023), enquanto a capacidade calorífica superior é menor BOK et al., (2012) obtiveram os melhores rendimentos em bio-óleo a 550 °C em pirólise rápida, enquanto

BEDMUTHA et al., (2011) conseguiram melhor rendimento a 500 °C. A quantidade de óleo obtida por Bok *et al.* (2012) foi maior devido ao efeito da temperatura. (KELKAR et al., (2015) perceberam que tempos de residência menores aumentam o rendimento em óleo. PRIMAZ et al., (2018) caracterizaram o óleo obtido por pirólise em leito fixo, encontrando fenóis e compostos nitrogenados. TSAI; LIU; HSIEH, (2012) utilizaram resíduo de café exaurido na produção de biocarvão.

4.1.8.2 Resumo das pesquisas feitas com a metodologia PRISMA para a pirólise de borra de café.

A pesquisa com as palavras chave “*spent coffee grounds pyrolysis coffee beans*” apresentou 3340 resultados, sem o uso de nenhum filtro. A figura a seguir apresenta o resumo quantitativo das pesquisas feitas com a metodologia PRISMA para a pirólise de borra de café.

FIGURA 17 – RESULTADO QUANTITATIVO DA PESQUISA FEITA COM A METODOLOGIA PRISMA SOBRE PIRÓLISE DE BORRA DE CAFÉ.



Fonte: A autora (2025).

A análise da figura anterior indica que, assim como ocorreu com os resultados quantitativos de pesquisa com a hidrotermoliquefação, o número de resultados encontrados com o tema “pirólise com borra e/ou grãos de café” é reduzido em comparação a temas como extração assistida por ultrassom. Isso pode se justificar devido ao processo de extração assistida por ultrassom estar mais consolidado e ser mais utilizado para determinados processos. Porém, esse fato permite que mais estudos com essa temática sejam realizados, identificando condições ótimas de rendimento em bio-óleo, biogás e biocarvão.

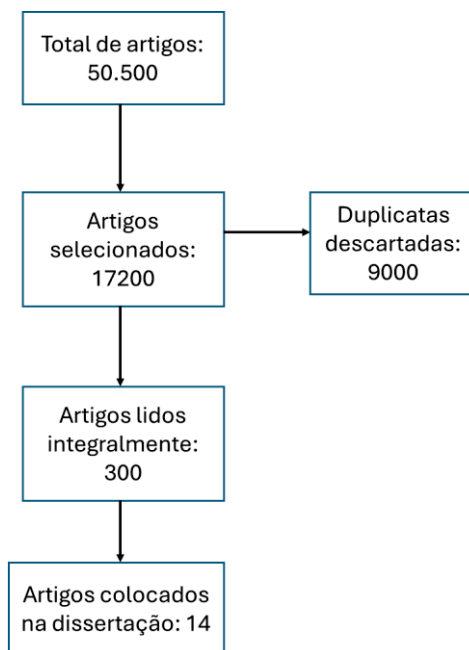
4.1. 9 Pesquisa bibliográfica sobre geração de energia

Existe energia disponível nas biomassas e nos resíduos oriundos de biomassas. Por meio de processos térmicos, geralmente a queima, é possível acessar e utilizar essa energia. A queima de biomassa para a geração de vapor já é realizada em algumas indústrias, por exemplo, a Nestlé (conforme citado na introdução), porém, também é possível realizar a torrefação de pellets de diferentes composições, entre outros.

4.1.9.1 Resultados da pesquisa sobre geração de energia

As palavras chave da pesquisa com a metodologia PRISMA foram: spent coffee grounds steam generation energy.

Figura 18 - RESULTADOS QUANTITATIVOS DA PESQUISA FEITA COM A METODOLOGIA PRISMA SOBRE GERAÇÃO DE ENERGIA



Fonte: A autora (2025)

Após a leitura e seleção dos artigos de geração de energia, concluiu-se que grande parte dos autores encontrados optaram por realizar uma avaliação calorífica dos pellets, de diferentes composições. As variáveis modificadas pelos autores foram o tempo de torrefação, a composição dos pellets e diferentes tratamentos aplicados à matéria prima.

PARK et al., (2024) realizaram a torrefação de pellets em uma faixa de temperatura entre 230 °C e 310 °C, com incrementos de 20 °C, durante 1 hora. A partir desse processo, os valores de Alto Poder Calorífico (HHV, do inglês Higher Heating Value) obtidos variaram entre 22,22 MJ/kg e 29,39 MJ/kg, com rendimentos energéticos de 60% a 90%.

WOO; KIM; KIM, (2021) investigaram a produção de pellets compostos por misturas de borra de café e serragem de pinho em diferentes proporções sólido-sólido, além de pellets compostos exclusivamente por borra de café. Os valores de HHV medidos indicaram que os pellets feitos apenas com borra de café apresentaram um HHV de 24 MJ/kg, enquanto as amostras contendo 70% e 90% de borra de café apresentaram valores próximos.

LIMOUSY et al., (2013) transformaram pó de café em pellets com 6 mm de diâmetro, utilizando um processo a 50 Hz e 70 °C. O HHV medido nesse estudo foi de 19,55 MJ/kg, e a eficiência de combustão da matéria-prima utilizada foi de 86,3%.

(MAYSON; WILLIAMS, (2021) caracterizaram pellets de borra de café produzidos

industrialmente e determinaram um HHV de 21,23 MJ/kg. Eles também compararam as emissões de carbono provenientes da queima desses pellets com as do uso de gás natural. Observou-se que os pellets liberam significativamente menos carbono por batelada, com valores de 0,37 contra 5,43, respectivamente.

SIDŁO; LATOSIŃSKA, (2024) avaliaram misturas de borra de café com resíduos de chá, pinho e palha, obtendo o maior HHV de 22,7 MJ/kg para a proporção de 75% borra de café e 25% pinho. Entre borras submetidas a diferentes tratamentos, aquelas torradas a temperaturas menores apresentaram os menores valores de HHV, enquanto o blend de borras torradas e não torradas obteve 22,6 MJ/kg. (AFOLABI; SOHAIL; CHENG, (2020) caracterizaram um blend de 80:20% arábica e robusta, com valores de HHV de 39,74 e 44,68 MJ/kg para a torra aos 220 °C por 3 e 5 horas, respectivamente. (FERMOSO; MAŠEK, (2018) relacionaram o maior HHV da borra de café, de 23,4 MJ/kg, ao alto teor de carbono, ligado às proporções de lignina, celulose e hemicelulose. Já CODIGNOLE LUZ et al., (2018) verificaram que a carbonização hidrotérmica de uma borra composta por 90% arábica e 10% robusta, realizada a 180 °C, 220 °C e 250 °C por 1 hora, resultou em aumentos nos valores de LHV e HHV conforme a temperatura de carbonização aumentava.

DE FREITAS et al., (2023) mapearam o potencial de geração elétrica brasileiro a partir dos resíduos de borra de café gerados. Por meio de pesquisas de valores de HHV teóricos, calculou-se que, em 2020, o potencial de geração de energia elétrica, considerando os resíduos de borra de café da indústria de café solúvel, era de 0,94 TWh/ano ou 107,21 MW. Dentre os valores teóricos de HHV pesquisados, Barbanera & Muguerza (2020) apresentaram valores entre 25,30 e 29,50 MJ/kg, os maiores dentre os encontrados por De Freitas et al (2023).

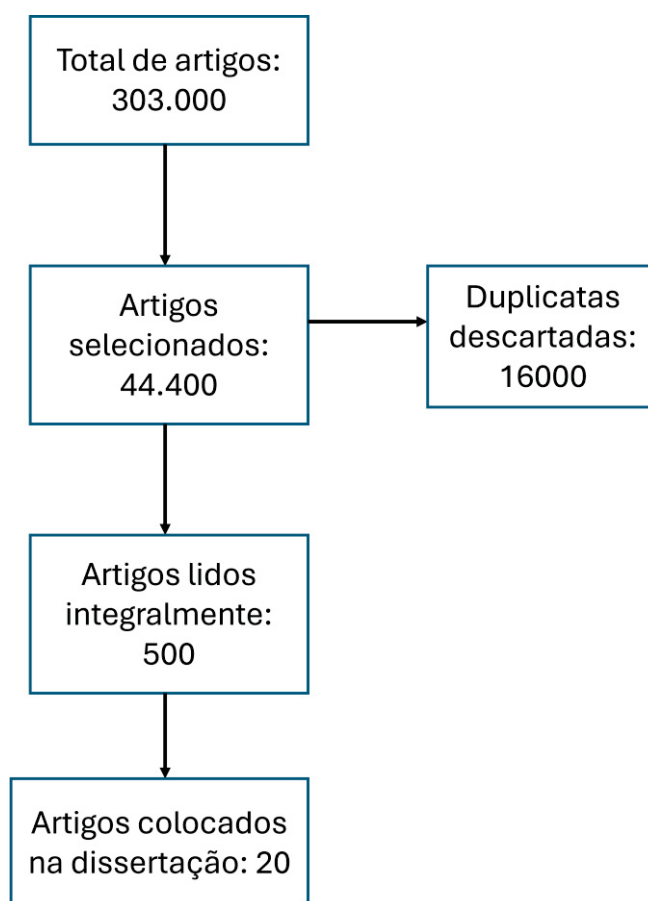
Em termos de HHV, conforme os experimentos citados nesta seção, quanto maior o teor de carbono da biomassa, maior a capacidade calorífica superior. Como foi observado que o teor de carbono na borra de café é maior do que na serragem de pinho, por exemplo, quanto maior a quantidade de borra de café nos pellets, maior a capacidade calorífica deles.

4.1.10 Pesquisa bibliográfica sobre biorrefinarias gerais

A pesquisa com as palavras-chave “*biomass biorefinery*” apresentou 303.000 resultados, sem o uso de nenhum filtro. A figura a seguir apresenta o resultado

quantitativo da pesquisa feita com a metodologia PRISMA sobre biorrefinarias gerais:

FIGURA 19 – RESULTADOS QUANTITATIVOS DA PESQUISA FEITA COM A METODOLOGIA PRISMA SOBRE BIORREFINARIAS GERAIS.



Fonte: A autora (2025)

A figura anterior indica que, comparando o número total de artigos e a quantidade de artigos selecionados (44.400), a partir de 2010 até 2025 foi publicada uma pequena parcela do total de artigos encontrados com as palavras-chave. Entre as etapas de artigos selecionados e artigos lidos integralmente estão os critérios de seleção, também utilizados na leitura individualizada de cada artigo. O número de artigos selecionados inclui diversas matérias-primas, além disso indica que o uso de microalgas é frequente em biorrefinarias.

A tabela a seguir apresenta as diferentes biomassas que podem ser utilizadas como matéria-prima em uma biorrefinaria:

TABELA 20 – BIOMASSAS UTILIZADAS EM BIORREFINARIAS

Biomassa	Fonte:
Madeira	Liu <i>et al.</i> (2012)
Oliveira	Romero-Garcia <i>et al.</i> (2014)
Bagaço de cana	Ghosh <i>et al.</i> (2015)
Microalga	Moreno-Garcia <i>et al.</i> (2017)
Microalga	Maurya <i>et al.</i> (2016)
Algas	Javed <i>et al.</i> (2022)
Resíduos de banana	Redondo-Gomez <i>et al.</i> (2020)
Alimentos prebióticos	Pinalez-Marques <i>et al.</i> (2021)
Alcachofra de Jerusalém	Long <i>et al.</i> (2016)
Talos de algodão	Sahoo <i>et al.</i> (2016)
Óleo de palma	Ali <i>et al.</i> (2015)
Pó de álamo amarelo	Labbé <i>et al.</i> (2012)
Arroz	Le <i>et al.</i> (2022)
Raquis de dendê	Cardona Alzate, Toro, Peña (2018)
Fonte: A autora (2025)	

A tabela anterior apresenta as diferentes matérias primas que já foram aplicadas em biorrefinarias ou em projetos conceituais de biorrefinarias. Estes podem tanto ser resíduos do processamento de uma biomassa ou a própria biomassa.

A pesquisa sobre biorrefinarias foi essencial para entender os diferentes tipos existentes, além de projetos e processos relacionados à biomassa, tanto lignocelulósica quanto de outras origens. A revisão contribuiu para identificar técnicas já aplicadas a diversas matérias-primas, destacando métodos de processamento da biomassa e categorizando os produtos finais obtidos, como biocombustíveis, materiais e produtos

químicos. Como a forma de processamento dos materiais lignocelulósicos é semelhante, essa é uma das maneiras possíveis de classificação na escolha dos processos utilizados. A hidrólise enzimática facilita a quebra das moléculas, seguida da etapa de fermentação, visando produzir principalmente etanol. A lignina também é um produto que pode ser aplicado na indústria e pode ser extraído de qualquer matéria-prima lignocelulósica.

As formas de combustível produzidas podem ser etanol, biodiesel, bio-óleo, biogás, entre outros. A obtenção de óleo, ou a hidrólise e fermentação, podem resultar em biodiesel e etanol, respectivamente.

Chandra *et al.* (2019) souberam aproveitar a microalga e obtiveram lipídeos, corantes, biocombustível e proteína, enquanto Nanda *et al.* (2015) e Maity (2015) focaram somente na produção de biocombustíveis.

(FILOTE *et al.*, (2019) utilizaram resíduos de microalgas visando a adsorção de Pb (II), um dos contaminantes presentes em uma solução aquosa. OSMAN *et al.*, (2019) e ROMERO-GARCÍA *et al.*, (2014) tiveram foco na produção de combustíveis. Osman *et al.* (2019) produziram metano a partir da fermentação dos resíduos da microalga e Romero-García *et al.* (2014) produziram etanol a partir de resíduos da oliveira.

GHOSH *et al.*, (2015) produziram etanol, assim como Romero-García *et al.* (2014), porém, com o uso de bagaço de cana em um projeto integrado de biorrefinaria. Foram utilizadas as pentoses e hexoses para produzir etanol, furfural e eletricidade.

(NANDA *et al.*, (2015), (Maity, 2015) e (CHANDRA *et al.*, (2019) abordam um panorama geral das biorrefinarias: conceitos existentes, as diferentes biomassas que podem ser trabalhadas e os desafios que surgem ao longo desse processo. O diferencial de Chandra *et al.* (2019) é que a proposta é uma biorrefinaria integrada que utiliza algas como biomassa. Ampliando a abordagem teórica, HOANG *et al.*, (2021) comentam sobre o pré-tratamento ácido aplicável para biomassas lignocelulósicas.

Assim como Chandra *et al.* (2019), Tedesco e Stokes (2017) também propõem o uso de algas marinhas em uma biorrefinaria integrada, ampliando o estudo para seis espécies diferentes. O produto obtido é o biogás, após o processo de fermentação.

Gonzalez-Garcia, Gullon e Moreira (2018) e (CARMONA-CABELLO *et al.*, (2018) utilizam como fundamento para as biorrefinarias o impacto ambiental gerado pelo descarte de resíduos e a tentativa de implementação da economia circular. (GONZALEZ-GARCIA; GULLÓN; MOREIRA, (2018) utilizaram resíduos de beterraba como biomassa e Carmona-Cabello *et al.* (2018) usaram restos de alimentos, ambos resíduos

domésticos.

Analisando a Tabela 29 disponibilizada no Apêndice, que apresenta os resultados completos obtidos com a pesquisa realizada, é possível verificar que diversas biomassas podem ser aplicadas em biorrefinarias, sejam de origem industrial, agrícola ou doméstica. O uso de alguns processos pré-estabelecidos para biomassas lignocelulósicas pode facilitar o processamento, por exemplo, o pré- tratamento ácido. Referente aos produtos obtidos, há uma vasta possibilidade, por exemplo, energia elétrica, diferentes tipos de biocombustíveis, até adsorventes de metais e contaminantes presentes em efluentes e soluções aquosas.

4.1.11 Pesquisa de biorrefinarias que utilizam borra de café

Existem diversas formas de processamento de borra de café, com vários possíveis produtos. Geralmente a produção de biodiesel é um dos processos mais visados, o que é verificável na tabela apresentada no apêndice observando os autores EL HAJJAJI et al., (2020), KAFKOVÁ et al., (2023) e KARMEE, (2018).

RUIZ et al., (2020) realizaram uma análise crítica de três diferentes cenários de biorrefinarias alimentadas por borra de café, concluindo que é possível gerar energia, produzir biocombustíveis e recuperar compostos de alto valor agregado. NIZAMI et al., (2017) produziram bioetanol e biogás, além de obter óleo contendo moléculas bioativas.

Considerando também produtos alternativos, não somente para fins combustíveis, ALEX MARVIN et al., (2012) produziram pigmento e extrato natural, concluindo que era um processo mais rentável do que a produção de energia elétrica.

KAZI et al., (2011) optaram por valorizar a borra de café empregando a extração convencional e a extração com fluido supercrítico, obtendo o óleo e o resíduo sólido desengordurado, com possibilidade de uso em formulações alimentares. MONCADA; POSADA; RAMÍREZ, (2015) obtiveram óleo, assim como Kazi *et al.* (2011), porém, com um processo mais complexo, produziram manno-oligossacarídeos e D-manose. O argumento utilizado é que, quanto maior a variedade de produtos gerados, melhor a economia do processo de produção de uma biorrefinaria.

Utilizando processos diferentes, (Rajesh Banu et al., 2021) estudaram os efeitos da liquefação ácida em temperaturas moderadas. O poliálcool obtido, um carboidrato, foi quimicamente caracterizado.

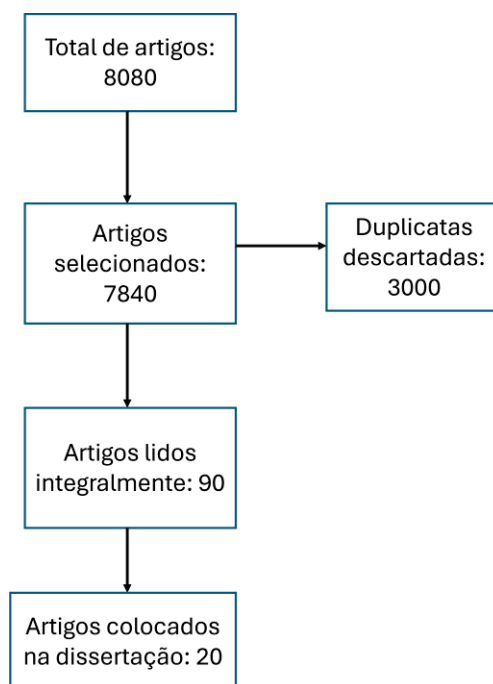
Como Moncada *et al.* (2015), PRADHAN et al., (2024) propuseram um processo

de biorrefinaria integrada que, ao final, gera biodiesel e briquetes. Ou seja, por meio de etapas sequenciais, os resíduos sólidos podem ser valorizados quase em sua totalidade.

(Matrapazi; Zabaniotou, 2020) obtiveram óleo, assim como outros autores, entretanto, o foco foi na quantidade de cafeína e nos ácidos graxos presentes no óleo. Ainda dando destaque ao óleo como produto de uma biorrefinaria, TINOCO CAICEDO et al., (2023) fracionaram o óleo obtido através da pirólise. Verificaram que o uso de solventes na extração tem impacto positivo e que o fracionamento permite a recuperação de diversos compostos em fases diferentes.

A figura a seguir apresenta o resultado quantitativo da pesquisa realizada com a metodologia PRISMA, utilizando as palavras-chave “*spent coffee grounds biorefinery*” para esse tópico:

FIGURA 20 – RESULTADOS QUANTITATIVOS DA PESQUISA FEITA COM A METODOLOGIA PRISMA SOBRE BIORREFINARIAS COM BORRA DE CAFÉ.



Fonte: A autora (2025).

Analisando a figura anterior, observa-se que a quantidade de artigos com propostas de biorrefinarias com borra de café é bem menor que a quantidade encontrada de biorrefinarias gerais, porém, permite ainda identificar diversas propostas de biorrefinarias, com produtos aplicáveis tanto às indústrias farmacêutica, cosmética e de combustíveis. A Tabela 30 apresenta os resultados completos obtidos sobre as

biorrefinarias de borra de café e está disponibilizada no Apêndice.

4.1.12 Biorrefinarias de diferentes matérias primas com destaque para fatores econômicos e energéticos

A Tabela 31 apresenta os resultados da pesquisa realizada e está disponibilizada no Apêndice. ALEX MARVIN et al., (2012) ressaltaram que aproximadamente 50% dos custos são referentes a biorrefinaria, ou seja, o índice de complexidade do processamento da biomassa é um fator importante na determinação da viabilidade econômica do projeto. DEL POZO et al., (2020) utilizaram a casca de café e obtiveram 242 t de ácido gálico por ano, enquanto (De Oliveira e Silva et al., 2023) produziram briquetes com a mesma matéria prima e obtiveram rendimento maior, além de menor complexidade de processamento da biomassa.

Tinoco Caicedo *et al.* (2023) produziram energia e o projeto apresenta eficiência energética de 52%. Já Bhowmick, Sarmah, Sen (2018) utilizaram microalga e material lignocelulósico combinados, produzindo metano e etanol, e concluíram que o uso do milho e do trigo favorecem a produção de energia.

Nizami *et al.* (2017) constataram que, se a quantidade de resíduos sólidos gerados fosse aproveitada como fonte de produção de energia renovável, quase dois milhões de barris de petróleo poderiam ser economizadas.

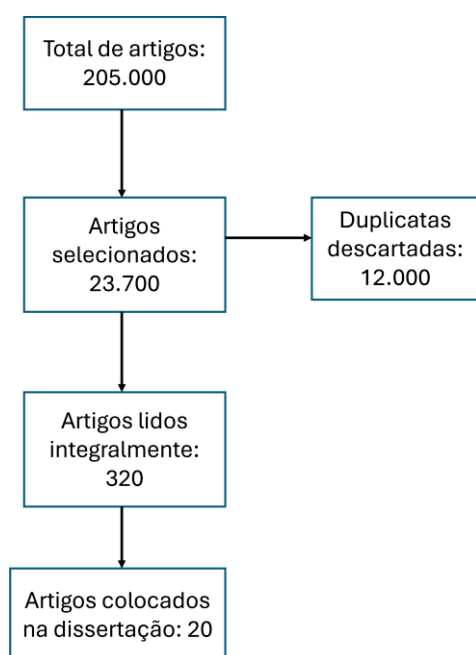
Chandra *et al.* (2019) tiveram um diferencial que foi a avaliação do Índice de Complexidade de Biorrefinaria, utilizando algas para recuperar múltiplos produtos a partir de um único processo operacional. A viabilidade depende de muitos fatores, por exemplo, o rendimento do processo. Karmee (2018) trabalhou com a borra de café e obtiveram até 83% em biodiesel. Outra análise importante para a viabilidade é o cálculo do valor mínimo de compra dos produtos. Kazi *et al.* (2011) realizaram esse cálculo na produção de dimetilfurano e hidroximetilfurfural, por meio do método do fluxo de caixa descontado. Pradhan *et al.* (2024) avaliaram o valor do retorno sobre o investimento, mostrando que o local de implementação da biorrefinaria, qual a matéria-prima e qual a fonte dela são fatores que devem ser considerados nessa análise. Matrapazi e Zabaniotou (2020) realizaram análises de viabilidade econômica em uma biorrefinaria que executa pirólise de resíduos alimentares, obtendo resultados positivos.

Assim como Karmee (2018), TINOCO-CAICEDO et al., (2021) trabalharam com borra de café e calcularam o custo total de investimento para a produção de gás de

síntese e biodiesel. Tinoco Caicedo *et al.* (2023) utilizaram a mesma matéria-prima, avaliando as melhores condições de eficiência energética e confirmando a viabilidade técnica e econômica. (LEE et al., (2021) produziram biocarvão de alta eficiência térmica a um custo baixo por quilograma. Silva *et al.* (2023) também elaboraram um projeto de biorrefinaria com borra de café, viável economicamente e que tenha como produto os briquetes.

A figura a seguir apresenta os resultados quantitativos da pesquisa com a metodologia PRISMA sobre análise econômica em biorrefinarias, utilizando as palavras-chave “*biorefinery economic analysis*”.

FIGURA 21 – RESULTADOS QUANTITATIVOS DA PESQUISA SOBRE BIORREFINARIAS COM DIFERENTES MATÉRIAS-PRIMAS COM DESTAQUE PARA FATORES ECONÔMICOS E ENERGÉTICOS



Fonte: A autora (2025)

A partir da figura anterior, verifica-se que há diversos artigos com as análises econômicas de biorrefinarias propostas. A grande maioria dos artigos descreveu ferramentas de análise econômica para biorrefinarias, por exemplo, índices de complexidade e custos, porém, os que realizaram a análise econômica de biorrefinarias já existentes ou propostas no próprio artigo são poucos. Geralmente essa análise é feita com o auxílio de algum software ou mais de um, fornecendo custos de equipamentos, de instalação, utilidades, entre outros.

4.1.13 Análise crítica das pesquisas realizadas com a metodologia PRISMA

As técnicas de extração e reação apresentadas (convencional, com fluidos supercríticos, extração assistida por ultrassom, extração assistida por micro-ondas, extração com líquido pressurizado, hidrotermoliquefação e pirólise) são indicadas para diferentes compostos de interesse, seja na borra, na casca ou nos grãos de café.

Referente às biomassas utilizadas na produção de biogás, Alexandria, Oliveira e Carneiro (2024) avaliaram diferentes matérias-primas para ver a quantidade de biogás produzida, concluindo que a casca de laranja produz mais biogás do que as outras matérias-primas apresentadas, assim como a casca de macaúba. A porcentagem de gás metano no gás produzido apresenta valores acima de 50% para a casca de laranja, porém, não para a casca de macaúba. E (SHARMA et al., (1988) avaliaram a granulometria de diferentes biomassas na produção de biogás, constatando que partículas menores, quando passam por digestão anaeróbia, produzem mais biogás por kg de sólido.

É possível concluir que, a partir dos autores mencionados anteriormente, a redução da granulometria da biomassa é indicada para aumento da produção de biogás, assim como escolher a biomassa adequada, que pode ser a casca de frutas.

Referente aos valores de HHV (capacidade calorífica superior), os pellets que eram majoritariamente compostos por borra de café apresentavam capacidades caloríficas maiores do que os pellets que continham serragem de pinho ou outros materiais. Isso é explicado devido ao maior teor de carbono presente na borra de café, diferentemente de outras biomassas.

Cada uma das técnicas apresenta um grau de complexidade, sendo que a extração convencional tem o menor, por ser um processo no qual o controle das variáveis (pressão e temperatura) não é tão rigoroso, não exigindo, consequentemente, muitos aparatos tecnológicos. A extração com fluidos supercríticos, assim com a extração com líquidos pressurizados, requer controle da pressão e temperatura, exigindo, portanto, maior quantidade de aparato tecnológico. As extrações assistidas por ultrassom e por micro-ondas possuem duas variáveis extras: a potência e a frequência, que aumentam a complexidade do processo. A hidrotermoliquefação e a pirólise são processos semelhantes, nos quais o processo é em batelada e as variáveis de processo são similares às de uma extração convencional.

É possível diminuir o grau de complexidade das técnicas de extração, por meio de modificações de equipamento, automatizando-os, além do uso de solventes menos nocivos. Pode-se também reduzir o número de etapas do processo, de acordo com o que está sendo analisado, assim como aplicar pré-tratamentos que facilitem o processo de extração. Por fim, identificar temperaturas e tempos de extração otimizados reduzem a quantidade de controle necessário ao processo.

Referente aos custos da extração/reação, quanto maior a necessidade de aparato tecnológico, maior o custo energético e operacional, por isso, os processos de extração assistida por ultrassom e extração assistida por micro-ondas têm custo maior do que a extração soxhlet, por exemplo. As extrações/reações pressurizadas também demandam equipamentos capazes de aguentar altas pressões, aumentando o custo de capital do equipamento utilizado. Já a pirólise requer uma secagem prévia da biomassa, acarretando aumento no custo total do processo.

O custo energético, quando avaliado a longo prazo, é maior para as reações e para as extrações soxhlet e pressurizadas, enquanto para extrações que ocorrem em tempos menores esse custo torna-se reduzido também a longo prazo.

Quanto aos solventes utilizados, a extração com fluido supercrítico utiliza solventes “verdes”, enquanto a extração convencional geralmente utiliza solventes orgânicos, por exemplo, hexano. As extrações assistidas por ultrassom e por micro-ondas costumam utilizar solventes polares, como água e etanol, assim como as extrações com líquido pressurizado e a hidrotermoliquefação. Portanto, do ponto de vista ambiental, a extração convencional é contraindicada.

O *scale-up* dos processos, no caso da extração convencional, torna-se mais difícil, devido ao uso de solventes orgânicos e da grande quantidade de solvente empregada em relação a biomassa. ANDERSON, (2005) elaborou um processo simplificado de extração de óleos vegetais por solvente, o qual contém nove etapas, incluindo preparação, extração, refino alcalino, branqueamento, entre outras, além de LANDUCCI et al., (2011) reportarem a liberação de vapores tóxicos durante a extração. A extração assistida por ultrassom e por micro-ondas traz mais um desafio para a adaptação dos processos: garantir a potência e a frequência de cada processo por um determinado intervalo de tempo. Já as extrações/reações pressurizadas requerem a construção de equipamentos de espessura considerável para a manutenção de altas pressões e/ou temperaturas, dificultando o *scale-up*.

A questão da escolha da matéria-prima para uma biorrefinaria, após a análise de

biorrefinarias com bagaço de cana, microalgas, borra de café, entre outras, requer alguns critérios. O primeiro é a disponibilidade na quantidade adequada ao processamento da biorrefinaria, o segundo é o preço de aquisição e o terceiro, dentre outros critérios possíveis, é o local de aquisição, pois o preço de aquisição é um fator que deve ser analisado em conjunto ao local de aquisição.

A seguir serão apresentados três gráficos indicando a quantidade de publicações anuais no período pesquisado sobre todos os temas explorados com o auxílio da metodologia PRISMA.

GRÁFICO 3 – COMPARAÇÃO DA QUANTIDADE DE PUBLICAÇÕES NO PERÍODO SELECIONADO E SEM O CRITÉRIO DE ANO DE PUBLICAÇÃO.

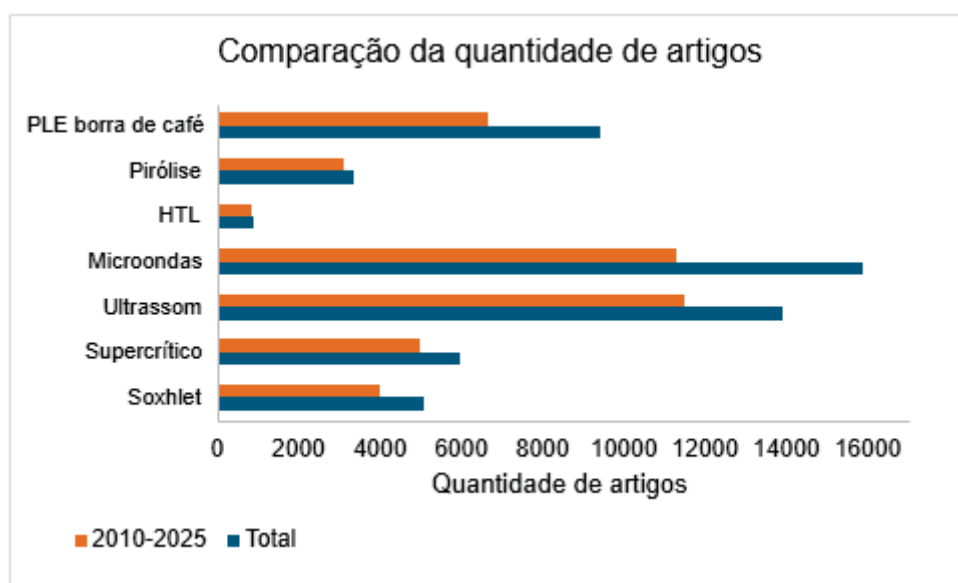
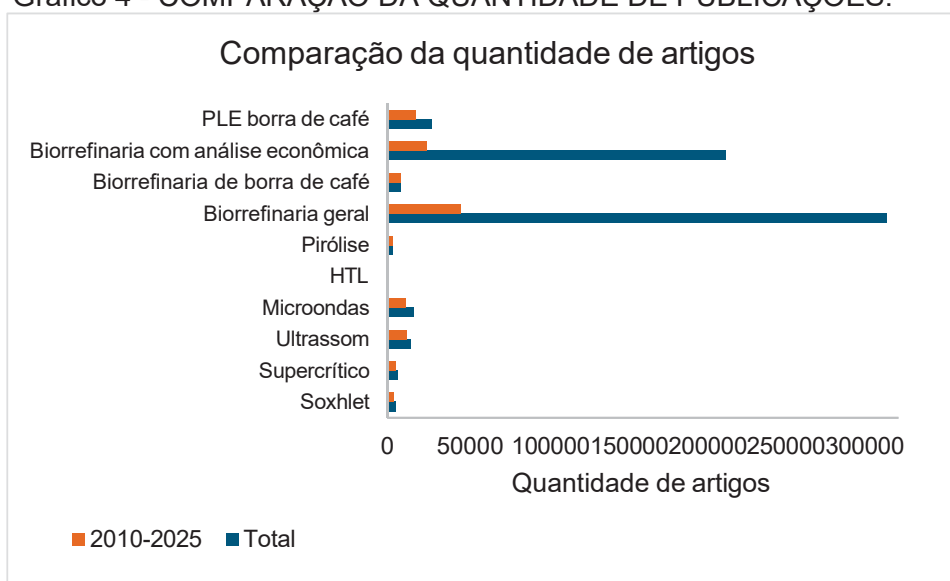


Gráfico 4 - COMPARAÇÃO DA QUANTIDADE DE PUBLICAÇÕES.



Fonte: A autora (2025)

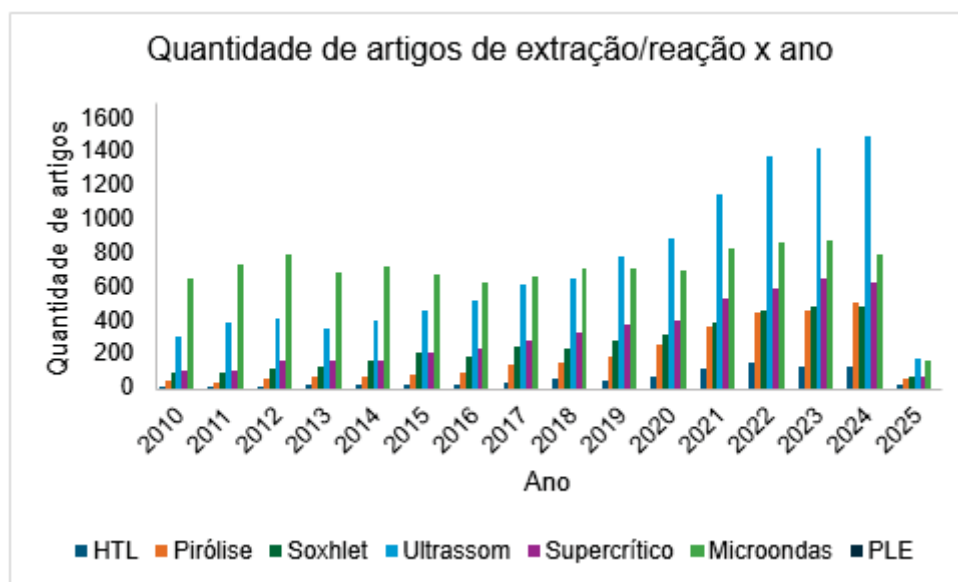
Analisando o gráfico anterior, observa-se que o número de publicações feitas com o tema da hidrotermoliquefação e da pirólise com a borra de café é bem menor em comparação com outros temas pesquisados, principalmente as biorrefinarias. Somente o tema das biorrefinarias com borra de café que apresenta número reduzido de publicações, fator que levou à proposição de processos que podem ser realizados em uma biorrefinaria.

Observando os resultados dos temas biorrefinaria geral e biorrefinaria com análise econômica, conclui-se que esses temas já eram de interesse antes do ano de 2010, início do período pesquisado nesta dissertação. Ou seja, outras matérias-primas, por exemplo, o bagaço de cana e as microalgas já eram utilizadas para esta finalidade, conforme observado na Tabela 20.

O gráfico apresentado a seguir compara a quantidade de artigos publicados sobre extrações/reações anualmente, de 2010 a 2025. É possível observar, analisando o gráfico, que as publicações referentes às extrações convencionais, pirólise e hidrotermoliquefação apresentam menor número de publicações em comparação com a extração com líquido pressurizado, a extração assistida por ultrassom e a extração assistida por micro-ondas. Uma possível justificativa é que as extrações assistidas por ultrassom e por micro-ondas geralmente são destinadas à extração de compostos fenólicos, cafeína e atividade antioxidante, enquanto as outras com menor número de artigos publicados destinam-se à extração de óleo, tema esse que já é estudado previamente.

O menor número de publicações encontrado sobre os temas de pirólise e hidrotermoliquefação motiva a pesquisa e o estudo aprofundado sobre estas temáticas.

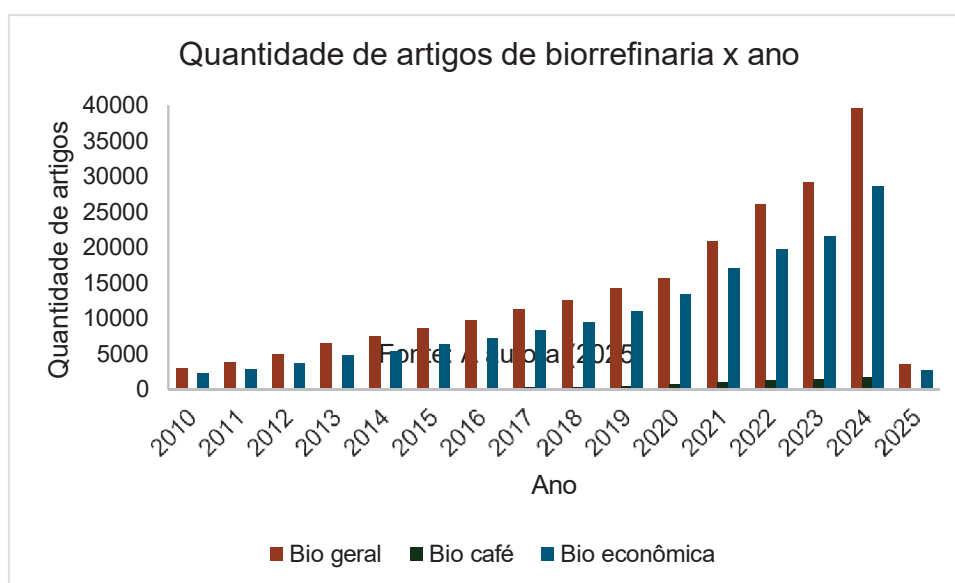
GRÁFICO 5 – COMPARAÇÃO DA QUANTIDADE DE PUBLICAÇÕES ANUAIS SOBRE OS TEMAS DE EXTRAÇÃO/REAÇÃO COM BORRA DE CAFÉ.



Fonte: A autora (2025)

O gráfico que será apresentado a seguir compara as publicações anualmente, no período de 2010-2025, sobre as temáticas referentes as biorrefinarias.

GRÁFICO 6 - Comparação da quantidade de publicações anuais sobre os temas de biorrefinarias.



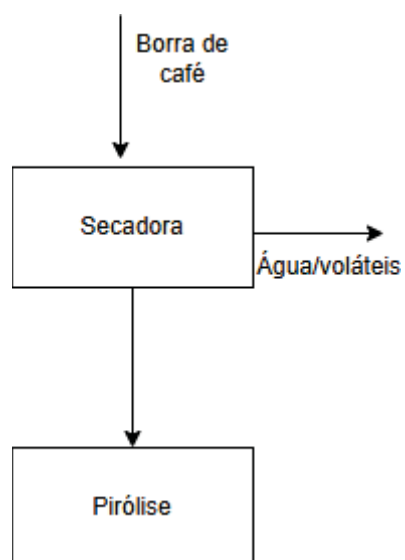
Conclui-se, analisando o gráfico anterior, que para as três temáticas a quantidade de publicações realizadas aumentou ao longo dos anos, sendo mais expressivo o número de publicações sobre biorrefinarias gerais, ou seja, com qualquer biomassa. Somente a quantidade de publicações sobre biorrefinarias com borra de café é bem menor em comparação com os outros temas, com resultados diversos, porém, com área disponível para mais pesquisas.

Uma pequena parte da borra de café já é reaproveitada de maneira doméstica ou industrial, na geração de energia, porém, a aplicação desse material em biorrefinarias pode ser responsável pela recuperação de compostos aplicáveis em indústrias farmacêuticas, cosméticas, entre outras.

4.2 PROPOSTAS DE PROCESSO

Os diagramas de bloco apresentados nas figuras a seguir apresentam as propostas de processo elaboradas após a realização da metodologia PRISMA. Para escolher a proposta mais vantajosa, é necessário identificar a sequência de processos que gera melhores rendimentos em todas as etapas, por exemplo, se a umidade de entrada da biomassa que vai para o processo seguinte não é prejudicada pelo resultado do processo anterior. A escolha de uma proposta mais vantajosa, na dissertação, foi feita somente com base em uma análise técnica, porém, o uso de uma análise econômica pode tornar essa análise mais completa. Vale ressaltar que a proposta de processo mais vantajosa é a quarta proposta, por considerar a umidade de entrada dos processos e a ordem das etapas realizadas.

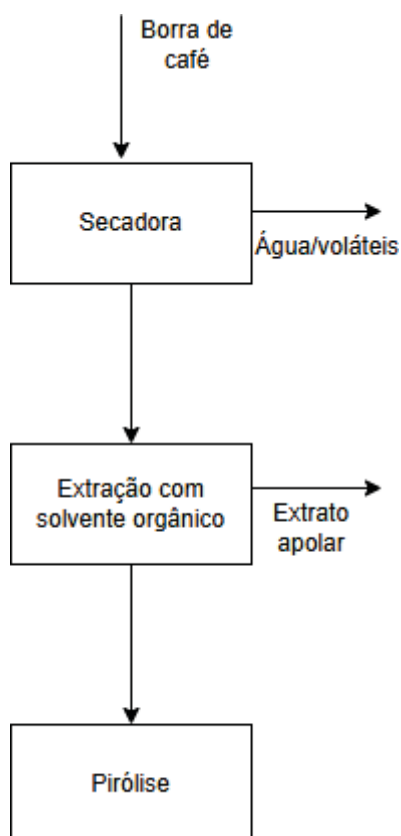
FIGURA 22 – PRIMEIRA PROPOSTA DE PROCESSO



Fonte: A autora (2025)

A secagem é uma operação unitária utilizada para remoção da umidade, que foi aplicada como um pré-tratamento da borra de café nos trabalhos pesquisados com a metodologia PRISMA que realizaram a pirólise. Bok *et al.* (2012) e Kelkar *et al.* (2015) realizaram a secagem e mediram a umidade final da biomassa, que estava entre 0% e 3%. De acordo com CHANDRASEKARAN; RAMACHANDRAN; SUBBIAH, (2018), foi verificado que, com 10% de umidade, o rendimento do biocarvão tendia a diminuir, enquanto dos outros produtos se mantinha constante.

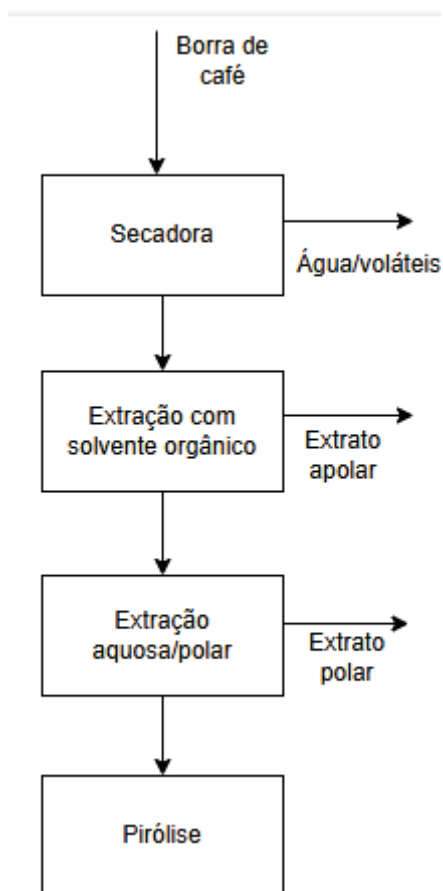
FIGURA 23 – SEGUNDA PROPOSTA DE PROCESSO



Fonte: A autora (2025)

SANTOS, (2024) realizou diversas extrações Soxhlet com a borra de café seca e úmida, percebendo que os rendimentos de extração caíram de $21,4 \pm 0,2$ para $12,7 \pm 1,3\%$ com o hexano como solvente. Pode-se concluir que o teor de água interfere negativamente no rendimento de extração com solventes apolares, por exemplo, o hexano. Essa informação justifica a secagem antes da extração com solventes orgânicos. Também antes da pirólise, a secagem beneficia o processo, aumentando o rendimento em biocarvão, conforme citado por Chandrasekaran, Ramachandran e Subbiah (2018). Os dados encontrados por estes autores indicam que a ordem do processo é favorável ao aumento de rendimentos em cada etapa, porém, é possível que o rendimento em bio-óleo da pirólise seja menor devido ao uso de solventes apolares na etapa anterior.

FIGURA 24 – TERCEIRA PROPOSTA DE PROCESSO.

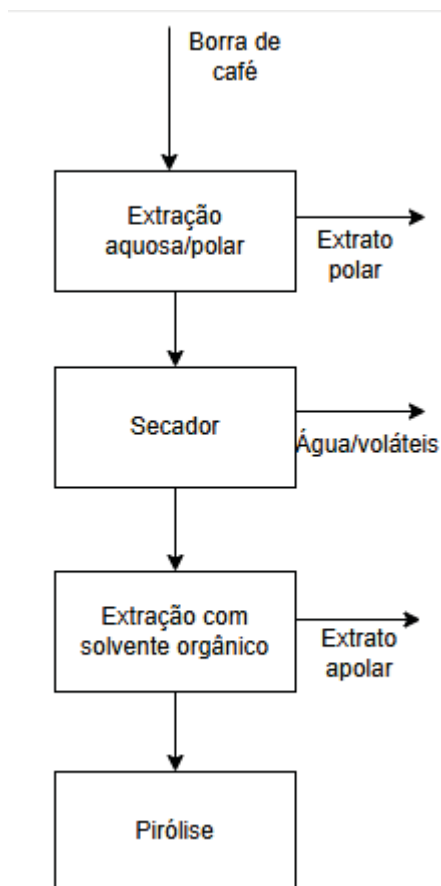


Fonte: A autora (2025)

A ordem dos processos na figura anterior tem como objetivo aumentar o rendimento de extração das etapas de extração e de pirólise. Como apresentado por Santos (2024), a secagem é benéfica para a etapa de extração com solvente orgânico, porém, em extrações aquosas/polares, o uso de etanol, por exemplo, gerou rendimentos de $26,5 \pm 0,3\%$ com a borra seca e $28,1 \pm 0,2\%$ com a borra úmida. Ou seja, nessa ordem de processos apresentada na figura anterior, a extração aquosa não terá todo o seu potencial de recuperação de extrato, devido a secagem. A pirólise, nessa configuração, pode não ser favorecida, devido ao fato de que a etapa anterior é uma extração aquosa e a presença de umidade prejudica a queima controlada da biomassa.

A seguir, será apresentada a quarta proposta de processo.

FIGURA 25 – QUARTA PROPOSTA DE PROCESSO.



Fonte: A autora (2025)

Na primeira etapa, a borra de café entra em uma extração aquosa/polar, a qual pode ser feita com os seguintes solventes: água, etanol, entre outros. O produto dessa extração é um extrato que pode conter os seguintes compostos: fenólicos, ácidos clorogênicos, cafeína, entre outros. Essa extração aquosa/polar pode ser feita através das seguintes técnicas de extração: extração soxhlet, extração assistida por ultrassom, extração assistida por micro-ondas e extração com líquido pressurizado. A próxima etapa é a secagem, que tem por objetivo remover a umidade, de forma que o valor final esteja entre os 10%. De maneira geral, alguns compostos voláteis, dependendo da temperatura de secagem, podem ser retirados também.

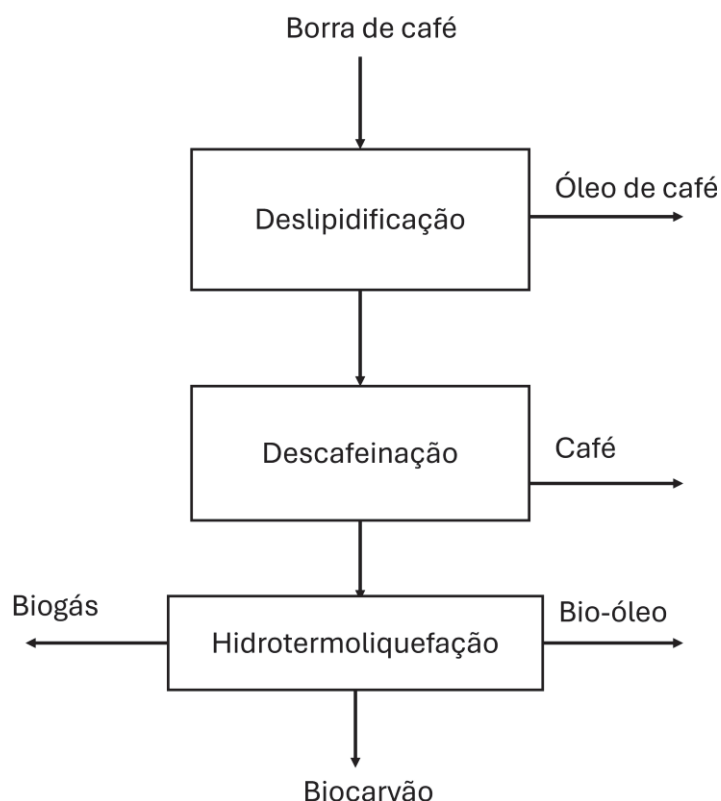
A extração com solvente orgânico, que vem logo depois da secagem, pode ser feita com hexano, por exemplo, em uma extração soxhlet ou por extrações assistidas por ultrassom ou micro-ondas. O produto desta etapa é um extrato que geralmente contém os lipídeos existentes na borra de café.

A última etapa é a pirólise, um processo que, se ocorrer com a umidade da

biomassa acima de 10%, diminui a quantidade de bio-óleo produzido. Desse processo, tem-se de produtos o biogás, bio-óleo e o biocarvão. A biomassa é convertida nestes três produtos, com diferentes rendimentos de cada um conforme a temperatura da reação: quanto maior a temperatura, menor a quantidade de bio-óleo e maior a quantidade de biogás, porém, o HHV do bio-óleo é maior. Portanto, visando obter bio-óleo, é necessário fazer a reação em temperaturas intermediárias. A ordem de processos apresentada na figura anterior é favorável para a extração aquosa polar, pois a umidade da biomassa favorece o rendimento do extrato polar. Em seguida, a etapa de secagem favorece o rendimento da extração com solvente orgânico e da pirólise, com maior quantidade de óleo obtida. Conforme observado por Santos (2024), a extração polar/aquosa com a borra úmida gera maiores rendimentos e Kelkar *et al.* (2015) realizaram a pirólise com a biomassa contendo 3% de umidade, obtendo rendimentos em bio-óleo que variaram entre 57 e 61,5%.

Santos (2024) verificou também que o teor de água interfere negativamente nas extrações com solventes apolares, obtendo $12,7 \pm 1,3\%$ em óleo com a biomassa úmida. Assim como Al-Hamamre *et al.* (2012), os quais constataram esse fato, removendo a umidade da borra de café antes do uso de solventes apolares e obtendo 15% em óleo a partir da extração convencional com o hexano.

FIGURA 26 – QUINTA PROPOSTA DE PROCESSO



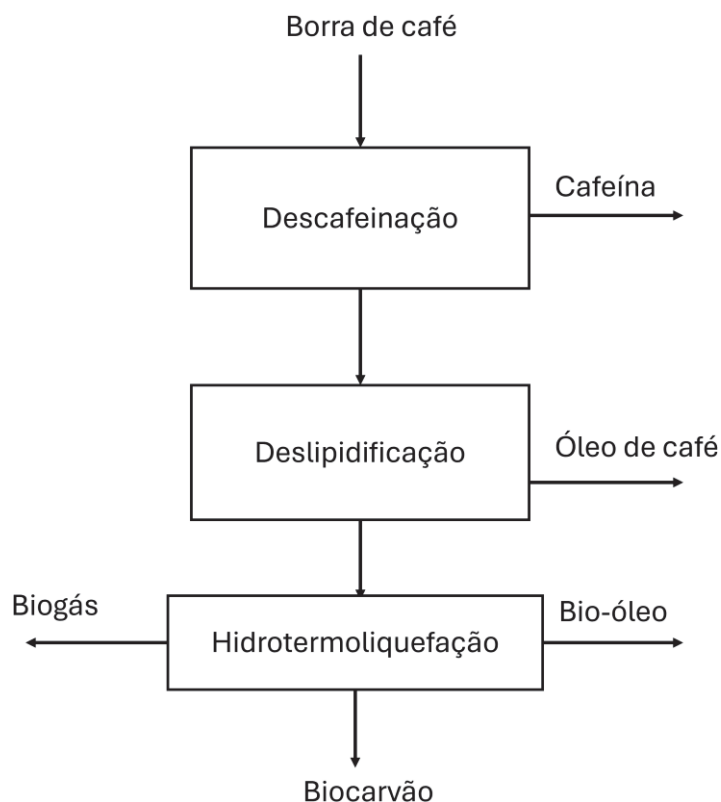
Fonte: A autora (2024)

A quinta proposta elaborada inicia com a etapa de deslipidificação, que pode ser realizada tanto através da extração convencional como pela extração com fluido supercrítico. Em cada possibilidade apresentada, o óleo obtido pode ter composições diferentes, porém, com perfis de ácidos graxos semelhantes. A etapa seguinte, de descafeinação, geralmente utiliza solventes polares e pode ser realizada através da extração assistida por ultrassom ou por micro-ondas, entre outras possibilidades.

Quando o processo de descafeinação é assistido ou por ultrassom ou por micro-ondas, é possível obter rendimentos de 98%, conforme o experimento realizado por RAHEEM et al., (2024). A extração da cafeína se deve ao fato de que esse composto é de alto valor agregado e é utilizado em diversas indústrias, por exemplo, a farmacêutica, de cosméticos, entre outras.

E, em seguida, a terceira etapa é a hidrotermoliquefação, da qual saem três produtos principais: biogás, bio-óleo e biocarvão. O rendimento do bio-óleo, quando a etapa de remoção do óleo é anterior à hidrotermoliquefação, apresenta rendimento menor do que esse processo como etapa única. A figura a seguir apresenta a sexta proposta elaborada:

FIGURA 27 – SEXTA PROPOSTA DE PROCESSO

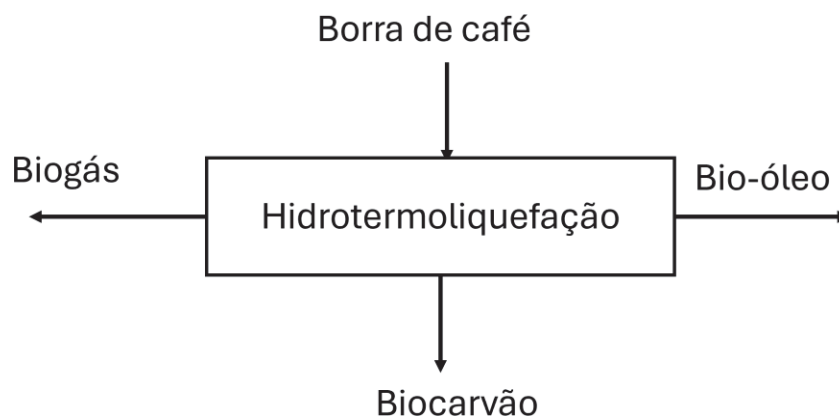


Fonte: A autora (2024)

A sexta proposta elaborada inicia com a descafeinação, seguida da deslipidificação. A troca da ordem dos processos pode gerar maior rendimento na etapa de descafeinação, pois, geralmente, são utilizados nestes processos solventes polares. Agora, dependendo do solvente utilizado na deslipidificação, o rendimento pode variar de acordo com a técnica de extração realizada nessa etapa. ANDRADE et al., (2012) e CAETANO; SILVA; MATA, (2012) obtiveram 15% e 21% de óleo, respectivamente, por meio da extração por Soxhlet, enquanto Calixto *et al.* (2014) obtiveram 93,4% de óleo, por meio da extração supercrítica, a 10 MPa. Vale ressaltar que o rendimento não é a única variável importante, pois não é a única que interfere no custo do processo.

Referente à etapa de hidrotermoliquefação, é possível afirmar que, com as etapas anteriores, a biomassa foi bem aproveitada durante todo o processo, permitindo que o que restou na biomassa seja convertido em biogás, bio-óleo e biocarvão. A figura a seguir apresenta o diagrama de bloco da sétima proposta de processo elaborada:

FIGURA 28 – SÉTIMA PROPOSTA DE PROCESSO



Fonte: A autora (2024)

A sétima proposta elaborada tem somente a etapa de hidrotérmica liquefação, devido à complexidade e a quantidade de condições que podem ser modificadas visando otimizar o processo. Todos os compostos que foram previamente recuperados em propostas anteriores participam da reação, possivelmente modificando a composição do bio-óleo.

Selecionando dois dos autores pesquisados, LIU et al., (2024) e (Yang et al., 2016), é possível verificar que foram usadas acetona e água de solvente, respectivamente, com rendimentos diferentes. O uso da água como solvente levou a rendimentos maiores, com tempos de retenção menores, porém, utilizando temperaturas maiores. Os rendimentos em biogás, bio-óleo e biocarvão dependem de fatores como a razão sólido: solvente, temperatura, pressão e o solvente escolhido, portanto, de acordo com o foco do processo, esses fatores devem ser ajustados. Outra variável é o valor de HHV do óleo obtido, que aumenta conforme a temperatura da reação.

4.2.1 Análise econômica qualitativa dos processos propostos (resultados)

Na primeira proposta de processo, o gasto energético pode ser considerado elevado, pois são realizadas duas operações, em sequência, que têm como objetivo extrair a umidade e produzir bio-óleo, biogás e biocarvão. Referente ao aparato tecnológico essencial para essa proposta, os equipamentos são o reator e o secador.

Na segunda proposta de processo, o grau de complexidade aumenta, pois é acrescida a extração com solvente orgânico. O gasto energético da proposta é elevado, porque há três processos que têm alto consumo de energia, seja pelos longos tempos de extração ou altas temperaturas. Referente aos equipamentos necessários, a secadora, o extrator e o reator podem ser automatizados, visando diminuir o grau de complexidade.

Na terceira proposta de processo, se a extração com solvente orgânico e a extração aquosa forem feitas através da extração soxhlet, o gasto energético torna-se elevado devido à necessidade de evaporação do solvente. Porém, se a extração aquosa/polar for feita através da extração assistida por ultrassom e/ou micro-ondas, há uma redução da quantidade de energia necessária. O grau de complexidade das extrações que utilizam radiação é menor, devido à redução do tempo de extração.

O grau de complexidade da terceira e da quarta proposta de processo não são tão diferentes, pois somente a ordem dos processos foi trocada. Visando diminuir o grau de complexidade, o uso de extrações com radiação tanto para as extrações aquosas e apolares pode ser mais indicado.

A quinta proposta de processo apresenta uma abordagem mais geral do que as anteriores, por isso, o grau de complexidade pode variar bastante de acordo com as técnicas de extração escolhidas. Se a deslipidificação for realizada através de uma extração soxhlet com solventes orgânicos, o gasto energético é maior do que o uso de uma extração com fluidos supercríticos. A extração com líquido pressurizado também pode reduzir o gasto energético. A descafeinação, devido à polaridade da cafeína, é feita com o uso de solventes polares. Neste caso, visando reduzir o grau de complexidade e o gasto energético, o uso de extrações assistidas por ultrassom e por micro-ondas é mais indicado.

A sexta proposta de processo é bem semelhante a anterior, portanto, as análises de grau de complexidade e gasto energético também são. Porém, a hidrotermoliquefação apresenta um gasto energético elevado, por ser feita em altas pressões e temperaturas. A redução do grau de complexidade nas propostas 5 e 6 pode ser feita através da simplificação e automatização dos controles dos equipamentos, além da identificação das condições otimizadas do processo.

A sétima proposta de processo é a mais simplificada das que foram elaboradas, pois só é realizada a hidrotermoliquefação. O solvente que geralmente é utilizado é a água, reduzindo o grau de complexidade. Porém, o gasto energético é elevado, devido

às condições de processo.

5 CONCLUSÃO

A crescente geração de resíduos a partir do consumo de café é um problema ambiental que deve ser solucionado, porém, os compostos presentes na borra do café podem ser aproveitados em outros produtos, por exemplo, medicamentos. Portanto, estudar uma maneira de obter esses compostos em diversos graus de pureza é interessante dos pontos de vista ambiental e econômico.

A proposição de um processo de extração de solutos em diferentes etapas de uma biorrefinaria requer o estudo prévio do que já foi publicado acerca do assunto previamente, além da seleção das condições ótimas de processo e da escolha dos processos de pré-tratamento e separação de componentes cruciais após cada etapa principal. Utilizar a metodologia PRISMA é uma maneira eficiente de verificar o que já foi elaborado por outros autores, visando também buscar condições otimizadas de extração de diversos compostos utilizando diferentes técnicas. A partir dela foi possível concluir que existem diversos compostos que podem ser extraídos, por diferentes processos, e a comparação das condições operacionais de processo dos autores pesquisados auxilia a encontrar condições otimizadas. Além disso, é necessário considerar o custo e a complexidade dos processos na escolha do mais indicado para determinada situação.

Dentre as sete propostas de biorrefinarias elaboradas, observou-se que as propostas que incluíam pirólise, na qual a secagem vinha antes da extração com solventes polares, não estavam nas condições ótimas. Visando otimizar as condições, foi necessário considerar a umidade de entrada adequada a cada um, além da recuperação dos compostos de interesse. Por isso, a pirólise é indicada como uma das etapas finais, após a extração dos solutos que podem ser recuperados em outras etapas. Porém, quando essa ordem foi trocada, tanto as extrações com solventes polares e apolares, além da pirólise, estavam nos valores de umidade mais adequados aos processos.

Já as propostas que incluíam a hidrotermoliquefação não necessitavam de secagem, portanto, o foco foi a descafeinação e a deslipidificação. A presença de água não é indicada na deslipidificação, porém, na etapa de descafeinação pode ser útil. Visando a otimização, a ordem apresentada de processos depende das técnicas de

extração selecionadas. A proposta com etapa única de hidrotermoliquefação não permite o mesmo aproveitamento da biomassa que as propostas que incluíam as etapas de remoção de lipídeos e cafeína. Ou seja, quando as três etapas são consideradas, o processo é tecnicamente mais vantajoso.

O crescente interesse nas temáticas de pirólise, hidrotermoliquefação e biorrefinarias, seja de borra de café ou outra matéria-prima, foi observado ao longo dos anos e indica como esses temas são promissores, além do quanto podem ser pesquisados. Como uma possível consequência desse feito, está a mudança de viés da sociedade em relação aos resíduos sólidos e à disposição deles.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para futuras pesquisas, realizar a análise técnico-econômica dos processos de biorrefinaria propostos utilizando simuladores de processo é uma possibilidade de continuar a desenvolver o estudo realizado neste trabalho. Além de identificar também os processos que geram maiores gastos energéticos e possíveis produtos que podem ser extraídos da borra de café.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ. Desempenho da Produção e do Consumo Interno. Período: Novembro/2019 a Outubro/2020. Realização da Área de Pesquisas da ABIC. 2020.

ABIC – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ. Disponível em: < www.abic.com.br >. Acesso em: 19 ago. 2024.

Ácido Palmítico tem destaque no setor cosmético. Disponível em: < Ácido Palmítico tem destaque no setor cosmético >. Acesso em: 07 dez 2024.

ABDULLAH, Mudafer; KOC, A. Bulent. Oil removal from waste coffee grounds using two-phase solvent extraction enhanced with ultrasonication. **Renewable Energy**, v. 50, p. 965-970, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.08.073>. Acesso em: 16 out. 2024.

ACEVEDO, Francisca; RUBILAR, Mónica; SCHEUERMANN, Erick; UQUICHE, Edgar. Spent Coffee Grounds as a Renewable Source of Bioactive Compounds. **Journal of Biobased Materials and Bioenergy**, v. 7, p. 1-9, 2013. Disponível em: [07JBMBE-1369](https://doi.org/10.1016/j.jbmb.2013.06.001). Acesso em: 12 out. 2024.

AFOLABI, Oluwasola O.D.; SOHAIL, M.; CHENG, Yu-Ling. Optimisation and characterisation of hydrochar production from spent coffee grounds by hydrothermal carbonisation. **Renewable Energy**, v. 147, p. 1380-1391, mar. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.098>. Acesso em: 10 abr. 2025.

AHANGARI, Behdad; SARGOLZAEI, Javad. Extraction of lipids from spent coffee grounds using organic solvents and supercritical carbon dioxide. **Journal of Food Processing and Preservation**, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2012.00757.x>. Acesso em: 20 out. 2024.

AKGÜN, Nalan A.; BULUT, Hakan; KIKIC, Irene; SOLINAS, Dario.1 Extraction

Behavior of Lipids Obtained from Spent Coffee Grounds Using Supercritical Carbon Dioxide. **Chemical Engineering & Technology**, v. 37, n. 10, p. 1-10, 2014. Disponível em: [Extraction Behavior of Lipids Obtained f20160219-8209-t14tyi-libre.pdf](#). Acesso em: 23 out. 2024.

ALEXANDRIA, Luan da Silva; OLIVEIRA, Brenda Monserrat Pie de; CARNEIRO, Tânia Forster. Produção de biogás, uma energia renovável a partir de biomassa. In: XXXII Congresso de Iniciação Científica da UNICAMP, 2024.

ALI, Ahmad Amiruddin Mohd; OTHMAN, Mohd Ridzuan; SHIRAI, Yoshihito; HASSAN, Mohd Ali. Sustainable and integrated palm oil biorefinery concept with value-addition of biomass and zero emission system. **Journal of Cleaner Production**, v. 91, p. 96- 99, 2015. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.12.030. Acesso em: 20 out. 2024.

ALMALLAHI, M. N.; ASAAD, S. M.; ROCHA-MENESES, L.; INAYAT, A.; SAID, Z.; ELGENDI, M.; EL HAJ ASSAD, M. A case study on bio-oil extraction from spent coffee grounds using fast pyrolysis in a fluidized bed reactor. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, 2023. Disponível em:< <https://doaj.org/article/14a71d81252747deafb29b606f68c9b9> >. Acesso em: 23 dez. 2024.

ALMEIDA, Ronei de; VIANNA, Marcelo Mendes; QUINTAES, Bianca Ramalho; BILA, Daniele Maia; CAMPOS, Juacyara Carbonelli. III-561 - CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO PRODUZIDO A PARTIR DE BORRA DE CAFÉ E LIXIVIADO DE ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS VIA PIRÓLISE: SEM/EDS E TERMOGRAVIMETRIA. In: Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES, 2021. Disponível em: [MELHORIA DA QUALIDADE DA ÁGUA TRATADA E AUMENTO DA CAPACIDADE DE ETAS ATRAVÉS DA ESCOLHA ADEQUADA DE COAGULANTES E AUXILIARES, EM ÁGUAS COM ALCALINIDADE ALTA](#). Acesso em: 01 fev. 2025.

AL-DHABI, Naif Abdullah; PONMURUGAN, Karuppiah; JEGANATHAN, Prakash Maran. Development and validation of ultrasound-assisted solid-liquid extraction of phenolic compounds from waste spent coffee grounds. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 34, p. 206-213, 2017. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.05.005>. Acesso em: 26 set. 2024.

AL-HAMAMRE, Zayed; FOERSTER, Sascha; HARTMANN, Franziska; KRÖGER, Michael; KALTSCHMITT, Martin. Oil extracted from spent coffee grounds as a renewable source for fatty acid methyl ester manufacturing. **Fuel**, v. 96, p. 70-76, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.01.023>. Acesso em: 12 out. 2024.

ALVIM, J. C.; ALVIM, F. A. L. S.; SALES, V. H. G.; SALES, P. V. G.; OLIVEIRA, E. M.; COSTA, A. C. R. Biorrefinarias: conceitos, classificação, matérias primas e produtos. **Journal of Bioenergy and Food Science**, Macapá, v. 1, n. 3, p. 61-77, out./dez. 2014. Disponível em: <http://periodicos.ifap.edu.br/index.php/JBFS>. Acesso em: 15 set. 2024

ANDERSON, D. A Primer on Oils Processing Technology. In: SHAHIDI, F. (Ed.). *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*. New Jersey: John Wiley and Sons, 2005. p. 6-30.

ANDRADE, Kátia S.; GONÇALVES, Ricardo T.; MARASCHIN, Marcelo; RIBEIRO-DO-VALLE, Rosa Maria; MARTÍNEZ, Julian; FERREIRA, Sandra R.S. Supercritical fluid extraction from spent coffee grounds and coffee husks: Antioxidant activity and effect of operational variables on extract composition. **Talanta**, v. 88, p. 544-552, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2011.11.031>. Acesso em: 19 out. 2024.

ARAÚJO, Micheli Nolasco; AZEVEDO, Ana Queren Paladonai Leandro; HAMERSKI, Fabiane; VOLL, Fernando Augusto Pedersen; CORAZZA, Marcos Lúcio. Enhanced extraction of spent coffee grounds oil using high-pressure CO₂ plus ethanol solvents. **Industrial Crops and Products**, v. 141, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111723>. Acesso em: 12 dez. 2024.

ARAUJO, Micheli Nolasco; SANTOS, Kallynca Carvalho dos; DINIZ, Natalia do Carmo; CARVALHO, Júlio César de; CORAZZA, Marcos L. A biorefinery approach for spent coffee grounds valorization using pressurized fluid extraction to produce oil and bioproducts: A systematic review. **Bioresource Technology Reports**, v. 18, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101013>. Acesso em: 13 jan. 2025.

ARAÚJO, Micheli Nolasco; DINIZ, Natalia do Carmo; HAMERSKI, Fabiane; LESAK, Giuliana Varela Garcia; CARVALHO, Júlio César de; CORAZZA, Marcos L. Recovery of valuable compounds from spent coffee grounds using compressed propane/butane followed by scCO₂ plus solvent extraction. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 211, p. 106317, set. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2024.106317>. Acesso em: 14 fev. 2025.

ARULRAJAH, Arul; KUA, Teck-Ang; SUKSIRIPATTANAPONG, Cherdasak;

HORPIBULSUK, Suksun; SHEN, Jack Shuilong. Compressive strength and microstructural properties of spent coffee grounds-bagasse ash based geopolymers with slag supplements. **Journal of Cleaner Production**, v. 162, p. 1491-1501, 20 Sep. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.171>. Acesso em: 15 jan. 2025.

ATTARD, Thomas M.; BUKHANKO, Natalia; ERIKSSON, Daniel; ARSHADI, Mehrdad; GELADI, Paul; BERGSTEN, Urban; BUDARIN, Vitaliy L.; CLARK, James H.; HUNT, Andrew J. Supercritical extraction of waxes and lipids from biomass: A valuable first step towards an integrated biorefinery. **Journal of Cleaner Production**, v. 177, p. 684- 698, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.155>. Acesso em: 05 jan. 2025.

AZEVEDO, A.B.A; MAZZAFERA, P.; MOHAMED, R.S; VIEIRA DE MELO, S.A.B.; KIECKBUSCH,T.G. Extraction of caffeine, chlorogenic acids and lipids from green coffee beans using supercritical carbon dioxide and co-solvents. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**. v.25, p. 543-552, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-66322008000300012>. Acesso em: 17 dez. 2024.

BALLESTEROS, Lina F.; CERQUEIRA, Miguel A.; TEIXEIRA, José A.; MUSSATTO, Solange I. Characterization of polysaccharides extracted from spent coffee grounds by alkali pretreatment. **Carbohydrate Polymers**, v. 127, p. 347-354, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.03.047>. Acesso em: 29 nov. 2024.

BALZANO, Michele; LOIZZO, Monica R.; TUNDIS, Rosa; LUCCI, Paolo; NUNEZ, Oscar; FIORINI, Dennis; GIARDINIERI, Alessandra; FREGA, Natale G.; PACETTI, Deborah. Spent espresso coffee grounds as a source of anti-proliferative and antioxidant compounds. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 59, jan. 2020, p. 102254. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102254>>. Acesso em: 22 abr. 2025.

BARBOSA, Hugo M.A.; MELO, Marcelo M.R. de; COIMBRA, Manuel A.; PASSOS, Cláudia P.; SILVA, Carlos M. Optimization of the supercritical fluid coextraction of oil and diterpenes from spent coffee grounds using experimental design and response surface methodology. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 85, p. 165-172, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2013.11.011>. Acesso em: 14 out. 2024.

BASILICO A GASTRONOMIA NA WEB. Disponível em:< <http://basilico.uol.com.br>>.

Acesso em: 15 set. 2024

BATISTA, Michelle J.P.A.; TORRES, Samuel S.; FRANCA, Adriana S.; OLIVEIRA, Leandro S. Effect of zinc chloride solution assisted by ultrasound on polysaccharides of spent coffee grounds. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications**, v. 5, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100298>. Acesso em: 29 set. 2024.

BATTISTA, Federico; ZANZONI, Serena; STRAZZERA, Giuseppe; ANDREOLLI, Marco; BOLZONELLA, David. The cascade biorefinery approach for the valorization of the spent coffee grounds. **Renewable Energy**, v. 157, p. 1203-1211, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.113>. Acesso em: 05 jan. 2025.

BANU, J. Rajesh; KAVITHA, S.; KANNAH, R. Yukesh; KUMAR, M. Dinesh; PREETHI; ATABANI, A.E.; KUMAR, Gopalakrishnan. Biorefinery of spent coffee grounds waste: Viable pathway towards circular bioeconomy. **Bioresource Technology**, v. 302, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122821>. Acesso em: 14 jan. 2025.

BANU, J. Rajesh; KANNAH, R. Yukesh; KUMAR, M. Dinesh; PREETHI; KAVITHA, S.; GUNASEKARAN, M.; ZHEN, Guangyin; AWASTHI, Mukesh Kumar; KUMAR, Gopalakrishnan. Spent coffee grounds based circular bioeconomy: Technoeconomic and commercialization aspects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 152, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111721>. Acesso em: 09 jan. 2025.

BARREIROS, André Luís Bacelar Silva; MACHADO, Samísia Maria Fernandes. Química Orgânica Experimental – Aula 2. São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe, CESAD, 2010. Disponível em: cesad.ufs.br. Acesso em: 22 abr. 2025.

BARTOLUCCI, L.; CORDINER, S.; DI CARLO, A.; GALLIFUOCO, A.; MELE, P.; MULONE, V. Platform chemicals recovery from spent coffee grounds aqueous-phase pyrolysis oil. **Renewable Energy**, v. 220, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119630>. Acesso em: 10 jan. 2025.

BEDMUTHA, Rohan; BOOKER, Christina J.; FERRANTE, Lorenzo; BRIENS, Cedric; BERRUTI, Franco; YEUNG, Ken K.-C.; SCOTT, Ian; CONN, Kenneth. Insecticidal and bactericidal characteristics of the bio-oil from the fast pyrolysis of coffee grounds. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 90, p. 224-231, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2010.12.011>. Acesso em: 04 dez. 2024.

BEAUDOR, Maxime; VAUCHEL, Peggy; PRADAL, Delphine; ALJAWISH, Abdulhadi; PHALIP, Vincent. Comparing the efficiency of extracting antioxidant polyphenols from spent coffee grounds using an innovative ultrasound-assisted extraction equipment versus conventional method. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, v. 188, p. 109358, 20232. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109358>. Acesso em: 02 dez. 2024.

BELANDRIA, Veronica; OLIVEIRA, Paola Maressa Aparecida de; CHARTIER, Agnes; RABI, José A.; OLIVEIRA, Alessandra Lopes de; BOSTYN, Stephane. Pressurized- fluid extraction of cafestol and kahweol diterpenes from green coffee. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 37, parte A, p. 145-152, out. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.07.022>. Acesso em: 14 fev. 2025.

BHOWMICK, Goldy De; SARMAH, Ajit K.; SEN, Ramkrishna. Lignocellulosic biorefinery as a model for sustainable development of biofuels and value added products. **Bioresource Technology**, v. 247, p. 1144-1154, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.163>. Acesso em: 03 jan. 2025.

BICHO, Natalina Cavaco; LEITÃO, António Eduardo; RAMALHO, José Cochicho; LIDON, Fernando Cebola. Utilização dos parâmetros de cor para avaliação do café torrado. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 32, n. 3, p. 436-442, jul.-set. 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0101-20612012005000068>. Acesso em: 10 out. 2024.

BIJLA, Laila; HMITTI, Asma; FADDA, Angela; OUBANNIN, Samira; GAGOUR, Jamila; AISSA, Rabha; LAKNIFLI, Abdellatif; SAKAR, El Hassan; GHARBY, Said. **Valorization of spent coffee ground as a natural antioxidant and its use for sunflower oil shelf-life extension**. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2023. Disponível

em: <<https://doi.org/10.1002/ejlt.202300115>>. Acesso em: 22 abr. 2025.

BISPO, D.F.; LOESER, T.F.L.; CARDOZO-FILHO, L. et al. Green solvent-assisted hydrothermal conversion of biomass waste into bio-oil under pressurized conditions. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 15, p. 2949-2961, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13399-023-05171-z>. Acesso em: 29 nov. 2024.

BITENCOURT, Raphaela G.; MELLO, Fernando M.P.A.; CABRAL, Fernando A.; MEIRELLES, Antonio J.A. High-pressure fractionation of spent coffee grounds oil using green solvents. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 157, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2019.104689>. Acesso em: 10 out. 2024.

BONDAM, Aline Felten; SILVEIRA, Daiele Diolinda da; SANTOS, Jaqueline Pozzada dos; HOFFMANN, Jessica Fernanda. Phenolic compounds from coffee by-products: Extraction and application in the food and pharmaceutical industries. **Trends in Food Science & Technology**, v. 123, p. 172-186, maio 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.03.013>. Acesso em: 15 set. 2024.

BRASIL, Ministério da agricultura, pecuária e abastecimento. Regulamento técnico de identidade e de qualidade para a classificação do café beneficiado e de café verde. Instrução Normativa n. 8 de 11/06/03. Brasília, 2003.

BRAVO, Jimena; MONENTE, Carmen; JUÁNIZ, Isabel; PAZ DE PEÑA, M.; CID, Concepción. Influence of extraction process on antioxidant capacity of spent coffee. **Food Research International**, v. 50, p. 610-616, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.04.026>. Acesso em: 05 nov. 2024.

BAYAT, Hengameh. Hydrothermal Liquefaction of Food Waste: Bio-Crude Oil Production and Byproduct Utilization. 2022. Dissertação (Mestrado) – New Mexico State University, Las Cruces, New Mexico, 2022. Disponível em: [Hydrothermal Liquefaction of Food Waste: Bio-Crude Oil Production and Byproduct Utilization - ProQuest](#). Acesso em: 14 set. 2024.

BRIDGWATER, A.V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading.

Biomass and Bioenergy, v. 38, p. 68-94, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>. Acesso em: 14 dez. 2024.

BOK, Jin Pil; CHOI, Hang Seok; CHOI, Yeon Seok; PARK, Hoon Chae; KIM, Seock Joon. Fast pyrolysis of coffee grounds: Characteristics of product yields and biocrude oil quality. **Energy**, v. 47, p. 17-24, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.06.003>. Acesso em: 10 nov. 2024.

BUDARAJU, Sravanthi; MALLIKARJUNAN, Kumar P.; PETIT, Rebecca. Comparison and Optimization of solvent extraction and microwave assisted extraction of phenolic compounds from spent coffee grounds. **ASABE Annual International Meeting**, 2017. Disponível em: [2017 ASABE Annual Meeting Template](#). Acesso em: 13 dez. 2024.

CAETANO, Nídia Sá; SILVA, Vânia; MATA, Teresa M. Valorization of Coffee Grounds for Biodiesel Production. **Chemical Engineering Transactions**, v. 26, p. 267-272, 2012. Disponível em: [Format And Type Fonts](#). Acesso em: 18 nov. 2024.

CAFÉ DAMASCO. 2008. Disponível em: http://www.cafedamasco.com.br/sobre_cafe/tipos.htm>.

CAMPOS-VEGA, R.; LOARCA-PIÑA, G.; VERGARA-CASTAÑEDA, H.A.; OOMAH, B.D. Spent Coffee Grounds: A Review on Current Research and Future Prospects. **Trends Food Sci.Technol.** 2015, 45,24–36. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.04.012>. Acesso em: 20 nov. 2024.

CAMPOS-VEGA, R.; VÁZQUEZ-SÁNCHEZ, K.; LÓPEZ-BARRERA, D.; LOARCA-PIÑA, G.; MENDOZA-DÍAZ, S.; OOMAH, B.D. Simulated gastrointestinal digestion and in vitro colonic fermentation of spent coffee (*Coffea arabica* L.): Bioaccessibility and intestinal permeability. **Food Research International**, v. 77, p. 156-161, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.07.024>. Acesso em: 27 dez. 2024.

CALIXTO, Filipe; FERNANDES, João; COUTO, Ricardo; HERNÁNDEZ, Elvis J.; NAJDANOVIC-VISAK, Vesna; SIMÕES, Pedro C. Synthesis of fatty acid methyl esters via direct transesterification with methanol/carbon dioxide mixtures from spent coffee grounds

feedstock. **Green Chemistry**, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/C1GC15101K>. Acesso em: 10 jan. 2024.

CARDONA ALZATE, Carlos Ariel; SOLARTE TORO, Juan Camilo; GÓMEZ PEÑA, Álvaro. Fermentation, thermochemical and catalytic processes in the transformation of biomass through efficient biorefineries. **Catalysis Today**, v. 302, p. 61-72, 2018. DOI: 10.1016/j.cattod.2017.09.034. Acesso em: 22 nov. 2024.

CARMONA-CABELLO, Miguel; LEIVA-CANDIA, David; CASTRO-CANTARERO, Jose Luis; PINZI, Sara; DORADO, M. Pilar. Valorization of food waste from restaurants by transesterification of the lipid fraction. **Fuel**, v. 215, p. 492-498, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.096>. Acesso em: 06 jan. 2025.

CARTA, Gianfranca; MURRU, Elisabetta; BANNI, Sebastiano; MANCA, Claudia. Palmitic Acid: Physiological Role, Metabolism and Nutritional Implications. **Frontiers in Physiology**, v. 8, 2017. Disponível em: [Frontiers | Palmitic Acid: Physiological Role, Metabolism and Nutritional Implications](https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00000). Acesso em: 08 jan. 2025.

CHANDRA, Rashmi; IQBAL, Hafiz M.N.; VISHAL, Garima; LEE, Hyung-Sool; NAGRA, Sunil. Algal biorefinery: A sustainable approach to valorize algal-based biomass towards multiple product recovery. **Bioresource Technology**, v. 278, p. 346-359, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.104>. Acesso em: 15 jan. 2025.

CHANDRASEKARAN, Arunkumar; RAMACHANDRAN, Sethumadhavan; SUBBIAH, Senthilmurugan. Modeling, experimental validation and optimization of *Prosopis juliflora* fuelwood pyrolysis in fixed-bed tubular reactor. **Bioresource Technology**, v. 264, p. 66-77, Sep. 2018. Disponível em: [10.1016/j.biortech.2018.05.013](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.05.013). Acesso em: 30 jan. 2025.

CHEEKE, J. David N. *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*. Boca Raton: **CRC Press**, 2012. 504 p. ISBN 9781315217307. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/b12260>. Acesso em: 12 out. 2023.

CHEN, Qiyu; DONG, Wenjiang; WEI, Changqing; HU, Rongsuo; LONG, Yuzhou.

Combining integrated ultrasonic-microwave technique with ethanol to maximise extraction of green coffee oil from Arabica coffee beans. **Industrial Crops and Products**, v. 151, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112405>. Acesso em: 12 dez. 2024.

CHERUBINI, F.; WELLISCH, M.; WILLKE, T. Toward a common classification approach for biorefinery systems. **Biofuels, Bioproducts & Biorefining**, v.3 , p. 534 546, 2009. Disponível em: [Toward a common classification approach 20160718-13148-vrx5a4-libre.pdf](#). Acesso em: 03 jan. 2025.

CHINDAPAN, Nathamol; PUANGNGOEN, Chanakan; DEVAHASTIN, Sakamon. Caffeine removal and compositions losses from whole Robusta coffee beans during conventional and ultrasound-assisted aqueous decaffeination. **Journal of Food Engineering**, v. 387, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112349>. Acesso em: 07 dez. 2024.

CHO, Dong-Wan; CHO, Seong-Heon; SONG, Hocheol; KWON, Eilhann E. Carbon dioxide assisted sustainability enhancement of pyrolysis of waste biomass: A case study with spent coffee ground. **Bioresource Technology**, v. 189, p. 1-6, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.002>. Acesso em: 10 dez. 2024.

CHO, Eun Jin; LEE, Yoon Gyo; SONG, Younho; NGUYEN, Dinh-Truong; BAE, Hyeun-Jong. An integrated process for conversion of spent coffee grounds into value-added materials. **Bioresource Technology**, v. 346, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126618>. Acesso em: 08 jan. 2025.

COELHO, José P.; ROBALO, Maria P.; BOYADZHIEVA, Stanislava; STATEVA, Roumiana P. Microwave-Assisted Extraction of Phenolic Compounds from Spent Coffee Grounds. Process Optimization Applying Design of Experiments. **Molecules**, v. 26, n. 23, p. 7320, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules26237320>. Acesso em: 18 out. 2024.

COELHO, José P.; FILIPE, Rui M.; ROBALO, M. Paula; BOYADZHIEVA, Stanislava;

CHOLAKOV, Georgi St.; STATEVA, Roumiana P. Supercritical CO₂ extraction of spent coffee grounds. Influence of co-solvents and characterization of the extracts. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 161, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2020.104825>. Acesso em: 04 jan. 2025.

CONDE, Teresa; MUSSATTO, Solange I. Isolation of polyphenols from spent coffee grounds and silverskin by mild hydrothermal pretreatment. **Preparative Biochemistry and Biotechnology**, v. 46, n. 4, p. 406-409, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/10826068.2015.1084514>. Acesso em: 17 dez. 2024.

CORNELIO-SANTIAGO, Heber P.; GONÇALVES, Cintia Bernardo; DE OLIVEIRA, Naila Albertina; LOPES DE OLIVEIRA, Alessandra. Supercritical CO₂ extraction of oil from green coffee beans: Solubility, triacylglycerol composition, thermophysical properties and thermodynamic modelling. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 128, p. 386-394, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.05.030>. Acesso em: 18 dez. 2024.

COUTO, Ricardo M.; FERNANDES, João; GOMES DA SILVA, M.D.R.; SIMÕES, Pedro C. Supercritical fluid extraction of lipids from spent coffee grounds. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 51, p. 159-166, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2009.09.009>. Acesso em: 19 dez. 2024.

CUBAS, A. L. V.; MACHADO, Marina Medeiros; BIANCHET, Ritanara Tayane; HERMANN, Kênia Alexandra da Costa; BORK, Jonathan Alexsander; DEBACHER, Nito Angelo; LINS, Elisa Flores; MARASCHIN, Marcelo; COELHO, Daniela Sousa; MOECKE, Elisa Helena Siegel. Oil extraction from spent coffee grounds assisted by non-thermal plasma. **Separation and Purification Technology**, v. 250, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586620316452>. Acesso em: 29 abr. 2024.

CRUZ, Rebeca; CARDOSO, Maria M.; FERNANDES, Luana; OLIVEIRA, Marta;

MENDES, Eulália; BAPTISTA, Paula; MORAIS, Simone; CASAL, Susana. Espresso coffee residues: a valuable source of unextracted compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 60, n. 32, p. 7777-7784, 2012. Disponível em: [Espresso Coffee Residues: A Valuable Source of Unextracted Compounds | Journal of Agricultural and Food Chemistry](#). Acesso em: 05 dez. 2024.

CRUZ, Madalena V.; PAIVA, Alexandre; LISBOA, Pedro; FREITAS, Filomena; ALVES, Vítor D.; SIMÕES, Pedro; BARREIROS, Susana; REIS, Maria A.M. Production of polyhydroxyalkanoates from spent coffee grounds oil obtained by supercritical fluid extraction technology. *Bioresource Technology*, v. 157, p. 360-363, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.02.013>. Acesso em: 23 out. 2024.

DIAS, M.E.; OLIVEIRA, G.H.D.; COUTO, P.T.; DUSSÁN, K.J.; ZAIAT, M.; RIBEIRO, R.; STABLEIN, M.J.; WATSON, J.T.; ZHANG, Y.; TOMMASO, G. Anaerobic digestion of hydrothermal liquefaction wastewater from spent coffee grounds. *Biomass and Bioenergy*, v. 148, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106030>. Acesso em: 10 out. 2024.

DEMIRBAS, A. Biorefineries: Current activities and future developments. *Energy Conversion and Management*, v.50, p.2782-2801, 2009^a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.06.035>. Acesso em: 26 out. 2024.

DEMIRBAS, M. F. Biorefineries for biofuel upgrading: A critical review. *Applied Energy*, v.86, p.151-161, 2009^b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.04.043>. Acesso em: 28 out. 2024.

DONG, Wenjiang; CHEN, Qiyu; WEI, Changqing; HU, Rongsuo; LONG, Yuzhou; ZONG, Ying; CHU, Zhong. Comparison of the effect of extraction methods on the quality of green coffee oil from Arabica coffee beans: Lipid yield, fatty acid composition, bioactive components, and antioxidant activity. *Ultrasonics Sonochemistry*, v. 74, p. 105578, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105578>. Acesso em: 18 set. 2024.

DONG, Wenjiang; HU, Rongsuo; CHU, Zhong; ZHAO, Jianping; TAN, Lehe. Effect of

different drying techniques on bioactive components, fatty acid composition, and volatile profile of robusta coffee beans. **Food Chemistry**, v. 234, p. 121-130, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.156>. Acesso em: 22 out. 2024.

DONG, Wenjiang; CHENG, Ke; HU, Rongsuo; CHU, Zhong; ZHAO, Jianping; LONG, Yuzhou. Effect of Microwave Vacuum Drying on the Drying Characteristics, Color, Microstructure, and Antioxidant Activity of Green Coffee Beans. **Molecules**, v. 23, n. 5, p. 1146, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules23051146>. Acesso em: 09 out. 2024.

EFTHYMIOPOULOS, Ioannis; HELLIER, Paul; LADOMMATOS, Nicos; EVELEIGH, Aaron; MILLS-LAMPTEY, Ben. Factors affecting the efficiency of pressurized solvent extraction of oil from spent coffee grounds. **Detritus**, [S.l.], v. 1, p. 1-9, jan. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2019.13771>. Acesso em: 26 ago. 2024.

EFTHYMIOPOULOS, Ioannis; HELLER, Paul; LADOMMATOS, Nicos; RUSSO-PROFILI, Alessandro; EVELEIGH, Aaron; ALIEV, Abil; KAY, Arthur; MILLS-LAMPTEY, Ben. Influence of solvent selection and extraction temperature on yield and composition of lipids extracted from spent coffee grounds. **Industrial Crops and Products**, v. 119, p. 49-56, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.04.008>. Acesso em: 28 nov. 2024.

EL HAJJAJI, Samir; BOULADAB, Chaima; CHERGAOUI, Sara; FADLI, Soukaina. Biorefining of Waste Coffee Grounds: Turning an Environmental Problem into an Opportunity. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 505, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/505/1/012026>. Acesso em: 03 jan. 2025.

ELLEN MACARTHUR, F. Rumor À Economia Circular: o racional de negócio para acelerar a transição. Ellen MacArthur Foundation, 2015. Disponível em: <https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Rumo-%C3%A0-economia-circular_SumarioExecutivo.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2025.

ERDAWATI; DIANHAR, Hanhan; KHAIRUNNISA, Hasna. Effect of Pretreatment Spent Coffee Ground with Natural Deep Eutectic Solvent (NADES) on Coffee Oil Yield. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 2309, n. 1, p. 012002, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2309/1/012002>. Acesso em: 22 nov. 2024.

FERMOSO, Javier; MAŠEK, Ondřej. Thermochemical decomposition of coffee ground residues by TG-MS: A kinetic study. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 130, p. 358-367, mar. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.12.007>. Acesso em: 11 abr. 2025.

FERNANDES, Filipe; DELERUE-MATOS, Cristina; GROSSO, Clara. **Valorization of Spent Coffee Grounds: Comparing Phenolic Content and Antioxidant Activity in Solid-Liquid vs. Subcritical Water Extraction Methods**. *Biol. Life Sci. Forum*, v. 40, n. 1, 2024, p. 23. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/blsf2024040023>>. Acesso em: 22 abr. 2025.

FERREIRA, Bruno L.; BEIK, Junior V.; ALVES, Salvino J. Z.; HENRIQUE, Flavia A.; SAUER, Elenise; CHORNOBAL, Cesar A.; BOWLES, Simone; CHAVES, Eduardo S. Extração assistida por ultrassom para determinação de lipídeos em alimentos: um experimento de laboratório. **Química Nova**, v. 43, n. 9, p. 1320-1325, 2020 Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.201705922>. Acesso em: 20 ago. 2024

FILOTE, Catalina; VOLF, Irina; SANTOS, Sílvia C.R.; BOTELHO, Cidália M.S. Bioadsorptive removal of Pb(II) from aqueous solution by the biorefinery waste of *Fucus spiralis*. **Science of The Total Environment**, v. 648, p. 1201-1209, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.210>. Acesso em: 16 jan. 2025.

FIOL, N.; ESCUDERO, C.; VILLAESCUSA, I. Reuse of exhausted ground coffee waste for Cr (VI) sorption. *Separation Science and Technology*, v. 43, n. 3, p. 582–596, 2008. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01496390701808414>. Acesso em: 17 nov. 2024.

FREITAS, Caroline P. M. de; MARANGON, Bianca B.; PEREIRA, Emanuele G.; RENATO, Natalia dos S. Exploring spent coffee grounds energy potential in the Brazilian scenario. **Engenharia Agrícola**, v. 43, edição especial, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v43nepe20220141/2023>>. Acesso em:

22 abr. 2025.

FUČKAR, Vedran Biondić; NUTRIZIO, Marinela; GRUDENIĆ, Anamarija; DJEKIĆ, Ilija; JAMBRAK, Anet Režek. Sustainable Ultrasound Assisted Extractions and Valorization of Coffee Silver Skin (CS). **Sustainability**, v. 15, n. 10, p. 8198, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su15108198>. Acesso em: 19 nov. 2024.

GEORGIEVA, Silvia S.; COELHO, José A.P.; CAMPOS, Filipe C.; ROBALO, M. Paula; STATEVA, Roumiana P. GREEN EXTRACTION OF HIGH ADDED VALUE SUBSTANCES FROM SPENT COFFEE GROUNDS: PRELIMINARY RESULTS. **Journal of Chemical Technology and Metallurgy**, v. 53, n. 4, p. 640-646, 2018. Disponível em: [2018 GREEN EXTRACTION OF HIGH ADDED VALUE SUBSTANCES FROM SPENT COFFEE GROUNDS- PRELIMINARY RESULTS-libre.pdf](#). Acesso em: 18 nov. 2024.

GIROTTTO, Francesca; PIAZZA, Laura; RATTI, Simona; GIOVANELLI, Gabriella. Application of Ultrasonic Intensification Technology in the Extraction of Bio-Actives from Spent Coffee Grounds and Spent Tea Leaves. **Chemical Engineering Transactions**, v. 102, 2023. Disponível em: [045.pdf](#). Acesso em: 13 nov. 2024.

GHAFOOR, M.; MISRA, N. N.; MAHADEVAN, K.; TIWARI, B. K. Ultrasound assisted hydration of navy beans (*Phaseolus vulgaris*). **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 21, n. 1, p. 409–414, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.05.016>. Acesso em: 28 nov. 2024.

GHATAK, H. R. Biorefineries from the perspective of sustainability: Feedstocks, products, and processes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.15, p.4042-4052, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.034>. Acesso em: 22 nov. 2024.

GHOSH, Debashish; DASGUPTA, Diptarka; AGRAWAL, Deepti; KAUL, Savita; ADHIKARI, Dilip Kumar; KURMI, Akhilesh Kumar; ARYA, Pankaj K.; BANGWAL, Dinesh; NEGI, Mahendra Singh. Fuels and Chemicals from Lignocellulosic Biomass: An

Integrated Biorefinery Approach. **Energy & Fuels**, v. 29, p. 3149-3157, 2015. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.5b00144. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b00144>. Acesso em: 07 jan. 2025.

GOH, Brandon Han Hoe; ONG, Hwai Chyuan; CHONG, Cheng Tung; CHEN, Wei- Hsin; LEONG, Kin Yuen; TAN, Shiou Xuan; LEE, Xin Jiat. Ultrasonic assisted oil extraction and biodiesel synthesis of Spent Coffee Ground. **Fuel**, v. 261, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116121>. Acesso em: 20 nov. 2024.

GOLLAKOTA, A.R.K.; KISHORE, Nanda; GU, Sai. A review on hydrothermal liquefaction of biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 1378-1392, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.178>. Acesso em: 30 out. 2024.

GONZALEZ, E.A.S. Estudo da viabilidade de implantação de pequenas unidades de torrefação de café. 2004. Trabalho final (Graduação em Bacharelado em Engenharia de Alimentos). Universidade Estácio de Sá. Rio de Janeiro

GONZALEZ-GARCIA, Sara; GULLÓN, Beatriz; MOREIRA, Maria Teresa. Environmental assessment of biorefinery processes for the valorization of lignocellulosic wastes into oligosaccharides. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 4066-4073, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.164>. Acesso em: 06 jan. 2025.

GÜÇLÜ-ÜSTÜNDAĞ, Özlem; TEMELLI, Feral. Solubility behavior of ternary systems of lipids, cosolvents and supercritical carbon dioxide and processing aspects. **Journal of Supercritical Fluids**, v. 36, p. 1-15, 2005. Disponível em: [j.supflu.2005.03.002](https://doi.org/10.1016/j.supflu.2005.03.002)20170102-32226-tpfuce-libre.pdf. Acesso em: 25 set. 2024.

HAILE, Mebrahtu; ASFAW, Araya; ASFAW, Nigist. Investigation of Waste Coffee Ground as a Potential Raw Material for Biodiesel Production. **International Journal of Renewable Energy Research**, v. 3, n. 4, 2013. Disponível em: [148276](https://doi.org/10.1016/j.ijrer.2013.04.002). Acesso em: 20 set. 2024.

Halal, S. L. M. E. (2008). Composição, Processamento e Qualidade do Café. Trabalho acadêmico apresentado ao curso de Bacharelado em Química de Alimentos da Universidade Federal de Pelotas, Pelotas. Disponível em: [cafeina-e-quimica-do-cafe.pdf](#). Acesso em: 10 set. 2024.

HANIF, Muhammad; HARAHA, Fahmi Alif Utama; HERU; DARNI, Yuli; GINTING, Simpamin Br. Extraction and Characterization of Coffee Oil From Instant-Coffee Waste. **Jurnal Bahan Alam Terbarukan**, v. 8, n. 1, p. 59-64, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.15294/jbat.v8i1.18619>.

HIBBERT, Sam; WELHAM, Kevin; ZEIN, Sharif H. An innovative method of extraction of coffee oil using an advanced microwave system: in comparison with conventional Soxhlet extraction method. **SN Applied Sciences**, v. 1, n. 1467, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1457-5>. Acesso em: 10 out. 2024.

HOANG, Anh Tuan; NIZETIC, Sandro; ONG, Hwai Chyuan; CHONG, Cheng Tung; ATABANI, A.E.; PHAM, Van Viet. Acid-based lignocellulosic biomass biorefinery for bioenergy production: Advantages, application constraints, and perspectives. **Journal of Environmental Management**, v. 296, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113194>. Acesso em: 08 jan. 2025.

HOU, Shuhn-Shyurng; HOU, Shuhn-Shyurng; LIN, Ta-Hui. Co-Combustion of Fast Pyrolysis Bio-Oil Derived from Coffee Bean Residue and Diesel in an Oil-Fired Furnace. **Applied Sciences**, v. 7, n. 10, p. 1085, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app7101085>. Acesso em: 30 out. 2024.

HURTADO-BENAVIDES, Andrés; DORADO, Daniela A.; SÁNCHEZ-CAMARGO, Andrea del Pilar. Study of the fatty acid profile and the aroma composition of oil obtained from roasted Colombian coffee beans by supercritical fluid extraction. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 113, p. 44-52, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2016.03.008>. Acesso em: 25 out. 2024.

International Energy Agency (IEA). Sustainable Production of Second-Generation Biofuels. p.221. 2010.

International Energy Agency (IEA). Technology Roadmaps: Biofuels for transport. p.56. 2011.

JAVED, Muhammad Uzair; MUKHTAR, Hamid; HAYAT, Muhammad Tahir; RASHID, Umer; MUMTAZ, Muhammad Waseem; NGAMCHARUSSRIVICHAI, Chawalit. Sustainable processing of algal biomass for a comprehensive biorefinery. **Journal of Biotechnology**, v. 352, p. 47-58, 2022. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2022.05.009. Acesso em: 23 set. 2024.

JENKINS, R. W., STAGEMAN, N., FORTUNE, C., CHUCK, C. J. (2014). Effect of the type of bean, processing and geographical location on the biodiesel produced from waste coffee grounds. **Energy Fuels**, 28, 1166-1174. Disponível em: Effect of the Type of Bean, Processing, and Geographical Location on the Biodiesel Produced from Waste Coffee Grounds | Energy & Fuels. Acesso em: 20 out. 2024.

JIN, Liang; ZHANG, Haochun; MA, Zhuang. Study on capacity of coffee grounds to be extracted oil, produce biodiesel and combust. **Energy Procedia**, 2018. Disponível em: ResearchGate. Acesso em: 13 abr. 2025.

JOËT, Thierry; LAFFARGUE, Andréina; DESCROIX, Frédéric; DOULBEAU, Sylvie; BERTRAND, Benoît; DE KOCHKO, Alexandre; DUSSERT, Stéphane. Influence of environmental factors, wet processing and their interactions on the biochemical composition of green Arabica coffee beans. **Food Chemistry**, v. 118, n. 3, p. 693-701, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.05.048>. Acesso em: 20 out.2024.

KAFKOVÁ, V.; KUBINEC, R.; MIKULEC, J.; VARINY, M.; ONDREJÍČKOVÁ, P.; HÁZ, A.; BRISUDOVÁ, A. Integrated Approach to Spent Coffee Grounds Valorization in Biodiesel Biorefinery. **Sustainability**, v. 15, 5612, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su15075612>. Acesso em: 09 jan. 2025.

KANAAN, Akel F.; SANTOS, Kallynca C. dos; MENEZES, Maria A. H.; HAMERSKI, Fabiane; VOLL, Fernando A. P.; CORAZZA, Marcos L. Sequential extraction of industrial

spent coffee grounds using pressurized fluids as solvents. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 218, 106503, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2024.106503>. Acesso em: 14 fev. 2025.

KANLAYAVATTANAKUL, Mayuree; LOURITH, Nattaya; CHAIKUL, Puxvadee. Valorization of spent coffee grounds as the specialty material for dullness and aging of skin treatments. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, v. 8, 2021, art. 55. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s40538-021-00259-4>>. Acesso em: 22 abr. 2025.

KARMEE, Sanjib Kumar. A spent coffee grounds based biorefinery for the production of biofuels, biopolymers, antioxidants and biocomposites. **Waste Management**, v. 72, p. 240-254, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.042>. Acesso em: 09 jan. 2025.

KAZI, Feroz Kabir; PATEL, Akshay D.; SERRANO-RUIZ, Juan Carlos; DUMESIC, James A.; ANEX, Robert P. Techno-economic analysis of dimethylfuran (DMF) and hydroxymethylfurfural (HMF) production from pure fructose in catalytic processes. **Chemical Engineering Journal**, v. 169, n. 1–3, p. 329-338, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.03.018>. Acesso em: 10 out. 2024.

KELKAR, Shantanu; SAFFRON, Christopher M.; CHAI, Li; BOVEE, Jonathan; STUECKEN, Thomas R.; GAREDEW, Mahlet; LI, Zhenglong; KRIEGEL, Robert M. Pyrolysis of spent coffee grounds using a screw-conveyor reactor. **Fuel Processing Technology**, v. 137, p. 170-178, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.04.006>. Acesso em: 07 nov. 2024.

KONDAMUDI, Narasimharao; MOHAPATRA, Susanta K.; MISRA, Mano. Spent Coffee Grounds as a Versatile Source of Green Energy. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 56, n. 24, p. 11757-11760, 2008. Disponível em: [Spent Coffee Grounds as a Versatile Source of Green Energy | Journal of Agricultural and Food Chemistry](#). Acesso em 10 dez. 2024.

KRAUSE, Maurício C.; MOITINHO, Adriana C.; FERREIRA, Luiz Fernando R.; SOUZA, Ranyere L. de; KRAUSE, Laiza C.; CARAMÃO, Elina B. Production and Characterization

of the Bio-Oil Obtained by the Fast Pyrolysis of Spent Coffee Grounds of the Soluble Coffee Industry. **J. Braz. Chem. Soc.**, v. 30, n. 8, p. 1608-1615, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21577/0103-5053.20190059>. Acesso em: 08 set. 2024.

KRESNA, M. S.; WINDY, R.; SUCI, A. P.; BOVI, W. H. Characteristics of Arabica and Robusta Spent Coffee Grounds Oil Extract with Different Solvents. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 1379, p. 012035, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1379/1/012035>. Acesso em: 19 set. 2024.

KUBIK, Michelle. *2008 Renewable Energy Data Book*. [S.l.: s.n.], 2008. 138 p. DOE/GO-102009-2827.

KUMAR, Bikash; BHARDWAJ, Nisha; AGRAWAL, Komal; CHATURVEDI, Venkatesh; VERMA, Pradeep. Current perspective on pretreatment technologies using lignocellulosic biomass: An emerging biorefinery concept. **Fuel Processing Technology**, v. 199, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106244>. Acesso em: 11 out. 2024.

KWON, Eilhann E.; YI, Haakrho; JEON, Young Jae. Sequential co-production of biodiesel and bioethanol with spent coffee grounds. **Bioresource Technology**, v. 136, p. 475-480, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.052>. Acesso em: 15 nov. 2024.

LABBÉ, Nicole; KLINE, Lindsey M.; MOENS, Luc; KIM, Keonhee; KIM, Pyoung Chung; HAYES, Douglas G. Activation of lignocellulosic biomass by ionic liquid for biorefinery fractionation. **Bioresource Technology**, v. 104, p. 701-707, 2012. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.10.062. Acesso em: 20 set. 2024.

LANDUCCI, G.; NUCCI, B.; PELAGAGGE, L.; NICOLELLA, C. Hazard Assessment of Edible Oil Refining: Formation of Flammable Mixtures in Storage Tanks. **Journal of Food Engineering**, v. 106, p. 110-110, 2011.

LE, Phung T. K.; VU, Quan T. H.; NGUYEN, Quan T. V.; TRAN, Khoa A.; LE, Kien A. Extraction and Evaluation of the Biological Activities of Oil from Spent Coffee Grounds.

Chemical Engineering Transactions, v. 56, 2017. Disponível em: [Microsoft Word - 164.docx](#). Acesso em: 15 dez. 2024.

LE, Tan M.; TRAN, Uyen PN.; DUONG, Yen HP.; NGUYEN, Kiet T.; TRAN, Viet T.; LE, Phung K. Development of a paddy-based biorefinery approach toward improvement of biomass utilization for more bioproducts. **Chemosphere**, v. 289, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133249>. Acesso em: 10 out. 2024.

LEE, X. J.; ONG, H. C.; GAO, W.; OK, Y. S.; CHEN, W.-H.; GOH, B. H. H.; CHONG, C. T. Solid biofuel production from spent coffee ground wastes: Process optimisation, characterisation and kinetic studies. **Fuel**, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120309>. Acesso em: 26 nov. 2024.

LIAKOS, D. K.; TRIANTAFYLLIDIS, L.; CHRYSIKOU, N.; TOURLAKIDIS, N.; VASDEKIS, V. M.; BEZERGIANNI, S. Spent coffee grounds conversion to bio-crude oil via hydrothermal liquefaction. **Waste and Biomass Valorization**, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s12649-022-01792-z>. Acesso em: 10 out. 2024.

LIMOUSY, L.; JEGUIRIM, M.; DUTOURNIÉ, P.; KRAIEM, N.; LAJILI, M.; SAID, R. Gaseous products and particulate matter emissions of biomass residential boiler fired with spent coffee grounds pellets. **Fuel**, v. 107, p. 323-329, maio 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.10.019>. Acesso em: 11 abr. 2025.

LIU, Guangrong; CHEN, Fangyue; CAO, Kaihong; JIN, Bangheng; RAO, Li; JIN, Xin; HE, Feifei; HUANG, Qiang. Fe-catalyzed low-temperature hydrothermal liquefaction of coffee shells: Influence of operating parameters on bio-oil yield, distribution of bio-oil products. **Journal of the Energy Institute**, v. 113, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2024.101525>. Acesso em: 25 out. 2024.

LIU, Shijie; LU, Houfang; HU, Ruofei; SHUPE, Alan; LIN, Lu; LIANG, Bin. A sustainable woody biomass biorefinery. **Biotechnology Advances**, v. 30, n. 4, p. 785-810, 2012. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2012.01.013. Acesso em: 24 set. 2024.

LONG, Xiao-Hua; SHAO, Hong-Bo; LIU, Ling; LIU, Li-Ping; LIU, Zhao-Pu. Jerusalem

artichoke: A sustainable biomass feedstock for biorefinery. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 1382-1388, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.063>. Acesso em: 11 jan. 2025.

LÓPEZ-BARRERA, Dunia Maria; VÁZQUEZ-SÁNCHEZ, Kenia; LOARCA-PIÑA, Ma. Guadalupe Flavia; CAMPOS-VEGA, Rocio. Spent coffee grounds, an innovative source of colonic fermentable compounds, inhibit inflammatory mediators in vitro. **Food Chemistry**, v. 212, p. 282-290, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.05.175>. Acesso em: 22 out. 2024.

LÓPEZ-LINARES, Juan C.; GARCÍA-CUBERO, María Teresa; COCA, Mónica; LUCAS, Susana. A biorefinery approach for the valorization of spent coffee grounds to produce antioxidant compounds and biobutanol. **Biomass and Bioenergy**, v. 147, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106026>. Acesso em: 06 jan. 2025.

LOURITH, Nattaya; XIVIVADH, Kornrawee; BOONKONG, Ploypan; KANLAYAVATTANAKUL, Mayuree. Spent coffee waste: A sustainable source of cleansing agent for a high-performance makeup remover. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 29, out. 2022, p. 100826. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100826>. Acesso em: 22 abr. 2025.

LOYAO Jr., Alger S.; VILLASICA, Serge Lorenz G.; DELA PEÑA, Paulo Louise L.; GO, Alchris Woo. Extraction of lipids from spent coffee grounds with non-polar renewable solvents as alternative. **Industrial Crops & Products**, v. 119, p. 152-161, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.04.017>. Acesso em: 10 dez. 2024.

LUZ, Fábio Codignole; CORDINER, Stefano; MANNI, Alessandro; MULONE, Vincenzo; ROCCO, Vittorio. Biomass fast pyrolysis in screw reactors: Prediction of spent coffee grounds bio-oil production through a monodimensional model. **Energy Conversion and Management**, v. 168, p. 98-106, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.104>. Acesso em: 12 jan. 2025.

LY, Hoang Vu; LEE, Boreum; SIM, Jae Wook; TRAN, Quoc Khanh; KIM, Seung-Soo;

KIM, Jinsoo; BRIGLJEVIĆ, Boris; HWANG, Hyun Tae; LIM, Hankwon. Catalytic pyrolysis of spent coffee waste for upgrading sustainable bio-oil in a bubbling fluidized- bed reactor: Experimental and techno-economic analysis. **Renewable Energy**, v. 202, p. 123-134, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130956>. Acesso em: 17 dez. 2024.

MAITY, Sunil K. Opportunities, recent trends and challenges of integrated biorefinery: Part I. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 1427-1445, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.092>. Acesso em: 11 jan. 2025.

MALAGÓN-ROMERO, D; TORRES-VELASQUEZ, A. C., D.; TINOCO-NAVARRO, L. K.; ARRUBLA-VÉLEZ, J. P. Pyrolysis of Colombian spent coffee grounds (SCGs), characterization of bio-oil, and study of its antioxidant properties. **International Journal of Sustainable Energy**, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2235025>. Acesso em: 10 nov. 2024.

MALTA, M.R. Critérios utilizados na avaliação da qualidade do café. **Informe Agropecuário**, v.32, n.261, p.114-126, 2011.

MANNA, Luigi; BUGNONE, Cristiano Agostino; BANCHERO, Mauro. Valorization of hazelnut, coffee and grape wastes through supercritical fluid extraction of triglycerides and polyphenols. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 104, p. 204-211, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2015.06.012>. Acesso em: 18 out. 2024.

MANIRAKIZA, P.; COVACI, A.; SCHEPENS, P. Comparative Study on Total Lipid Determination using Soxhlet, Roese-Gottlieb, Bligh & Dyer, and Modified Bligh & Dyer Extraction Methods. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 14, n. 1, p. 93-100, 2001. Disponível em: [Sci-Hub | Comparative Study on Total Lipid Determination using Soxhlet, Roese-Gottlieb, Bligh & Dyer, and Modified Bligh & Dyer Extraction Methods. Journal of Food Composition and Analysis, 14\(1\), 93–100 | 10.1006/jfca.2000.0972](https://doi.org/10.1006/jfca.2000.0972). Acesso em: 15 nov. 2024.

MATOS, Leonardo José B. L. de; COSTA, Enio; LIMA, Larissa Pinto de; FERNANDES, Fabiano André Narciso. Estudo comparativo da extração do óleo da borra de café.

Universidade Federal do Ceará. 2010. Acesso em: 03 set. 2024.

MATRAPAZI, V.K.; ZABANIOTOU, A. Experimental and feasibility study of spent coffee grounds upscaling via pyrolysis towards proposing an eco-social innovation circular economy solution. **Science of The Total Environment**, v. 718, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137316>. Acesso em: 31 jan. 2025.

MARX, Sanette; VENTER, Roelf; KARMEE, Sanjib Kumar; de MILEM, Tony; LOUW, Jaco; TRUTER, Chantelle. Biofuels from spent coffee grounds: Comparison of processing routes. **Journal of Cleaner Production**, 2020. Disponível em: [\(PDF\) Biofuels from spent coffee grounds: comparison of processing routes](#). Acesso em: 16 out. 2024.

MARTINS, C. R.; LOPES, W. A.; ANDRADE, J. B. de. Solubilidade das substâncias orgânicas. **Química Nova**, v. 36, n. 8, p. 1248-1255, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000800026>. Acesso em: 28 out. 2024.

MARTO, J.; GOUVEIA, L.F.; CHIARI, B.G.; PAIVA, A.; ISAAC, V.; PINTO, P.; SIMÕES, P.; ALMEIDA, A.J.; RIBEIRO, H.M. The green generation of sunscreens: Using coffee industrial sub-products. **Industrial Crops and Products**, v. 80, p. 93- 100, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.11.033>. Acesso em: 22 out. 2024.

MARVIN, W. Alex; SCHMIDT, Lanny D.; BENJAAFAR, Saif; TIFFANY, Douglas G.; DAOUIDIS, Prodromos. Economic Optimization of a Lignocellulosic Biomass-to-Ethanol Supply Chain. **Chemical Engineering Science**, v. 67, n. 1, p. 68-79, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.05.055>. Acesso em: 05 jan. 2025.

MASSAYA, J.; CHAN, K.H.; MILLS-LAMPTEY, B. et al. Developing a biorefinery from spent coffee grounds using subcritical water and hydrothermal carbonisation. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 13, p. 1279-1295, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01231-w>. Acesso em: 16 jan. 2025.

MAURYA, Rahul Kumar; PALIWAL, Chetan; GHOSH, Tonmoy; PANCHAL, Imran; CHOKSHI, Kaumeel; MITRA, Madhusree; GHOSH, Arup; MISHRA, Sandhya.

Applications of de-oiled microalgal biomass towards development of sustainable biorefinery. **Bioresource Technology**, v. 214, p. 787-796, 2016. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.04.115. Acesso em: 28 out. 2024.

MAYSON, S.; WILLIAMS, I.D. Applying a circular economy approach to valorize spent coffee grounds. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 172, art. 105659, set. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105659>. Acesso em: 10 abr. 2025.

MEDIANI, Ahmed; KAMAL, Nurkhalida; LEE, Soo Yee; ABAS, Faridah; FARAG, Mohamed A. Green Extraction Methods for Isolation of Bioactive Substances from Coffee Seed and Spent. **Journal of New Biotechnology**, v. 24, n. 42, p. 24-42, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15422119.2022.2027444>. Acesso em: 14 fev. 2025.

MELO, Marcelo M.R. de; BARBOSA, Hugo M.A.; PASSOS, Cláudia P.; SILVA, Carlos M. Supercritical fluid extraction of spent coffee grounds: Measurement of extraction curves, oil characterization and economic analysis. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 86, p. 150-159, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2013.12.016> Acesso em: 23 ago. 2024

MENEZES, G. S.; Estudo de potenciais aplicações relatadas de biorrefinarias como alternativa sustentável para geração de energia e bioprodutos. 2019. 51 p. Trabalho de Conclusão de Curso. Escola de Engenharia de Lorena – Universidade de São Paulo.

MONCADA, Jonathan; POSADA, John A.; RAMÍREZ, Andrea. Early sustainability assessment for potential configurations of integrated biorefineries. Screening of bio-based derivatives from platform chemicals. **Biofuels, Bioproducts & Biorefining**, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/bbb.1580>. Acesso em: 03 jan. 2025.

MONCADA, Jonathan; EL-HALWAGI, Mahmoud M.; CARDONA, Carlos A. Techno-economic analysis for a sugarcane biorefinery: Colombian case. **Bioresource Technology**, v. 135, p. 533-543, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.137>. Acesso em: 10 jan. 2025.

MONTENEGRO, Júlia; DOS SANTOS, Lauriza Silva; DE SOUZA, Rodrigo Gonçalves Gusmão; LIMA, Larissa Gabrielly Barbosa; MATTOS, Daniella Santos; VIANA, Bruna Prunes Pena Baroni; BASTOS, Ana Clara Santos da Fonseca; MUZZI, Leda; CONTE-JÚNIOR, Carlos Adam; GIMBA, Etel Rodrigues Pereira; FREITAS-SILVA, Otniel; TEODORO, Anderson Junger. Bioactive compounds, antioxidant activity and antiproliferative effects in prostate cancer cells of green and roasted coffee extracts obtained by microwave-assisted extraction (MAE). **Food Research International**, v. 140, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.110014>. Acesso em: 24 out. 2024.

MORENO-GARCIA, L.; ADJALLÉ, K.; BARNABÉ, S.; RAGHAVAN, G.S.V. Microalgae biomass production for a biorefinery system: Recent advances and the way towards sustainability. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 493-506, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.024. Acesso em: 30 out. 2024.

MUANGRAT, Rattana; PONGSIRIKUL, Israpong Recovery of spent coffee grounds oil using supercritical CO₂: Extraction optimisation and physicochemical properties of oil. *CyTA - Journal of Food*, v. 17, n. 1, p. 334-346, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/19476337.2019.1580771>. Acesso em: 26 ago. 2024.

MUKHERJEE, Alivia; OKOLIE, Jude A.; NIU, Catherine; DALAI, Ajay K. Techno – Economic analysis of activated carbon production from spent coffee grounds: Comparative evaluation of different production routes. **Energy Conversion and Management**: X, v. 14, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100218>. Acesso em: 10 jan. 2025.

MULLER, L. C.; PEARSON, J.; LOUW, J.; MARX, S.; KARMMEE, S. Hydrothermal liquefaction of spent coffee grounds followed by biocatalytic upgradation to produce biofuel: a circular economy approach. **Biofuels**, v. 13, n. 6, p. 779-788, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17597269.2021.1948757>. Acesso em: 10 dez. 2024.

MUSSATTO, S. I.; CARNEIRO, L. M.; SILVA, J.; ROBERTO, I. C.; TEIXEIRA, J. A. A study on chemical constituents and sugars extraction from spent coffee grounds. **Carbohydrate Polymers**, v. 83, n. 2, p. 368-374, 2011. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.07.063>>. Acesso em: 12 nov. 2024.

MYO, Hla; KHAT-UDOMKIRI, Nuntawat. Optimization of ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds from coffee pulp using propylene glycol as a solvent and their antioxidant activities. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 89, set. 2022, p. 106127. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106127>>. Acesso em: 22 abr. 2025.

NANDA, Sonil; AZARGOHAR, Ramin; DALAI, Ajay K.; KOZINSKI, Janusz A. An assessment on the sustainability of lignocellulosic biomass for biorefining. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 925-941, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.058>. Acesso em: 07 jan. 2025.

NASTI, Rita; GALEAZZI, Andrea; MARZORATI, Stefania; ZACCHERIA, Federica; RAVASIO, Nicoletta; BOZZANO, Giulia Luisa; MANENTI, Flavio; VEROTTA, Luisella. Valorisation of Coffee Roasting By-Products: Recovery of Silverskin Fat By Supercritical CO₂ Extraction. **Waste and Biomass Valorization**, v. 12, p. 6021-6033, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01435-9>. Acesso em: 09 nov. 2023.

NIZAMI, A.S.; SHAHZAD, K.; REHAN, M.; OUDA, O.K.M.; KHAN, M.Z.; ISMAIL, I.M.I.; ALMEELBI, T.; BASAHI, J.M.; DEMIRBAS, A. Developing waste biorefinery in Makkah: A way forward to convert urban waste into renewable energy. **Applied Energy**, v. 186, p. 189-196, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.116>. Acesso em: 15 jan. 2025.

NOVAIS, Beatriz Vieira et al. Mello: Indústria de café. 2021. 172 f.TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Apucarana, 2021. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/27953> . Acesso em: 08 out. 2023.

OIGMAN, S.S.; DE SOUZA, R.O.M.A.; SANTOS JÚNIOR, H.M.; HOVELL, A.M.C.; HAMERSKI, L.; REZENDE, C.M. Microwave-assisted methanolysis of green coffee oil. **Food Chemistry**, v. 134, p. 999-1004, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.03.007>. Acesso em: 05 dez. 2024.

OLIVEIRA, Paola Maressa Aparecida de; ALMEIDA, Rafael Henrique de; OLIVEIRA, Naila Albertina de; BOSTYN, Stephane; GONÇALVES, Cintia Bernardo; OLIVEIRA, Alessandra Lopes de. Enrichment of diterpenes in green coffee oil using supercritical fluid extraction – Characterization and comparison with green coffee oil from pressing. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 95, p. 137-145, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2014.08.016>. Acesso em: 02 dez. 2024.

OLIVEIRA, Adna Caroline Vale; SILVA, Aline de Souza; SPINOLA, Carolina de Andrade; MOREIRA, Ícaro Thiago Andrade. Bioeconomia Circular e biorrefinaria: conceitos, oportunidades e desafios considerando o uso de biomassa de microalgas no Brasil. **R. Bras. Planej. Desenv.**, Curitiba, v. 14, n. 01, p. 236-268, jan./abr. 2025.

OLIVEIRA, Naila Albertina de; CORNELIO-SANTIAGO, Heber P.; FUKUMASU, Heidge; OLIVEIRA, Alessandra Lopes de. Green coffee extracts rich in diterpenes – Process optimization of pressurized liquid extraction using ethanol as solvent. **Journal of Food Engineering**, v. 224, p. 148-155, mai. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.12.021>. Acesso em: 14 fev. 2025.

OKUR, Ilhami; SOYLER, Betul; SOYLER, Betul; OZTOP, Mecit Halil; ALPAS, Hami. Improving the Recovery of Phenolic Compounds from Spent Coffee Grounds (SCG) by Environmentally Friendly Extraction Techniques. **Molecules**, v. 26, n. 3, p. 613, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules26030613>. Acesso em: 15 dez. 2024.

OSMAN, Mohammed M.M.; SHAO, Xiaohou; ZHAO, Deling; BASHEER, Amir K.; JIN, Hongmei; ZHANG, Yingpeng. Methane Production from Alginate-Extracted and Non-Extracted Waste of *Laminaria japonica*: Anaerobic Mono- and Synergetic Co-Digestion Effects on Yield. **Sustainability**, v. 11, n. 5, p. 1269, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su11051269>. Acesso em: 31 jan. 2025.

OSORIO ARIAS, Juan Camilo; QUINTERO, Mónica; VELÁZQUEZ, Sebastián; ESCOBAR, Jhonathan. A novel process line for the valorization of industrial spent coffee grounds through coffee roasting technology and ultrasonic-assisted extraction. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, 2022. Disponível em:

<https://doi.org/10.1002/jctb.7259>. Acesso em: 18 dez. 2024.

PAGE, Matthew J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, v. 372, n. 71, 2021. Disponível em: [The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews | The BMJ](#). Acesso em: 10 set. 2024.

PANUSA, Alessia; ZUORRO, Antônio; LAVECCHIA, Roberto; MARROSU, Giancarlo; PETRUCCI, Rita. Recovery of Natural Antioxidants from Spent Coffee Grounds. Disponível em: < [Recovery of Natural Antioxidants from Spent Coffee Grounds | Journal of Agricultural and Food Chemistry](#) >. Acesso em: 07 dez. 2024.

PARK, Sunyong; KIM, Seok Jun; KIM, Ha Eun; KIM, Seon Yeop; OH, Kwang Cheol; CHO, Lahoon; JEON, Young Kwang; KIM, DaeHyun. Potential of Torrefied Coffee Grounds to Be Used as Fuel in Thermal Power Plants. **Journal of Biosystems Engineering**, v. 49, p. 112–119, 2024. Acesso em: 11 abr. 2025.

PASSOS, Cláudia P.; SÉRIO, Alexandre; FERREIRA, Sónia S.; KUKUROVÁ, Kristína; CICSAROVÁ, Zuzana; NUNCA, Fernando M.; COIMBRA, Manuel A. Microwave Assisted Extraction of Carbohydrate-rich Fractions from Spent Coffee Grounds: Formulation of Biscuits Enriched in Dietary Fibre. **Trends in Carbohydrate Research**, v. 7, n. 1, p. 12, 2015. Disponível em: [Microwave Assisted Extraction of Carbohydrate- rich Fractions from Spent Coffee Grounds: Formulation of Biscuits Enriched in Dietary Fibre. | EBSCOhost](#). Acesso em: 22 nov. 2024.

PASSOS, Cláudia P.; COIMBRA, Manuel A. Microwave superheated water extraction of polysaccharides from spent coffee grounds. **Carbohydrate Polymers**, v. 94, n. 1, p. 626-633, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.01.088>. Acesso em: 10 out. 2024.

PASSOS, Cláudia P.; MOREIRA, Ana S.P.; DOMINGUES, M. Rosário M.; EVTUGUIN, Dmitry V.; COIMBRA, Manuel A. Sequential microwave superheated water extraction of mannans from spent coffee grounds. **Carbohydrate Polymers**, v. 103, p.

333-338, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.12.053>.

Acesso em: 24 nov. 2024.

PAVLOVIĆ, Marija D.; BUNTIĆ, Aneta V.; ŠILER-MARINKOVIĆ, Slavica S.; DIMITRIJEVIĆ-BRANKOVIĆ, Suzana I. Ethanol influenced fast microwave-assisted extraction for natural antioxidants obtaining from spent filter coffee. **Separation and Purification Technology**, v. 118, p. 503-510, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.07.035>. Acesso em: 26 nov. 2024.

PEÑUELA-MARTÍNEZ, Aida Esther; HOWER-GARCÍA, Ingrid Paola; GUERRERO, Alvaro; AGUDELO-LAVERDE, Lina Marcela; BETANCOURT-RODRÍGUEZ, Henry; MARTÍNEZ-GIRALDO, Jhully. Physical, Sensorial, and Physicochemical Characteristics of Arabica Coffee Dried under Two Solar Brightness Conditions. **Processes**, v. 11, n. 10, p. 3016, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr11103016>. Acesso em: 10 out. 2024.

PEREIRA, R.G.F.A; VILLELA, T.C.; ANDRADE, E.T. **COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE GRÃOS DE CAFÉS (*Coffea arabica* L.) SUBMETIDOS A DIFERENTES TIPOS DE PRÉ-PROCESSAMENTO**. II Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil. 2001. Disponível em: < [poscolheita16.PDF \(ufv.br\)](#) >. Acesso em: 10 dez. 2023.

PETTINATO, Margherita; CASAZZA, Alessandro Alberto; PEREGO, Patrizia. The role of heating step in microwave-assisted extraction of polyphenols from spent coffee grounds. **Food and Bioproducts Processing**, v. 114, p. 227-234, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.01.006>. Acesso em: 10 dez. 2024.

PETTINATO, M.; DOMÍNGUEZ, J.M.; PEREGO, P.; FABIANO, B. A Biorefinery from Spent Coffee Grounds: from High-added Value Compounds to Energy by Innovative Processes. **Chemical Engineering Transactions**, v. 105, p. 331-336, 2023. Disponível em: <https://www.cetjournal.it/cet/23/105/056.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2024.

PHIMSEN, Songphon; KIATKITTIPONG, Worapon; YAMADA, Hiroshi; TAGAWA, Tomohiko; KIATKITTIPONG, Kunlanan; LAOSIRIPOJANA, Navadol; ASSABUMRUNGRAT, Suttichai. Oil extracted from spent coffee grounds for bio-

hydrotreated diesel production. **Energy Conversion and Management**, v. 126, p. 1028-1036, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.085>. Acesso em: 20 out. 2024.

PINALES-MÁRQUEZ, César D.; RODRÍGUEZ-JASSO, Rosa M.; ARAÚJO, Rafael G.; LOREDO-TREVIÑO, Araceli; NABARLATZ, Debora; GULLÓN, Beatriz; RUIZ, Héctor A. Circular bioeconomy and integrated biorefinery in the production of xylooligosaccharides from lignocellulosic biomass: A review. **Industrial Crops and Products**, v. 162, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113274>. Acesso em: 12 jan. 2025.

PIRES, Rita F. Dióxido de Carbono Supercrítico: Uma Alternativa para uma Síntese Mais Sustentável. **Química**, v. 45, n. 160, 2021. Disponível em: [pdf](#). Acesso em: 20 jul. 2024.

PLAZA, M.G.; GONZÁLEZ, A.S.; PEVIDA, C.; PIS, J.J.; RUBIERA, F. Valorisation of spent coffee grounds as CO₂ adsorbents for postcombustion capture applications. **Applied Energy**, v. 99, p. 272-279, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.05.028>. Acesso em 15 dez. 2024.

POZO, Cristina del; REGO, Filipe; YANG, Yang; PUY, Neus; BARTROLÍ, Jordi; FÀBREGAS, Esteve; BRIDGWATER, Anthony V. Converting coffee silverskin to value-added products by a slow pyrolysis-based biorefinery process. **Fuel Processing Technology**, v. 214, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106708>. Acesso em: 06 jan. 2025.

POZO, Cristina del; BARTROLÍ, Jordi; ALIER, Santi; PUY, Neus; FÀBREGAS, Esteve. Production of antioxidants and other value-added compounds from coffee silverskin via pyrolysis under a biorefinery approach. **Waste Management**, v. 109, p. 19-27, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.044>. Acesso em: 07 jan. 2025.

PRADHAN, Snigdhendubala; AL-AWADHI, Yousuf Mohammed; ALHERBAWI, Mohammad; MACKEY, Hamish R.; AL-ANSARI, Tareq; MCKAY, Gordon. Economic and Environmental Life Cycle Assessment of Spent Coffee Grounds Valorization for Bioenergy Production. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5037513>. Acesso

em: 05 jan. 2025.

PRIMAZ, Carmem T.; SCHENA, Tiago; LAZZARI, Eliane; CARAMÃO, Elina B.; JACQUES, Rosângela A. Influence of the temperature in the yield and composition of the bio-oil from the pyrolysis of spent coffee grounds: Characterization by comprehensive two dimensional gas chromatography. **Fuel**, v. 232, p. 572-580, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.05.097>. Acesso em: 05 dez. 2024.

QUEIROZ, Sonia C. N.; COLLINS, Carol H.; JARDIM, Isabel C. S. F. Métodos de extração e/ou concentração de compostos encontrados em fluidos biológicos para posterior determinação cromatográfica. **Química Nova**, v. 24, n. 1, p. 68-76, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422001000100013> . Acesso em: 02 dez. 2024.

RAHEEM, Salsabeel; AL-YAQOOBI, Atheer; ZNAD, Hussein; ABID, Hussein Rasool. Caffeine Extraction from Spent Coffee Grounds by Solid-liquid and Ultrasound- assisted Extraction: Kinetic and Thermodynamic Study. **Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering**, v. 25, n. 1, p. 49-57, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.31699/IJCPE.2024.1.5>. Acesso em: 17 dez. 2024.

RANIC, Marija; NIKOLIC, Marina; PAVLOVIC, Marija; BUNTIC, Aneta; SILER-MARINKOVIC, Slavica; DIMITRIJEVIC-BRANKOVIC, Suzana. Optimization of microwave-assisted extraction of natural antioxidants from spent espresso coffee grounds by response surface methodology. **Journal of Cleaner Production**, v. 80, p. 69-79, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.060>. **Acesso em: 10 dez. 2024.**

RAY, Aratrika; SINGHAL, Rekha S. Hydrogel formulation based on galactomannan from residual spent coffee ground confers bioactivities and viscosifying properties in milkshake. **Food Bioscience**, v. 55, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102958>. Acesso em: 14 jan. 2025.

REMÓN, Javier; RAVAGLIO-PASQUINI, Felipe; PEDRAZA-SEGURA, Lorena; ARCELUS-ARRILLAGA, Pedro; SUELVE, Isabel; PINILLA, José Luis. Caffeinating the

biofuels market: Effect of the processing conditions during the production of biofuels and high-value chemicals by hydrothermal treatment of residual coffee pulp. **Journal of Cleaner Production**, v. 302, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127008>. Acesso em: 14 out. 2024.

RENSBURG, T. Jansen van; SCHABORT, C.J. A Comparison of Batch Extracted Bio- oil and Continuous Hydrothermal Liquefaction Bio-oil using Spent Coffee Grounds as Biomass Feedstock. In: 10th International Conference on Advances in Science, Engineering, Technology & Healthcare (ASETH-18). 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.17758/EARES4.EAP1118262>. Acesso em: 10 nov. 2024.

RIBEIRO, Helena; MARTO, Joana; RAPOSO, Sara; AGAPITO, Maria. From coffee industry waste materials to skin-friendly products with improved skin fat levels. **European Journal of Lipid Science and Technology**, v. 115, n. 3, p. 330-336, mar. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ejlt.201200239>. Acesso em: 13 nov. 2024.

ROCHA, Maria Valdez Pontes; DE MATOS, Leonardo José Brandão Lima; DE LIMA, Larissa Pinto; FIGUEIREDO, Pablo Marciano da Silva; LUCENA, Izabelly Larissa; FERNANDES, Fabiano André Narciso; GONÇALVES, Luciana Rocha Barros. Ultrasound-assisted production of biodiesel and ethanol from spent coffee grounds. **Bioresource Technology**, v. 167, p. 343-348, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.06.032>. Acesso em: 22 nov. 2024.

RØDSRUD, Gudbrand; LERSCH, Martin; SJÖDE, Anders. History and future of world's most advanced biorefinery in operation. **Biomass and Bioenergy**, v. 46, p. 46- 59, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.03.028>. Acesso em: 13 jan. 2025.

RODRIGUES, F.; PALMEIRA-DE-OLIVEIRA, A.; DAS NEVES, J.; SARMENTO, B.; AMARAL, M. H.; OLIVEIRA, M. B. P. P. Coffee silverskin: A possible valuable cosmetic ingredient. **Pharmaceutical Biology**, v. 53, n. 3, 2014, p. 386-394. Disponível em: <<https://doi.org/10.3109/13880209.2014.922589>>. Acesso em: 22 abr. 2025.

ROMEIRO, G.A.; SALGADO, E.C.; SILVA, R.V.S.; FIGUEIREDO, M.K.-K.; PINTO, P.A.; DAMASCENO, R.N. A study of pyrolysis oil from soluble coffee ground using low temperature conversion (LTC) process. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 93, p. 47-51, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.09.006>. Acesso em: 15 jan. 2025.

ROMERO-GARCÍA, J.M.; NIÑO, L.; MARTÍNEZ-PATIÑO, C.; ÁLVAREZ, C.; CASTRO, E.; NEGRO, M.J. Biorefinery based on olive biomass. State of the art and future trends. **Bioresource Technology**, v. 159, p. 421-432, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.062>. Acesso em: 14 jan. 2025.

ROSENBERG, Julian N.; MATHIAS, Ashrith; KORTH, Karen; BETENBAUGH, Michael J.; OYLER, George A. Microalgal biomass production and carbon dioxide sequestration from an integrated ethanol biorefinery in Iowa: A technical appraisal and economic feasibility evaluation. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, p. 3865-3876, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.05.014>. Acesso em: 10 jan. 2025.

RUIZ, Héctor A.; CONRAD, Marc; SUN, Shao-Ni; SANCHEZ, Arturo; ROCHA, George J.M.; ROMANÍ, Aloia; CASTRO, Eulogio; TORRES, Ana; RODRÍGUEZ-JASSO, Rosa M.; ANDRADE, Liliane P.; SMIRNOVA, Irina; SUN, Run-Cang; MEYER, Anne S. Engineering aspects of hydrothermal pretreatment: From batch to continuous operation, scale-up and pilot reactor under biorefinery concept. **Bioresource Technology**, v. 299, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122685>. Acesso em: 11 jan. 2025.

SANTOS, Kallynca Carvalho dos. **Extração Sequencial da Borra de Café Industrial Usando Fluidos Pressurizados como Solventes**. 2024. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2024.

SATO, Takafumi; KUDO, Takeru; TAKAMATSU, Masato; HONMA, Tetsuo; ITOH, Naotsugu. Effects of temperature and pressure on hydrothermal extraction kinetics of green coffee beans. **The Journal of Supercritical Fluids**, v.213, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2024.106350>. Acesso em: 21 nov. 2024.

SAVIĆ, Ivan M.; SAVIĆ GAJIĆ, Ivana M.; GAJIĆ, Dragoljub G. Optimization of the Microwave-Assisted Extraction of Caffeine from Roasted Coffee Beans. **Foods**, v. 13, n. 2333, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/foods13152333>. Acesso em: 10 out. 2024

SEVERINI, C.; DEROSI, A.; FIORE, A.G. Ultrasound-assisted extraction to improve the recovery of phenols and antioxidants from spent espresso coffee ground: a study by response surface methodology and desirability approach. **European Food Research and Technology**, v. 243, p. 835-847, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00217-016-2797-7>. Acesso em: 20 nov. 2024.

SHANG, Y.-F.; XU, J.-L.; LEE, W.-J.; UM, B.-H. Antioxidative polyphenolics obtained from spent coffee grounds by pressurized liquid extraction. **South African Journal of Botany**, v. 109, p. 75-80, mar. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2016.12.011>. Acesso em: 10 fev. 2025.

SHARMA, Abhinav; RAY, Aratrika; SINGHAL, Rekha S. A biorefinery approach towards valorization of spent coffee ground: Extraction of the oil by supercritical carbon dioxide and utilizing the defatted spent in formulating functional cookies. **Future Foods**, v. 4, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100090>. Acesso em: 16 dez. 2024.

SHARMA, Sudhir K.; MISHRA, I. M.; SHARMA, M. P.; SAINI, J. S. Effect of particle size on biogas generation from biomass residues. **Biomass**, v. 17, n. 4, p. 251-263, 1988. DOI: 10.1016/0144-4565(88)90107-2.

SHEILATINA; JULINAWATI; FONNA, Shara; FATHURRAHMI. Utilization of tannin extract from spent coffee ground (SCG) as a green corrosion inhibitor on ferrous metals in acidic and alkaline media. **JPS**, Suplemento 1, n. 1, 2023, p. 168-176. DOI: [10.36490/journal-jps.com.v6i5-si.403](https://doi.org/10.36490/journal-jps.com.v6i5-si.403)

SIDŁO, Wiktoria; LATOSIŃSKA, Jolanta. Reuse of Spent Coffee Grounds: Alternative Applications, Challenges, and Prospects—A Review. **Applied Sciences**, v. 15, n. 1, p. 137, 2025. DOI: 10.3390/app15010137.

SILVA, Amanda de Oliveira e; GARCIA, Fernando Pereira; PERAZZINI, Maisa Tonon Bitti; PERAZZINI, Hugo. Design and economic analysis of a pre-treatment process of coffee husks biomass for an integrated bioenergy plant. **Environmental Technology & Innovation**, v. 30, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103131>. Acesso em: 12 jan. 2025.

SILVA, Wenes Ramos; CARREGOSA, Jhonattas de Carvalho; ALMEIDA-COUTO, Jessica Maria Ferreira; CARDOZO-FILHO, Lucio; WISNIEWSKI JR., Alberto. Management of de-oiled coffee beans biomass through pyrolysis process: Towards a circular bioeconomy. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 168, nov. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105763>. Acesso em: 14 fev. 2025.

SOARES, Belinda; GAMA, Nuno; FREIRE, Carmen S.R.; BARROS-TIMMONS, Ana; BRANDÃO, Inês; SILVA, Rui; NETO, Carlos Pascoal; FERREIRA, Artur. Spent coffee grounds as a renewable source for ecopolyols production. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 89, p. 1480-1488, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jctb.4457>. Acesso em: 03 jan. 2025.

SOMNUK, Krit; EAWLEX, Pichai; PRATEEPCHAIKUL, Gumpon. Optimization of coffee oil extraction from spent coffee grounds using four solvents and prototype-scale extraction using circulation process. **Agriculture and Natural Resources**, v. 51, p. 181-189, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.anres.2017.01.003>. Acesso em: 15 dez. 2024.

SOUSA, L. Massaro; FERREIRA, M. C. Spent coffee grounds as a renewable source of energy: An analysis of bulk powder flowability. **Particuology**, v. 43, p. 92-100, Apr. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.partic.2018.06.002>. Acesso em: 19 jan. 2025.

SUSILAWATI, I Dewa Ayu; AJUNDA, Ferina; DEWANTI, I Dewa Ayu Ratna. The Phytochemicals and the Antibacterial Activity of Roasted Robusta Coffee Extract Against *Streptococcus mutans*. **Journal of International Dental and Medical Research**, v. 17, n. 3, 2024, p. 948-954.

TAIFOURIS, Manuel; CORAZZA, Marcos L.; MARTÍN, Mariano. Integrated Design of

Biorefineries Based on Spent Coffee Grounds. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 60, 2021. Disponível em: [Integrated Design of Biorefineries Based on Spent Coffee Grounds | Industrial & Engineering Chemistry Research](#). Acesso em: 20 dez. 2024.

TAVEIRA, Jose Henrique da Silva. . Interaction of genotype, environment and processing in the chemical composition expression and sensorial quality of Arabica coffee. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 27, p. 2412-2422, 7 jul. 2016. DOI: 10.5897/AJAR2016.10832. Disponível em: <http://www.academicjournals.org/AJAR> Acesso em: 17 set. 2024.

TEDESCO, S.; STOKES, J. Valorisation to biogas of macroalgal waste streams: a circular approach to bioproducts and bioenergy in Ireland. **Chemical Papers**, v. 71, p. 721-728, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11696-016-0005-7>. Acesso em: 09 jan. 2025.

TINOCO-CAICEDO, Diana L.; MERO-BENAVIDES, Medelyne; SANTOS-TORRES, Myrian; LOZANO-MEDINA, Alexis; BLANCO-MARIGORTA, Ana M. Simulation and exergoeconomic analysis of the syngas and biodiesel production process from spent coffee grounds. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 28, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101556>. Acesso em: 11 jan. 2025.

TINÔCO CAICEDO, D.L.; SANTOS TORRES, M.; MERO-BENAVIDES, M.; PATIÑO LOPEZ, O.; LOZANO MEDINA, A.; BLANCO MARIGORTA, A.M. Simulation and Exergoeconomic Analysis of a Trigeneration System Based on Biofuels from Spent Coffee Grounds. **Energies**, v. 16, 1816, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en16041816>. Acesso em: 12 jan. 2025.

TODA, Tatiane Akemi; VISIOLI, Paola de Cássia Franco; OLIVEIRA, Alessandra Lopes de; RODRIGUES, Christianne Elisabete da Costa. Conventional and pressurized ethanolic extraction of oil from spent coffee grounds: Kinetics study and evaluation of lipid and defatted solid fractions. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 177, nov. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2021.105332>. Acesso em: 14 fev. 2025.

TODA, Tatiane Akemi; SANTANA, Ana Julia Morelli; FERREIRA, Julieta Adriana; PALLONE, Eliria Maria de Jesus Agnolon; DE AGUIAR, Claudio Lima; RODRIGUES, Christianne Elisabete da Costa. Evaluation of Techniques for Intensifying the Process of the Alcoholic Extraction of Coffee Ground Oil Using Ultrasound and a Pressurized Solvent. **Foods**, v. 11, n. 4, p. 584, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/foods11040584>. Acesso em: 12 dez. 2024.

TRAN, Thy Minh Kieu; AKANBI, Taiwo O.; KIRKMAN, Timothy; NGUYEN, Minh H.; VUONG, Quan Van. Recovery of Phenolic Compounds and Antioxidants from Coffee Pulp (*Coffea canephora*) Waste Using Ultrasound and Microwave-Assisted Extraction. **Processes**, v. 10, n. 5, p. 1011, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr10051011>. Acesso em: 08 dez. 2024.

TSAL, Wen-Tien; LIU, Sii-Chew; HSIEH, Ching-Hsiang. Preparation and fuel properties of biochars from the pyrolysis of exhausted coffee residue. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 93, p. 63-67, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.09.010>. Acesso em: 09 dez. 2024.

RAMOS-ANDRÉS, Marta; ANDRÉS-IGLESIAS, Cristina; GARCÍA-SERNA, Juan. Production of molecular weight fractionated hemicelluloses hydrolyzates from spent coffee grounds combining hydrothermal extraction and a multistep ultrafiltration/diafiltration. **Bioresource Technology**, v. 292, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121940>. Acesso em: 04 dez. 2024.

REDONDO-GÓMEZ, C.; RODRÍGUEZ QUESADA, M.; VALLEJO ASTÚA, S.; MURILLO ZAMORA, J. P.; LOPRETTI, M.; VEGA-BAUDRIT, J. R. Biorefinery of biomass of agro-industrial banana waste to obtain high-value biopolymers. **Molecules**, v. 25, n. 17, p. 3829, 2020.

ROGERS, W. J., BEZARD, G., DESHAYES, A., MEYER, I., PETIARD, V., MARRACCINI, P. (1999). Biochemical and molecular characterization and expression of the 11S-type storage protein from *Coffea Arabica* endosperm. **Plant Physiology and Biochemistry**, 37(4),

261-272. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0981-9428\(99\)80024-2](https://doi.org/10.1016/S0981-9428(99)80024-2). Acesso em: 10 dez. 2024.

ROSSETTI, R.P. Determinação de fenóis totais em frutos do café: Avaliações em diferentes fases de maturação. 2007.72f. Dissertação (mestrado em ciências) Universidade de São Paulo. São Carlos.

SAKDASRI, Winatta; KHAMSENG, Kanyagorn; WATTANAVAREE, Mookanda; CHANDEANG, Yaowapa; SAWANGKEAW, Ruengwit. Optimization of Polysaccharides Extraction from Spent Coffee Grounds (SCGs) by Pressurized Hot Water Extraction. **Biol. Life Sci. Forum**, v. 6, n. 1, p. 33, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/Foods2021-11053>. Acesso em: 14 fev. 2025.

SANTOS, Jaqueline Campiol dos. EXTRAÇÃO COM FLUIDO SUPERCRÍTICO E SUAS APLICAÇÕES NA OBTENÇÃO DE PRODUTOS NATURAIS. Porto Alegre. 2011. Disponível em: < [capa](#), [sumário](#), [resumo](#) >. Acesso em: 07 dez. 2024.

SANTOS, Julia Trancoso Fernandes dos. Phase equilibria modeling of biorefinery-related systems: a systematic review. 2020. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

SHARMA, Abhinav; RAY, Aratrika; SINGHAL, Rekha S. A biorefinery approach towards valorization of spent coffee ground: Extraction of the oil by supercritical carbon dioxide and utilizing the defatted spent in formulating functional cookies. **Future Foods**, v. 4, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100090>. Acesso em: 31 jan. 2025.

SOLOMAKOU, Nikoletta; LOUKRI, Anastasia; TSAFRAKIDOU, Panagiota; MICHAELIDOU, Alexandra-Maria; MOURTZINOS, Ioannis; GOULA, Athanasia M. Recovery of phenolic compounds from spent coffee grounds through optimized extraction processes. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 25, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100592>. Acesso em: 05 nov. 2024.

STYLIANOU, M.; AGAPIOU, A.; OMIROU, M. et al. Converting environmental risks to benefits by using spent coffee grounds (SCG) as a valuable resource. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, p. 35776-35790, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2359-6>. Acesso em: 02 out. 2024

TSUKUI, A.; REZENDE, C. M. Extração Assistida por Micro-ondas e Química Verde . **Revista Virtual Química**. 6 (6), 1713-1725. 2014. DOI: 10.5935/1984-6835.20140111. Acesso em: 01 out. 2024

TSUKUI, A.; SANTOS JÚNIOR, H.M.; OIGMAN, S.S.; DE SOUZA, R.O.M.A.; BIZZO, H.R.; REZENDE, C.M. Microwave-assisted extraction of green coffee oil and quantification of diterpenes by HPLC. **Food Chemistry**, v. 164, p. 266-271, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.05.039>. Acesso em: 01 nov. 2024.

UNICADATA. União das Indústrias de Cana-de-açúcar. Moagem de cana-de-açúcar e produção de açúcar e etanol - safra 2017/2018. 2019. Disponível em <http://encurtador.com.br/pqrT9>. Acesso em 14 fev. 2025.

UPADHYAY, Rohit; RAMALAKSHMI, K.; RAO, L. Jagan Mohan Microwave-assisted extraction of chlorogenic acids from green coffee beans. **Food Chemistry**, v. 130, n. 1, p. 184-188, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.06.057>. Acesso em: 08 nov. 2024.

VAKALIS, S.; MOUSTAKAS, K.; BENEDETTI, V.; et al. The “COFFEE BIN” concept: centralized collection and torrefaction of spent coffee grounds. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, p. 35473–35481, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04919-3>. Acesso em: 31 jan. 2025.

VÁRADY, Matúš; TAUCHEN, Jan; FRAŇKOVÁ, Adéla; KLOUČEK, Pavel; POPELKA, Peter. Effect of method of processing specialty coffee beans (natural, washed, honey, fermentation, maceration) on bioactive and volatile compounds. **LWT**, v. 172, 30 dez. 2022, p. 114245. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114245>>. Acesso em: 22 abr. 2025.

VON WIELLIGH, J.; SCHABORT, C. J.; VENTER, R.; MARX, S. The Evaluation of Spent Coffee Grounds as Feedstock for Continuous Hydrothermal Liquefaction. 2018. Disponível em: <https://repository.nwu.ac.za/handle/10394/34212>. Acesso em: 10 jan. 2025

VU, Danh C.; VU, Quyen T.; HUYNH, Long; LIN, Chung-Ho; ALVAREZ, Sophie; VO, Xuyen T.; NGUYEN, Trang H. D. Evaluation of fatty acids, phenolics and bioactivities of spent coffee grounds prepared from Vietnamese coffee. **International Journal of Food Properties**, v. 24, n. 1, p. 1548-1558, 2021. Disponível em: [10.1080/10942912.2021.1977657](https://doi.org/10.1080/10942912.2021.1977657). Acesso em: 13 fev. 2025.

WĄDRZYK, Mariusz; KATERLA, Jakub; JANUS, Rafał; LEWANDOWSKI, Marek; PLATA, Marek; KORZENIOWSKI, Łukasz. High-Energy-Density Hydrochar and Bio- Oil from Hydrothermal Processing of Spent Coffee Grounds—Experimental Investigation. **Energies**, v. 17, n. 24, p. 6446, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en17246446>. Acesso em: 12 nov. 2024

WILLIAMSON, Kathryn; BANKER, Thomas; ZHAO, Xiaoying; ORTEGA-ANAYA, Joana; JIMENEZ-FLORES, Rafael; VODOVOTZ, Yael; HATZAKIS, Emmanuel. Spent coffee ground oil as a valuable source of epoxides and epoxidation derivatives: Quantitation and characterization using low-field NMR. **LWT - Food Science and Technology**, v. 165, 1 ago. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113719>. Acesso em: 14 fev. 2025.

WOO, Duk-Gam; KIM, Sang Hyeon; KIM, Tae Han. Solid Fuel Characteristics of Pellets Comprising Spent Coffee Grounds and Wood Powder. **Energies**, v. 14, n. 2, art. 371, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en14020371>. Acesso em: 11 abr. 2025.

YAMAKAWA, Celina K.; QIN, Fen; MUSSATTO, Solange I. Advances and opportunities in biomass conversion technologies and biorefineries for the development of a bio-based economy. **Biomass and Bioenergy**, v. 119, p. 54-60, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.09.007>. Acesso em: 31 jan. 2025.

YANG, Linxi; NAZARI, Laleh; YUAN, Zhongshun; CORSCADDEN, Kenneth; XU, Chunbao (Charles); HE, Quan (Sophia). Hydrothermal liquefaction of spent coffee grounds in water medium for bio-oil production. **Biomass and Bioenergy**, v. 86, p. 191-198, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.02.005>. Acesso em: 10 nov. 2024.

YANG, Jie; CHEN, Hao; LIU, Qi; ZHOU, Ningning; WU, Yulong; HE, Quan (Sophia). Is it feasible to replace freshwater by seawater in hydrothermal liquefaction of biomass for biocrude production? **Fuel**, v. 282, p. 118-870, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118870>. Acesso em: 10 out. 2024.

YANG, J.; CHEN, H.; NIU, H.; MCNUTT, J.; HE, Q. A Comparative Study on Thermochemical Valorization Routes for Spent Coffee Grounds. **Energies**, v. 14, 3840, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en14133840>. Acesso em: 31 jan. 2025.

YANG, Linxi; NAZARI, Laleh; YUAN, Zhongshun; CORSCADDEN, Kenneth; XU, Chunbao (Charles); HE, Quan (Sophia). Hydrothermal liquefaction of spent coffee grounds in water medium for bio-oil production. **Biomass and Bioenergy**, v. 86, p. 191-198, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.02.005>. Acesso em: 10 nov. 2024.

YANG, Jie; NIU, Haibo; CORSCADDEN, Kenneth; HE, Quan; ZHOU, Ningning. MW-assisted hydrothermal liquefaction of spent coffee grounds. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/cjce.24270>. Acesso em: 20 out. 2024.

YEOH, Lyn; NG, Kok Siew. Future Prospects of Spent Coffee Ground Valorisation Using a Biorefinery Approach. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 179, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106123>. Acesso em: 31 jan. 2025.

YOO, Da Eun; JEONG, Kyung Min; HAN, Se Young; KIM, Eun Mi; JIN, Yan; LEE, Jeongmi. _Deep eutectic solvent-based valorization of spent coffee grounds. **Food Chemistry**, v. 258, p. 343-350, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.02.096>. Acesso em: 10 out. 2024.

YORDANOV, D.; MUSTAFA, Z.; MILINA, R.; TSONEV, Z. Multi-criteria optimisation process of the oil extraction from spent coffee ground by various solvents. **Oxidation Communications**, v. 39, p. 1478-1487, 2016. Disponível em: [Multi-criteria optimisation process of the oil extraction from spent coffee ground by various solvents](#) | [Request PDF](#). Acesso em: 12 out. 2024.

YORDANOV, D. I.; TSONEV, Z. B.; PALICHEV, T. V.; MUSTAFA, Z. A. A new approach for production of coffee oil from waste coffee residue as a feedstock for biodiesel. **Petroleum & Coal**, v. 55, n. 2, p. 74-81, 2013. Disponível em: [\(PDF\) A new approach for production of coffee oil from waste coffee residue as a feedstock for biodiesel](#). Acesso em: 10 out. 2024.

ZANG, Guiyan; SHAH, Ajay; WAN, Caixia. Techno-economic analysis of an integrated biorefinery strategy based on one-pot biomass fractionation and furfural production. **Journal of Cleaner Production**, v. 260, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120837>. Acesso em: 31 jan. 2025.

ZENGİN, Gokhan; SINAN, Kouadio Ibrahime; MAHOMOODALLY, Mohamad Fawzi; ANGELONI, Simone; MUSTAFA, Ahmed M.; VITTORI, Sauro; MAGGI, Filippo; CAPRIOLI, Giovanni. Chemical Composition, Antioxidant and Enzyme Inhibitory Properties of Different Extracts Obtained from Spent Coffee Ground and Coffee Silverskin. **Foods**, v. 9, n. 6, p. 713, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/foods9060713>. Acesso em: 05 out. 2024.

ZHANG, Shiqi; YANG, Jie; WANG, Sheng; RUPASINGHE, H.P. Vasantha; HE, Quan (Sophia). Experimental exploration of processes for deriving multiple products from spent coffee grounds. **Food and Bioprocess Processing**, v. 128, p. 21-29, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.04.012>. Acesso em: 07 out. 2024

APÊNDICE 1 – TABELAS COM OS RESULTADOS DA PESQUISA COM A METODOLOGIA PRISMA

Na tabela a seguir, são apresentados os resultados da pesquisa do Soxhlet com a metodologia PRISMA.

TABELA 21 - RESULTADOS DA PESQUISA DO SOXHLET COM A METODOLOGIA PRISMA

Fonte	Solvente	Tempo (h)	Especie de café	Tipo de café	Rendimento em óleo (base seca) (%)	Capacidade antioxidante (mg GAE/ g de borra de café)	Ácidos graxos livres (%)	Açúcares (%)
Efthymiopoulos et al. (2018)	Pentano	-	-	Instantâneo	18,61	-	11	-
Efthymiopoulos et al., (2018)	Hexano	-	-	Instantâneo	24,26	-	16	-
Efthymiopoulos et al., (2018)	Tolueno	-	-	Instantâneo	22,51	-	23	-
Efthymiopoulos et al., (2018)	Diclorometano	-	-	Instantâneo	23,83	-	27	-
Efthymiopoulos et al., (2018)	Etanol	-	-	Instantâneo	20,90	-	33	-
Bravo et al., (2013)	Água	1	-	Arábica	-	92,98 ± 2,45	-	-
Bravo et al., (2013)	Água	3	-	Arábica	-	110,35 ± 1,40	-	-
Al-Hamamre et al., (2012)	Pentano	-	-	-	15,18	-	3,55	-
Al-Hamamre et al., (2012)	Hexano	-	-	-	15,28	-	3,65	-
Al-Hamamre et al., (2012)	Tolueno	-	-	-	-	14,32	4,15	-
Al-Hamamre et al., (2012)	Clorofórmio	-	-	-	-	8,60	4,55	-
Al-Hamamre et al., (2012)	Acetona	-	-	-	-	12,92	3,85	-
Al-Hamamre et al., (2012)	Isopropopanol	-	-	-	10,68	6,40	-	-
Al-Hamamre et al., (2012)	Etanol	-	-	-	9,18	3,25	-	-
Abdullah & Bulent Koc, (2013)	Hexano	8	-	-	30	-	-	-
AHANGARI & SARGOLZAEI, (2013)	Hexano	6	-	-	100 ± 0,1	-	-	-
AHANGARI & SARGOLZAEI,	Benzeno de petróleo	6	-	-	99,40 ± 0,1	-	-	-

(2013)

	Hexano	-	-	177,5 ±25,2	-	-
Andrade et al., (2012)				12 ± 1		
Andrade et al., (2012)	Diclorometano	-	-	173,7 ± 17,3	-	-
Andrade et al., (2012)	Acetato de etila	-	-	182,6 ± 28,2	-	-
Andrade et al., (2012)	Etanol	-	-	119,5 ± 2,1	-	-
Barbosa et al. (2014)	n-hexano	4	Expresso	15,03	-	-
Akgün et al. (2014)	Diclorometano	-	-	1,53%	-	-
Akgün et al. (2014)	N-hexano	-	-	89	-	-
Haile, Asfaw, Asfaw (2013)	N- hexano	6	-	19,73	-	-
Caetano et al., (2012)	n-hexane/ isopropanol (50:50, vol/vol)	3	-	21,5	-	-
Caetano et al., (2012)	Hexano	3	-	21,5	-	-
Caetano et al., (2012)	Propanol	6,8	-	21,0	-	-
Calixto et al. (2011)	Isopropanol	6,8	-	21,0	-	-
Yordanov et al. (2013)	Etanol	-	-	14,0		
Yordanov et al. (2013)	N-hexano	2	-	8,40		
				26,4±0,4		
-Acevedo et al. (2013)	Hexano	5	-	97,5±0,5 %		
Kwon et al., (2013)	N- hexano	6	-	-		
Ballesteros et al. (2015)	Éter de petróleo (1:5 (w/v)	4	-	-		39%
Phimsen et al. (2016)	400 g/3l	8	-	-		
	Hexano			13		
Somnuk et al., (2017)	Hexano	0,57	-	14,570	-	
Somnuk et al., (2017)	Etanol anidro	0,57	-	12,9880	-	
Somnuk et al., (2017)	Etanol hidratado	0,57	-	11,1277	-	
Somnuk et al., (2017)	Metanol	0,57	-	8,1410		
Dong et al. (2017)	Éter de petróleo	16 – 18	-	-6,63 ± 0,65 g/100 g DW (grão de café robusta)		

Fonte: A autora (2025)

17 e 18 : rendimentos em massa

Na tabela a seguir, são apresentados os resultados da pesquisa de extração

supercrítica com a metodologia PRISMA:
TABELA 22 - RESULTADOS DA PESQUISA DE EXTRAÇÃO SUPERCRTICA COM A METODOLOGIA PRISMA

Autor	Quantidade de etanol adicionada (% de massa)	Vazão de kg CO2/h	Tempo (min)	Temperatura (°C)	Pressão(MPa)	Rendimento(%)	Composição do óleo	Concentração de diterpenos (mg /goil)
Cruz et al., (2014)	-	7	200	50	25	91	-	-
Cruz et al., (2014)	-	10	150	50	25	100	-	-
Cruz et al., (2014)	-	19	75	50	25	98	-	-
Barbosa <i>et al.</i> (2014)	2,5	0,72	-	40	14	-	-	57,45
			-					
Barbosa <i>et al.</i> (2014)	0	0,72	-	55	14	-	-	107,44
			-					
Barbosa <i>et al.</i> (2014)	5	-	40	16,5	-	-	55,84	-
		-						
Barbosa <i>et al.</i> (2014)	0	-	70	16,5	-	-	94,39	-
		-						
Acevedo <i>et al.</i> (2013)	-	-	60	30	25	-	-	-
		-						
Acevedo <i>et al.</i> (2013)	-	-	40	9,8	1,48	-	-	-
		-						
Acevedo <i>et al.</i> (2013)	-	-	80	37,9	24,53	-	-	-
		-						
Hurtado-Benavides, Dorado, Sánchez-Camargo (2016)	-	-	35,9	33,1	8,9a	-	-	-
		-						
AHANGARI e SARGOLZAEI(2012)	-	-	40	20	83,77 ± 0,07	-	-	-
		-						
AHANGARI e SARGOLZAEI(2012)	-	-	50	25	89,70 ± 0,10	-	-	-
		-						
AHANGARI e SARGOLZAEI(2012)	-	-	60	30	90,65 ± 0,09	-	-	-
		-						
								-
Andrade <i>et al.</i> (2012)	0	150	40	10	5	-	-	-

Andrade <i>et al.</i> (2012)	0	150	40	20	9	-	-
Andrade <i>et al.</i> (2012)	0	150	40	30	11	-	-
Andrade <i>et al.</i> (2012)	0	150	60	30	9	-	-
Andrade <i>et al.</i> (2012)	8%	150	60	10	6,3 ± 0,5	-	-
Andrade <i>et al.</i> (2012)	15%	150	60	10	14 ± 2	-	-
Ribeiro <i>et al.</i> (2013)	0,5 kg por batelada	60	55	25	12,1		33,1% de- ácido palmitico e 44,7% de ácido linoleico
Araújo <i>et al.</i> (2019)	0	-	40	20	12		-
Araújo <i>et al.</i> (2019)	0	-	60	15	1	-	-
Cornelio-Santiago <i>et al.</i> (2017)	scCO ₂		-	70	20	3,2 (b)	-
Cornelio-Santiago <i>et al.</i> (2017)	scCO ₂		-	70	30	5 (b)	-
Melo <i>et al.</i> (2014)	0	1,0	-	60	20	14,0	-
Oliveira <i>et al.</i> (2014)	0		-	90	30	6,5 (c)	-
Akgun <i>et al.</i> (2014)		24 mL/min	-	150	50	15 ± 2 (d)	-
Georgieva <i>et al.</i> (2018)	10% etanol		-	60	30	12	-
Muangrat, Pongsirikul (2018)	-		120	50	20	12,14	-
Marto <i>et al.</i> (2016)	-	15	60	55	25	35	-

Ramos Andrés,Andrés- Iglesias,García- Serna (2019)	-	5	120	45	30	14,04	-	
Manna, Bugnone, Banchero (2015)	-		-	50-70	20 – 30	15-20	-	
Araújo <i>et al.</i> (2019)	scCO2+EtOH (0.5:1)	-	40	10	10,35		-	-
Araújo <i>et al.</i> (2019)	scCO2+EtOH (0.5:1)	-	60	15	9,13 ± 0,34		-	-
Araújo <i>et al.</i> (2019)	scCO2+EtOH (0.5:1)	-	80	10	0,46		-	-
Calixto <i>et al.</i> (2011)	methanol-to- carbon dioxide molar ratio of 0.11		-	299,85	10		93,4	-
Bitencourt <i>et al.</i> (2020)	CO ₂ Supercrítico + Etanol (10:90 w/w)		-	59,85	40		25 ± 2	-
Sharma, Ray, Singhal (2021)			90	80	35		14,06 ± 1,33	-

A: foram utilizados grãos de café torrados para fazer a extração do óleo

B: foram utilizados grãos de café verde arábicas na extração

C: grãos de café de espécie não identificada para a extração

D: grãos de café usados

Fonte: A autora (2025)

10 : obteve rendimento em óleo (%)

17 : obteve rendimento em triglicerídeos

TABELA 23- RESULTADOS DE PESQUISA COM ULTRASSOM COM A METODOLOGIA PRISMA

Autor	Temperatura (°C)	Razão líquido-sólido (solvent/SCG, mL g ⁻¹)	Potência (W)	Solvente	Tempo (min)	Rendimento (% goil/gSCG)	TPC mg/g grãos secos de cafeína	Polifenóis (%)
Rocha <i>et al.</i> (2014)	20	2	-	Hexano	-	3 ± 1	-	-
Rocha <i>et al.</i> (2014)	20	4	-	Hexano	-	9 ± 1	-	-
Rocha <i>et al.</i> (2014)	60	2	-	Hexano	-	3 ± 1	-	-
Rocha <i>et al.</i> (2014)	60	4	-	Hexano	-	12 ± 1	-	-
Rocha <i>et al.</i> (2014)	40	3	-	Hexano	-	7 ± 1	-	-
Rocha <i>et al.</i> (2014)	40	3	-	Hexano	-	6 ± 1	-	-
Rocha <i>et al.</i> (2014)	40	3	-	Hexano	-	7 ± 1	-	-
AHANGARI e SARGOLZAEI (2012)	-	1 g SCG :2 ml de solvente	-	Benzeno de petróleo	45	83,23 ± 0,1	-	-
AHANGARI e SARGOLZAEI (2012)	-	1 g SCG :2 ml de solvente	-	Hexano	45	83,83 ± 0,2	-	-
Andrade <i>et al.</i> (2012)	-		55 kHz	Acetato de etila	120	9,7 ± 0,1	-	-
Andrade <i>et al.</i> (2012)	-		55 kHz	Etanol	120	12,2 ± 0,5	-	-
Severini, Derossi e Fiore (2016)	-	1,25 metanol e água			60	-	24	-
Okur <i>et al.</i> (2021)	25	80 methanol solutions (10% w/v)	400		5	-	7	-
Okur <i>et al.</i> (2021)	25	80 methanol solutions (10% w/v)	400		10	-	7,5	-
Al-Dhabi, Ponmurugan e Jeganathan (2017)	30	17,5 g/ml	100	Etanol	25	-	33,69	-
Al-Dhabi, Ponmurugan e Jeganathan (2017)	30	17,5 g/ml	300	Etanol	25	-	34,52	-
Al-Dhabi, Ponmurugan e Jeganathan (2017)	50	17,5 g/ml	100	Etanol	25	-	33,31	-
Al-Dhabi, Ponmurugan e Jeganathan (2017)	40	5 g/ml	200	Etanol	5	-	33,52	-
-Al-Dhabi, Ponmurugan	50	5 g/ml	200	Etanol	45	-	34,41	-

e-Jeganathan (2017)									
Al-Dhabi, Ponmurugan e Jeganathan (2017)	30	30 g/ml	200	Etanol	25	-	33,71	-	
Andrade <i>et al.</i> (2012)	-		55 kHz	Hexano	120	9 ± 1		-	
Andrade <i>et al.</i> (2012)	-		55 kHz	Diclorometano	120	9,9 ± 0,1		-	
Okur <i>et al.</i> (2021)	25	80 methanol solutions (10% w/v)	400		15	-	8,2	-	
Goh <i>et al.</i> (2020)		- 4,5 mL/g		Hexano	12,9%	-		-	
Goh <i>et al.</i> (2020)		- 4,5 mL/g		Metanol	10%	-		-	
Goh <i>et al.</i> (2020)		- 4,5 mL/g		Clorofórmio	11,6%		-	-	
				Metanol					
Zengin et al (2020)	20				120	-	63,25 ±	-	
							0,10		
	70		75			-		32,36 ±	
Puangngoen, Devahastin (2025)								0,36	
Giroto <i>et al.</i> (2023)		-	152 micrometros (amplitude de)	Etanol	10	-	24,01		
			75% de amplitude (b)						
Nutrizio et al (2023)					9				525,68 ±0,03
Raheem <i>et al.</i> (2024)	55			Água		-		98%	
Arias <i>et al.</i> (2022)13	64	1:10 g/mL.	100	Água	16	-	0,1006 (mg g ⁻¹ d.b.)		
Erdawati <i>et al.</i> (2022)	55	1:10 (g/g)		Solvente eutético natural	6	17,6% para borras de café tratadas com NADES			
Toda <i>et al.</i> (2022)	55	1:15 (sol-liq)	600	Etanol absoluto	-	82%			
Beaudor <i>et al.</i> (2023)	-	40 mL/g	400	50% de etanol	-				

Le <i>et al.</i> (2017)	Temperatura ambiente	1:20		n-hexano & benzeno de petróleo	-	8% de óleo	83%
Batista <i>et al.</i> (2023)	65 +/- 5		500	Solução de cloreto de zinco	-	56,35% de polissacarídeos insolúveis	
Tran <i>et al.</i> (2022)	60		250	Água	35	20	
Solomakou <i>et al.</i> (2022)	60		130		20	18,52	
Severini, Derossi, Fiore (2016)	Temperatura ambiente		40 kHz	Razão metanol: água de 1,25	60	24	

A tabela a seguir apresenta o resultado dos artigos selecionados utilizando a metodologia PRISMA para a extração assistida por micro-ondas

TABELA 24 - RESULTADOS DE EXTRAÇÃO ASSISTIDA POR MICRO-ONDAS COM A METODOLOGIA PRISMA

Autor	Tempo (s)	Temperatura (°C)	Solvente	Potência (W)	Rendimento de óleo (%)	Rendimento de carboidratos	TPC mg GAE/g de borra de café	DPPH	Mar (%)
Ranic <i>et al.</i> (2014)	40	-	Solução hidroet anólica a 65%	400	-	-	55,918	81,520	
Ranic <i>et al.</i> (2014)	110	-	Solução hidroet anólica a 65%	550	-	-	29,423	51,870	
Ranic <i>et al.</i> (2014)	40	-	Solução hidroet anólica a 65%	240	-	-	66,100	91,350	
Ranic <i>et al.</i> (2014)	180	-	Solução hidroet anólica a 65%	400	-	-	19,055	45,250	
Ranic <i>et al.</i> (2014)	11,01	-	Solução hidroet anólica a 65%	550	-	-	54,782	70,760	
Pavlović <i>et al.</i> (2013)	40	-	Solução hidroeta nólica	80	-	-	398,95	90,47% (20 µg/mL)	
Yordanov <i>et al.</i> (2016)	600	-	1:1 n-hexano e metanol	600	15,11	-	-	-	

López-Barrera <i>et al.</i> (2016)	20	-	20% Solução etanólica a (1:9 solid/liqu id ratio)	80	-	-	5,66	-
Passos e Coimbra (2023)	120	170	Água		14,8%		-	-
Passos e Coimbra (2023)	120	180	Água	-	20,4%		-	-
Passos e Coimbra (2023)	120	200	Água	-	19,5%		-	-
Passos e Coimbra (2023)	120	200	Água	-	19,4%		-	-
Passos e Coimbra (2023)	120	200	Água	-	23,4%		-	-
Passos e Coimbra (2023)	120	200	Água	-	29,0%	-	-	-
AHANGARI e SARGOLZAEI(2012)	600	-	Hexano		200	77,84 ± 0,3	-	-
AHANGARI e SARGOLZAEI(2012)	600	-	Hexano		800	82,63 ± 0,1	-	-
AHANGARI e SARGOLZAEI(2012)	600	-	Benzeno de petróleo		200	77,25 ± 0,1	-	-

AHANGARI e SARGOLZAEI(2012)	600	-	Benzen o de petróleo	800	82,04 ± 0,2	-	-
Yordanov et al. (2013)	1200	-		600	10,27	-	-
Yordanov et al. (2013)	1200	-		450	8,67	-	-
Yordanov et al. (2013)	1200	-		300	8,53	-	-
Upadhyay, Ramalakshmi, Rao (2012)	300	50	Metanol	800	9,05 ±0,07		
Upadhyay, Ramalakshmi, Rao (2012)	300	50	Etanol	800	8,95 ±0,07		
Upadhyay, Ramalakshmi, Rao (2012)	300	50	Água	800	18,1 ±0,14		
Tsukui <i>et al.</i> (2014)	120	30	Grão de café arábica	-	64,2 ± 0,9 g/kg of coffee bean	-	-
Pettinato, Casazza e Perego (2019)	7200	120	Etanol 54%	500	-	117,7 ±6,1	143,8 ± 8,6 µmol TE/g
Campos-Vega <i>et al.</i> (2015)	20	-	(1:9 taxa sólido líquido) 20% de etanol	80	-	10,3	107,4 micromo l de Trolox/g de amostra

Coelho <i>et al.</i> (2021)	-	75	68,9% de etanol,	-	-	117,7 ±6,1	-
Budaraju (2017)	49	-	Etanol e água	966,34	-	57,49	-
Chen et al (2020)	600	-	Etanol	350	10,58 ± 0,34	-	-
Montenegro et al (2021)	40	50	8:1 líquido/s ólido	240	-	-	11
Passos et al (2014)	180	200		-	-	-	-
Passos <i>et al.</i> (2015)	1800	200		-	-	-	-
Oigman <i>et al.</i> (2012)	180	100	500 mg de óleo de café verde e 3 mL de metanol.	-	-	-	-
Hibbert, Welham e Zein (2019)	600	95	Hexano	11,54			-
Dong et al (2018)	900	80	A vácuo	-	7,0	50%	

A seguir, são apresentados os resultados da pesquisa realizada utilizando a metodologia PRISMA para a reação de pirólise.

TABELA 25 – RESULTADOS DA PESQUISA COM A METODOLOGIA PRISMA COM A PIRÓLISE

Autor	Temperatura (°C)			Tempo de residência (s)	Rendimento de bio-óleo (%)	Rendimento em biocarvão (%)	Rendimento em gás (%)	HHV (MJ/kg)
Bok <i>et al.</i> (2012)	527			-	55	22	16	22
Bok <i>et al.</i> (2012)	477			-	48	27	14	23
Bok <i>et al.</i> (2012)	427			-	42	34	11	18
Bedmutha <i>et al.</i> (2011)	450	-	40	31		19		-
Bedmutha <i>et al.</i> 2011	550	-	36	22		25		-
Kelkar <i>et al.</i> (2015)	429	32	59,6	20,6		22,3		-
Kelkar <i>et al.</i> (2015)	571	32	57,8	17,3		24,9		-
Kelkar <i>et al.</i> (2015)	500	32	61,5	18,3		25,9		-
Cho <i>et al.</i> (2015)	200	-	-	96,8		-		-
Cho <i>et al.</i> (2015)	300	-	-	59,7		-		-
Cho <i>et al.</i> (2015)	400	-	-	35,8		-		-
Cho <i>et al.</i> (2015)	500	-	-	28,6				-
Cho <i>et al.</i> (2015)	600	-	-	26,8				
Cho <i>et al.</i> (2015)	700	-	-	25,8				
Cho <i>et al.</i> (2015)	450	60	45	30		25		
Cho <i>et al.</i> (2015)	500	60	42	33		25		
Cho <i>et al.</i> (2015)	550	60	40	35		25		
Tsai, Liu e Hsieh (2012)	400	-	-	38,6 ± 0,5		-		
Tsai, Liu e Hsieh (2012)	500	-	-	29,8 ± 1,4		-		-
Tsai, Liu e Hsieh (2012)	600	-	-	28,0 ± 1,1		-		-
Tsai, Liu e Hsieh (2012)	700	-	-	26,6 ± 1,2		-		-

Stylianou <i>et al.</i> (2018)	400	-	43,8	35,2	17,6	-
Stylianou <i>et al.</i> (2018)	500	-	43,8	-	-	-
<u>Stylianou</u> <i>et al.</i> (2018)	600	-	-	19,6	32,1	-
Primaz <i>et al.</i> (2018)	450	-	28	24	26	-
Primaz <i>et al.</i> (2018)	550	-	27	22	32	-
Krause <i>et al.</i> (2019)	450	-	29,53	25,78	44,69	-
Krause <i>et al.</i> (2019)	500	-	27,74	25,83	46,43	-
Krause <i>et al.</i> (2019)	600	-	31,22	23,68	45,1	-
Luz <i>et al.</i> (2018)	400	2	52	-	-	24,1
Luz <i>et al.</i> (2018)	450	2	48	-	-	24,5
Luz <i>et al.</i> (2018)	500	2	45	-	-	25,0
Luz <i>et al.</i> (2018)	550	2	40	-	-	25,3
Romeiro <i>et al.</i> (2012)	380	60	45	30	25	33,14
Vakalis <i>et al.</i> (2019)	450	60	-	78	15	24,5
Vakalis <i>et al.</i> (2019)	500	60	-	80	12	25,0
Vakalis <i>et al.</i> (2019)	550	60	-	83	10	25,3
Primaz <i>et al.</i> (2018)	600	900	27	22	26	-
Matrapazi (2020)	620	-	40	22	20	-

Fonte: A autora (2025)

As tabelas a seguir apresentam os resultados, ou seja, os artigos selecionados a partir da pesquisa feita com a metodologia PRISMA para a reação de hidrotermoliquefação (HTL).

TABELA 26 – RESULTADO DA PESQUISA FEITA COM A METODOLOGIA PRISMA SOBRE HIDROTERMOLIQUEFAÇÃO COM BORRA DE CAFÉ

Autor	Temperatura (°C)	Pressão (Mpa)	Tempo de retenção (min)	Razão solvente/biomassa	Solvente
Yang <i>et al.</i> (2016)	300	2	10	5:1	Água
Yang <i>et al.</i> (2016)	275	2	10	10:1	Água
Yang <i>et al.</i> (2016)	275	2	10	20:1	Água
Conde e Mussato (2016)	120	-	20	20 mL/g SCG	Água
Sato <i>et al.</i> (2024)	200	2,1	120		Água
Bispo <i>et al.</i> (2023)	180	-			-
Rensburg e Schabert (2018)	-	-	10	500 g/ 1,5 L	-
Hengameh. (2022)	240	-	30		-
Liu <i>et al.</i> (2024)	250		30		Acetona
Muller <i>et al.</i> (2021)	374	5	-		Água
Remón <i>et al.</i> (2021)	-	12	20		-
Zhang <i>et al.</i> (2021)	270	-	12,5	-	
Yang <i>et al.</i> (2021)	270	-	10	-	
Wądrzyk <i>et al.</i> (2024)	320	-	30	Água	

TABELA 27 – RESULTADO DA PESQUISA FEITA COM A METODOLOGIA PRISMA SOBRE HIDROTHERMOLIQUEFAÇÃO COM BORRA DE CAFÉ

Autor	Temperatura (°C)	Rendimento em bio-óleo (%)	Rendimento em biocarvão (%)	Rendimento em biogás (%)	HHV (MJ/ kg)	Polifenóis recuperados (mg GAE/g SCG)
Yang <i>et al.</i> (2016)	300	30	24	46	-	-
Yang <i>et al.</i> (2016)	275	38	23	39	-	-
Yang <i>et al.</i> (2016)	275	47,28	17,33	35,39	31	-
Conde e Mussato (2016)	120	-	-	-	-	32,92
Sato <i>et al.</i> (2024)	200	-	-	-	-	22
Bispo <i>et al.</i> (2023)	180					32,3% de hidrocarbonetos
Rensburg e Schabort (2018)	-	28,5	15,2	-	36.124	-
Hengameh.(2022)	240	27,5	-	-	-	-
Liu <i>et al.</i> (2024)	250	35,99	-	-	-	-
Muller <i>et al.</i> (2021)	374	19,1	-	-	38,5	-
Remón <i>et al.</i> (2021)	-	24,49	-	-	28,39	-
Zhang <i>et al.</i> (2021)	270	23,3	29,4	11,8	-	--
Yang <i>et al.</i> (2021)	270	27,8	32,1	11,6	-	-
Wądrzyk <i>et al.</i> (2024)	320	35	21	10	-	-

Fonte: A autora (2025)

A tabela a seguir apresenta os resultados da pesquisa realizada com a metodologia PRISMA sobre o PLE com a borra de café.

TABELA 28 - RESULTADOS DA PESQUISA REALIZADA COM A METODOLOGIA PRISMA SOBRE O PLE COM A BORRA DE CAFÉ

Autor	Solvente	Pressão (bar)	T (°C)	Rendimento (%)	TPC mg GAE/100 g óleo)	Cafeína (mg/ g de borra de café)	Diterpenos (mg/ 100 g de borra seca)
Kanaan <i>et al.</i> (2025)	Etanol	100	80	29,4	2962 ± 150	-	-
Kanaan <i>et al.</i> (2025)	Acetato de etila	100	80	29,6	2303 ± 147	-	-
Araújo <i>et al.</i> (2019)	Etanol	200	80	15,29	-	393,51	-

Shang <i>et al.</i> (2017)	75% de etanol	34,47	160	-	16,13	9,27	-
Santos (2024)	Propano	100	80	20,5	-	-	-
Toda <i>et al.</i> (2021)	Etanol	103,5	75	18,1	-	-	-
Toda <i>et al.</i> (2022)	Etanol absoluto	103,5	50	70,6	-	-	-
Araújo <i>et al.</i> (2024)	Propano	100	80	11,4	-	-	-
Sakdasri <i>et al.</i> (2021)	Água	4	120	13,71	-	-	-
Oliveira <i>et al.</i> (2018)	Etanol	103	50	-	5,16		
Williamson <i>et al.</i> (2022)	Éter de petróleo	8,27	140	13,73	-	-	
Mediani <i>et al.</i> (2021)	Água	20	180	—	—	94%	
Vu <i>et al.</i> (2021)	Etanol e água (70:30)	100		60	8,5	-	-
Silva <i>et al.</i> (2022)	CO2 e propano (50%)	100		40	10,83	-	-
Belandria <i>et al.</i> (2016)	Metanol	100		100	-	-	-

2 - (mg de cafeína/ g de óleo)

A tabela a seguir apresenta os resultados referentes aos artigos pesquisados e selecionados utilizando a metodologia PRISMA para as Biorrefinarias gerais.

TABELA 29 – RESULTADOS DA PESQUISA COM A METODOLOGIA PRISMA SOBRE BIORREFINARIAS GERAIS

Fonte	Matéria prima	Etapas do processo	Produtos
Filote <i>et al.</i> (2019)	Microalga	Extração de polifenol, extração de fucoidan, extração de alginato, lavagem, testes de adsorção e dessorção com chumbo II, recuperação do chumbo e pirólise	Extrato de polifenol, extrato de fucoidan, extrato de alginato, bio-óleo
Osman <i>et al.</i> (2019)	Microalga	Digestão anaeróbia e produção de biogás	Biogás
Kumar <i>et al.</i> (2020)	Agro-florestais	Coleta de biomassa, pré- tratamento, hidrólise enzimática, fermentação, extração de lignina, tratamento de efluentes	Lignina
Romero-García <i>et al.</i> (2014)	Podas de oliveira	Extração, separação e fermentação	Antioxidantes e etanol
Ghosh <i>et al.</i> (2015)	Bagaço de cana	Hidrólise, sacarificação enzimática e fermentação	Etanol e furfural
Nanda <i>et al.</i> (2015)	Lignocelulósica	Moagem, secagem, pré- tratamento, hidrólise enzimática, fermentação, destilação	Bioetanol e biogás
Maity (2015)	Açúcares e amido	Hidrólise e fermentação	Etanol
Maity (2015)	Óleo de sementes	Extração e transesterificação	Biodiesel e glicerol
Chandra <i>et al.</i> (2019)	Microalga	Fermentação, gaseificação, pirólise	Lipídeos, extração de corantes, biocombustível e proteína

Pinales-Márquez <i>et al.</i> (2021)	Xilo-oligossacarídeos	Explosão a vapor, fermentação, reação enzimática	Bioetanol e lignina
Hoang <i>et al.</i> (2021)	Lignocelulósica	Colheita e preparação, hidrólise ácida, fermentação, purificação e geração de energia	Energia, biocombustível
Yamakawa, Qin e Mussatto (2018)	Lignocelulósica	Cenário I: açúcares convertidos na produção de etanol e lignina convertida em energia; Cenário II: 25% dos açúcares foi usada na produção de ácido láctico, o restante em etanol e a lignina foi convertida em energia.	Etanol, energia e ácido láctico.
Long <i>et al.</i> (2016)	Alcachofra de jerusalém	Fermentação	Etanol, butanol, químicos de base
Bali Rødsrud, Lersch e Sjöde (2012)	Lignocelulósico	Pré-tratamento, hidrólise enzimática e fermentação	Etanol, outros produtos químicos, lignina,
Tedesco e Stokes (2017)	Alga marinha	Extração de ácido algínico, fucoídano, fucoxantina, laminarina, manitol e proteínas, digestão anaeróbia e geração de energia	Energia
Gonzalez-Garcia, Gullon e Moreira (2018)	Resíduos da agricultura	Hidrólise enzimática, centrifugação, filtração, liofilização	Celulose, hemicelulose, lignina
Carmona-Cabello <i>et al.</i> (2018)	Resíduos de restaurante	Esterificação e transesterificação	Gordura saturada, sólidos
Rosenberg <i>et al.</i> (2011)	Microalga	Extração e processamento do óleo	Biodiesel

Le <i>et al.</i> (2022)	Palha de arroz	Tratamento ácido, filtração, tratamento ácido, remoção de sílica, acidificação	Silica e lignina
Attard <i>et al.</i> (2018)	Biomassa celulósica	Coleta e preparação de biomassa, extração supercrítica, processamento adicional	Ceras e lipídeos
Zang, Shah e Wan (2020)	Capim	Reação ácida, lavagem com acetona/água, filtração, centrifugação	Lignina

Fonte: A autora (2025)

A tabela a seguir apresenta os resultados da pesquisa sobre biorrefinarias com foco no processamento da borra de café, utilizando a metodologia PRISMA.

TABELA 30 - RESULTADOS DA PESQUISA COM A METODOLOGIA PRISMA SOBRE BIORREFINARIAS COM BORRA DE CAFÉ

Fonte	Processo	Produtos
Mukherjee <i>et al.</i> (2022) ¹	Secagem, pirólise, ativação	Bio-óleo, carbono ativado
Mukherjee <i>et al.</i> (2022) ¹	Pirólise, combustão	Bio-óleo, oxigênio, carbono ativado
Mukherjee <i>et al.</i> (2022) ¹	Pirólise, ativação	Carbono ativado funcionalizado, oxigênio e bio-óleo
Banu <i>et al.</i> (2020) ²	Extração de óleo, transesterificação, secagem, digestão anaeróbia	Pellet (secagem do resíduo), biogás (digestão anaeróbia), biodiesel
Yeoh, Ng (2022) ³ cenário II	Hidrólise enzimática, transesterificação, reação ácida e reação aquosa	Biodiesel, ácido succínico, compostos aromáticos, ácido carboxílico e PHB
Battista <i>et al.</i> (2020) ⁴	Extração de óleo, hidrólise enzimática, separação liq-sólido, fermentação	Biogás, glicose, óleo
Taifouris, Corazza, Martín (2021)	Extração, nanofiltração, secagem	Extrato e pigmento natural
López-Linares <i>et al.</i> (2021)	Extração, tratamento ácido, hidrólise enzimática, separação do sólido	Butanol e compostos antioxidantes
Araujo <i>et al.</i> (2022) ⁷	PFE	Óleo, bioetanol, fenólicos
Sharma, Ray, Singhal (2021) ⁸	Secagem, extração (soxhlet ou supercrítica)	Óleo, biscoitos

Cho <i>et al.</i> (2022)	Extração de óleo, tratamento com sódio, hidrólise enzimática,	Cafestol, monossacarídeo, etanol, óleo
Pettinato <i>et al.</i> (2023)	Extração em altas pressões e temperaturas, pré-tratamento com solvente eutético e hidrólise ácida	Antioxidantes, lipídeos
Soares <i>et al.</i> (2014)	Processo de liquefação ácida usando solventes polihídricos na presença de ácido sulfúrico, em temperatura moderada	Poli-óleos líquidos
Hajjaji <i>et al.</i> (2020)	Extração com solvente, saponificação, pirólise	Sabão, biodiesel, bio-óleo e biocarvão
Coelho <i>et al.</i> (2020)	Extração supercrítica	Óleo
Karmee (2018)	Extração, transesterificação, pirólise, fermentação	Bioetanol, bio-óleo, biodiesel, biocarvão
Bartolucci <i>et al.</i> (2024)	Pirólise, extração de solvente em duas etapas	Bio-óleo, xantinas
Dias <i>et al.</i> (2021)	HTL, digestão anaeróbica	Bio-óleo, metano
Ray e Singhal (2023)	Moagem, extração supercrítica,	Hidrogel de Galactomanana
Cho <i>et al.</i> (2015)	Pirólise	Biocarvão e adsorvente
Massaya <i>et al.</i> (2021)	Extração com água subcrítica, carbonização hidrotérmica	Hidrocarvão, nutrientes
Kafková <i>et al.</i> (2023)	Extração de óleo, purificação do óleo, esterificação, transesterificação,	Biodiesel

Fonte: A autora (2025)

A tabela a seguir apresenta biorrefinarias de diferentes matérias-primas, porém, com resultados de análises econômicas. A revisão foi realizada utilizando a metodologia PRISMA.

TABELA 31 – RESULTADOS DA PESQUISA COM A METODOLOGIA PRISMA DE BIORREFINARIAS

Autor	Matéria-prima	Processo	Produtos	Informações econômicas
Maity (2015)	Óleo de sementes	Extração, hidrólise	Glicerol, ácidos graxos	O processamento em pequena escala reduz custos com transporte
Bhowmick , Sarmah, Sen (2018)	Material lignocelulósico e microalga	Digestão anaeróbia (metano), hidrólise + pirólise (etanol)	Metano Etanol	O uso de milho e trigo favorece a produção de metano
Ruiz et al (2020)	Biomassa lignocelulósica	Secagem, pré-tratamento com água, hidrólise enzimática	Açúcares C6, sólidos e energia	Fenóis, flavonoides e terpenos são lucrativos para a indústria farmacêutica

Nizami et al (2017)	Material plástico	Pirólise	Combustível líquido	Lucro possível com créditos de carbono
Marvin et al (2012)	Resíduo de agricultura		Etanol	Baixo custo de matéria-prima, quase 50% com custo de biorrefinaria
Chandra et al (2019)	Resíduo de bioalga	Digestão anaeróbia e fermentação	Bio- metano, bio- hidrogenio, bio-etanol	Definir o índice de complexidade de uma biorrefinaria é fundamental
Karmee (2018)	Borra de café	Extração e fermentação	Bio-etanol	O preço da matéria-prima tem alto impacto no custo
Kazi <i>et al.</i> (2011)	Frutose	Reação com butanol e água; destilação.	Biocombustível e HMF (hidróximetilfurfural)	Rendimento de 88.6 mega l/year
Moncada et al. (2015)	Ricino e microalga	Extração, cogeração	Metanol, hidrogênio, eletricidade	Quando se refere ao índice de massa em kg de produtos por kg de mamona, isso corresponde a 1,75.
Moncada, El-Halwagi (2013)	Bagaço de cana	Moagem, pré- tratamento, hidrólise, fermentação, separação	Etanol	
Banu et al (2021)	Borra de café	Pré-tratamento, digestão anaeróbia,	Bio-metano	305 mL CH ₄ /g VS
Pradhan et al (2024)	Borra de café	Pirólise	Bioenergia	O lucro anual é maior para a China de 16,2 a 21,7 milhões de dólares/ano com base no SCG 163 pirólise de biomassa na faixa de 300 a 600 °C

Matrapazi e Zabaniotou (2020)	Borra de café	Pirólise	óleo	Aos 520 °C, a porcentagem de óleo obtida é maior. 2566 t/yr
Tinoco-Caicedo et al (2021)	Borra de café	Secagem, separador flash, gaseificação, transesterificação e esterificação	Gás de síntese e biodiesel	O custo total de investimento para a usina de gás de síntese e biodiesel da SCG é estimado em US\$ 13,2 milhões.
Tinoco Caicedo et al (2023)	Borra de café	Reação adiabática, refeedor	Energia e aquecimento	Eficiência energética de 52%
Pozo et al (2021)	Casca de café	Pirólise	Bio-óleo, biocarvão adsorvente	O biocarvão produzido aos 400 °C tem área superficial maior.
Lee <i>et al.</i> (2021)	Borra de café	Pirólise	Biocarvão	Rendimento de energia do biocarvão de 41%
YANG et al (2021)	Borra de café	HTL, estereificação e transesterificação	Biodiesel	-
Silva <i>et al.</i> (2023)	Casca seca de café	Moagem, secagem	Briquete	15 t/h
Pozo <i>et al.</i> (2020)	Casca de café	Pirólise, extração dos componentes dos óleos	Antioxidante	242 toneladas de equivalentes de ácido gálico por ano

Fonte: A autora (2025)

TABELA 32 - RESULTADOS DA PESQUISA COM A METODOLOGIA PRISMA DE MACERAÇÃO

Autor	Solvente	Matéria-prima	Rendimento em óleo/extrato (%)	Fenólicos totais	Flavonoides	Capacidade antioxidante (DPPH)	Cafeína	Tocoferol
Le et al (2017)	-	Borra de café	10					

Varady et al. (2022)	Maceração no CO2	Café peruano - 100% arábica	19,9 ± 4,26 µg GAE/ mg	1,86 ± 0,31 µg QE/ mg	84,1 ± 18,9 µg TE/mg	9,45 ± 3,88 µg/ 1000 µg	
Balzano et al. (2020)	Solução etanólica n-hexano	Borra de café desidratada					1508 ± 14 mg/ Kg
Lourith et al. (2022)							
Kanlayavattanakul, Lourith e Chaikul (2021)			15				
Bijla et al. (2024)	Etanol		4,70 ± 0,06				
Fernandes, Delerue-Matos e Grosso (2025)							
Sheilatina et al. (2023)			10,30				
Myo (2022)	Polietilenoglicol		8,50 ± 0,14 mg GAE/ g	51,72 ± 1,94 mg QE/ g	5,63 ± 0,10 mg TEA/ g		

Tabela 33 - RESULTADOS DA PESQUISA COM A METODOLOGIA PRISMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA

Autor(es)	Tipo (Pellet ou Mistura)	HHV (MJ/kg)
Park et al. (2024)	Pellet	22,22 – 29,39
Woo, Kim e Kim (2021)	Mistura (borra de café e serragem de pinho) / Pellet (apenas borra de café)	24 (pellet de borra de café)
Limousy et al. (2013)	Pellet (pó de café)	19,55
Mayson e Williams (2021)	Pellet (borra de café)	21,23
Sidlo e Latosinska (2024)	Mistura (borra de café com chá, pinho e palha)	22,7 (75% borra de café e 25% pinho) / 22,6 (blend de borras torradas e não torradas)
Afolabi, Sohail e Cheng (2020)	Mistura (arábica e robusta)	39,74 – 44,68 (torra aos 220 °C por 3 e 5 horas)
Fermoso e Masek (2018)	Pellet (borra de café)	23,4