



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA A SECAGEM DE GRÃOS DE
CAFÉ: UMA REVISÃO**

JÉSSICA CRISTINA FIRMIANO SOARES BERNARDO DE ARAÚJO

Uberlândia - MG

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA A SECAGEM DE GRÃOS DE
CAFÉ: UMA REVISÃO**

JÉSSICA CRISTINA FIRMIANO SOARES BERNARDO DE ARAÚJO

Monografia de graduação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Amâncio Malagoni

Uberlândia – MG

2025

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DE MONOGRAFIA DA DISCIPLINA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE JÉSSICA CRISTINA FIRMIANO SOARES
BERNARDO DE ARAÚJO APRESENTADA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE
UBERLÂNDIA, EM 12/05/2025.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Ricardo Amâncio Malagoni
Orientador – FEQUI/UFU

Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte
PPGEQ/UFU

Dr. Heitor Otacílio Nogueira Altino
PPGEQ/UFU

AGRADECIMENTOS

A Deus, minha eterna gratidão pela oportunidade, força e sabedoria que me capacitaram a superar cada desafio. Mesmo diante dos maiores obstáculos, Ele foi meu porto seguro, fazendo-me confiar e persistir até a concretização deste sonho.

Aos meus pais, Cléber e Marivane, agradeço o carinho, dedicação incansável e pelos sacrifícios feitos para que eu alcançasse meus objetivos. Seus sábios conselhos e a confiança depositada em meu potencial foram os pilares que me sustentaram até aqui. Obrigada por acreditarem em mim, mesmo quando eu mesma hesitava.

Sou grata também ao meu esposo, Caíque Bernardo, e à minha amiga, Josiane Félix, que sempre acreditaram em mim e compartilharam meu sonho, vibrando a cada conquista e estando ao meu lado o tempo todo. Aos amigos que fiz durante a graduação, agradeço a cumplicidade, suporte e incentivo, que foram, sem dúvida, fundamentais ao longo de todo esse processo.

Agradeço aos docentes que participaram da minha formação, em especial ao meu orientador, Ricardo Amâncio Malagoni. Sua dedicação, paciência e exemplo foram fontes de inspiração e contribuíram significativamente para minha formação profissional e meu crescimento pessoal. Levarei sempre comigo os ensinamentos e valores que cada um de vocês compartilhou comigo.

"O café é um bálsamo para o coração e o espírito." — Giuseppe Verdi

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fases do grão de café	10
Figura 2 – Camadas do café: casca, polpa, mucilagem e grão.	11
Figura 3 – Produção nacional de café	14
Figura 4 – Certificado de pureza e qualidade ABIC.....	16
Figura 5 – Fluxograma do processo de produção de café	17
Figura 6 – Curva típica da taxa de secagem em função do teor de umidade	19
Figura 7 – Revolvimento manual periódico de café	22
Figura 8 – Imagem aérea do projeto Barcaça Seca Café.....	25
Figura 9 – Secador de café vertical modelo SMI	27
Figura 10 – Secador de grãos convencional de fluxo contínuo	27
Figura 11 – Secador rotativo horizontal	28
Figura 12 – Secador de leito fixo	29
Figura 13 – Comportamento fluidodinâmico do leito de jorro cônico	31
Figura 14 – Esquema do processo de microencapsulação por <i>spray drying</i>	32
Figura 15 – Foto ilustrativa de um liofilizador de escala industrial	31
Figura 16 – Esquema de secagem à vácuo	34
Figura 17 – Unidade experimental secador roto-aerado	36
Figura 18 – Máquina de secagem por micro-ondas	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise qualitativa dos principais terreiros de secagem	23
Tabela 2 – Comparativo entre métodos de secagem abordados.	38

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise comparativa entre métodos tradicionais, mecânicos e inovadores utilizados na secagem de grãos de café, considerando aspectos como eficiência operacional, impacto sensorial e viabilidade econômica. Os métodos tradicionais, como os terreiros (terra, concreto, tijolo, lama asfáltica e leito suspenso), são amplamente empregados por pequenos produtores devido ao baixo custo e simplicidade, embora dependam das condições climáticas e apresentem riscos de fermentações indesejadas. Os secadores mecânicos — verticais, horizontais e de leito fixo — oferecem maior controle do processo e independência do clima, mas requerem maior consumo energético e cuidados operacionais para evitar danos térmicos e secagem desigual. Entre as tecnologias inovadoras, destacam-se os secadores por micro-ondas, roto-aerado, a vácuo e de leito de jorro. A secagem por micro-ondas reduz significativamente o tempo de processo e preserva compostos aromáticos, exigindo controle rigoroso para evitar superaquecimento. O secador roto-aerado apresenta alta eficiência energética e preservação sensorial, reduzindo o tempo de secagem em até 88%. A secagem a vácuo minimiza a oxidação e conserva compostos voláteis, embora apresente custos operacionais elevados. Já o leito de jorro mostrou-se eficaz na secagem inicial de grãos com alta umidade, promovendo uniformidade e menor risco de canalização. Métodos como spray dryer, leito fluidizado e liofilização não são aplicáveis à secagem direta dos grãos, sendo empregados na secagem de extratos líquidos para café solúvel. A liofilização destaca-se pela preservação sensorial, enquanto o spray dryer é valorizado por sua eficiência em escala industrial. Conclui-se que a escolha do método de secagem deve considerar a escala produtiva, os recursos disponíveis e os padrões de qualidade sensorial. Métodos híbridos, como a pré-secagem em terreiro seguida de secagem controlada, revelam-se estratégias promissoras para otimização do processo. Para trabalhos futuros, recomenda-se aprofundar os estudos sobre os efeitos de cada técnica na composição química dos grãos e no perfil sensorial, bem como otimizar parâmetros como temperatura, umidade e tempo de secagem.

Palavras-chave: secagem de café; alternativas industriais; qualidade sensorial.

ABSTRACT

This study presents a comparative analysis of traditional, mechanical, and innovative methods used for coffee bean drying, considering operational efficiency, sensory impact, and economic feasibility. Traditional methods, such as drying patios (dirt, concrete, brick, asphalt sludge, and raised beds), are widely used by small producers due to their low cost and simplicity, although they depend on weather conditions and pose risks of undesirable fermentations. Mechanical dryers — including vertical, horizontal, and fixed-bed models — provide greater process control and independence from climate factors but require higher energy consumption and operational care to avoid thermal damage and uneven drying. Among innovative technologies, microwave, roto-aerated, vacuum, and spouted bed dryers stand out. Microwave drying significantly reduces processing time and preserves aromatic compounds but requires precise control to prevent overheating. The roto-aerated dryer offers high energy efficiency and sensory preservation, reducing drying time by up to 88%. Vacuum drying minimizes oxidation and conserves volatile compounds, though it involves high operational costs. The spouted bed is effective in the initial drying of high-moisture beans, ensuring uniformity and reducing channeling risk. Methods such as spray drying, fluidized bed drying, and freeze-drying are not suitable for direct bean drying but are used in processing coffee extracts for soluble coffee. Freeze-drying stands out for sensory preservation, while spray drying is known for industrial efficiency. It is concluded that the ideal drying method should balance production scale, available resources, and sensory quality standards. Hybrid approaches, such as sun pre-drying followed by controlled mechanical drying, prove to be promising strategies for optimizing the process. For future studies, it is recommended to investigate the effects of each technique on the chemical composition and sensory profile of the beans, and to optimize parameters such as temperature, humidity, and drying time.

Keywords: coffee drying; industrial alternatives; sensory quality.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1 Objetivo geral.....	12
1.2 Objetivos específicos.....	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1. Café: história e valor econômico	13
2.2. Produção e beneficiamento do café	16
2.3. O papel da secagem na produção de café	18
2.4. Secagem e análise de qualidade.....	20
2.5. Métodos tradicionais de secagem	21
2.5.1 Secagem em terreiros	21
2.5.2 Secagem com sistemas mecânicos	25
2.6. Métodos industriais alternativos de secagem de café	29
2.6.1 Secagem em leito fluidizado e leito de jorro	30
2.6.2 Secagem por <i>spray dryer</i>	32
2.6.3 Secagem por liofilização	33
2.6.4 Secagem à vácuo	34
2.6.5 Secador roto-aerado.....	35
2.6.6 Secador micro-ondas	36
3. COMPARATIVO ENTRE AS OPERAÇÕES DE SECAGENS ABORDADAS	38
4. CONCLUSÃO E SUGESTÕES	39
4.1. Conclusão	39
4.2. Sugestões para trabalhos futuros	39
REFERÊNCIAS	39

1. INTRODUÇÃO

A secagem do café é uma etapa essencial no processamento dos grãos, influenciando diretamente sua qualidade final. Esse processo consiste na remoção gradual da umidade presente nos frutos, reduzindo-a para um nível seguro de armazenamento e prevenindo fermentações indesejadas. O controle adequado da secagem impacta características sensoriais, como aroma, sabor e acidez, garantindo um produto de melhor qualidade (Rabello *et al.*, 2022).

A qualidade do café é resultado de uma série de fatores, desde o cultivo até o tratamento dos grãos. Entre esses fatores, a secagem desempenha um papel crucial, pois altera a composição química dos grãos, influenciando suas propriedades físico-químicas e sensoriais. Um processo inadequado pode resultar na formação de defeitos e perda de valor comercial (Cunha *et al.*, 2003). A Figura 1 contempla as fases do grão de café.

Figura 1 - Fases do grão de café.



DOMÍNIO PÚBLICO. Imagem ilustrativa de grãos de café. Disponível em: <https://i.pinimg.com/736x/72/73/bc/7273bcbd18e6aab64a9364b21aba25b3.jpg>. Acesso em: 2 abr. 2025.

O processo de secagem envolve a transferência simultânea de massa e energia entre o ar de secagem e o produto, com o objetivo de remover o excesso de água dos grãos por evaporação. Em geral, utiliza-se ar aquecido e convecção forçada com o intuito de preservar a qualidade dos grãos durante o armazenamento (Hall, 1980). É uma operação que envolve a remoção de água de um material, reduzindo sua massa (McCabe *et al.*, 1991).

Para assegurar um produto de qualidade, é essencial considerar características físicas e organolépticas específicas, as quais estão intrinsecamente ligadas ao êxito do método de

secagem utilizado. A secagem eficiente deve preservar a estrutura do grão, conservando componentes que atribuem sabor e aroma, mantendo o produto seguro para o consumo. Dessa forma, a secagem se torna uma das operações decisivas no cultivo de café natural (Borém *et al.*, 2018). A Figura 2 apresenta as camadas do fruto do café.

Figura 2 - Camadas do café: casca, polpa, mucilagem e grão.



DOMÍNIO PÚBLICO. Imagem ilustrativa da composição do fruto do café. Disponível em: <https://i.pinimg.com/564x/4b/62/56/4b62568fbd68bd7de749154c57afc141.jpg>. Acesso em: 2 abr. 2025.

A secagem inadequada pode resultar na formação de microrganismos e comprometimento da bebida, enquanto um controle eficiente do processo contribui para a preservação dos atributos positivos, como dulçor, corpo e uniformidade do sabor. O tempo e a temperatura aplicados durante a secagem influenciam diretamente na retenção dos compostos aromáticos (Silva *et al.*, 2019).

A escolha do método de secagem do café deve considerar custo-benefício, infraestrutura e impacto ambiental. Métodos com maior desenvolvimento tecnológico reduzem o tempo de secagem e melhoram a qualidade, enquanto técnicas tradicionais são acessíveis e simples. A pesquisa sobre esses métodos é essencial para a sustentabilidade e competitividade do setor cafeeiro (Pereira, 2021).

Diante dos desafios da secagem do café, como a dependência de condições climáticas e o acesso desigual a tecnologias, este trabalho revisa métodos tradicionais e industriais comparando eficiência energética, qualidade sensorial e viabilidade econômica para diferentes escalas. Inclui análise de estratégias híbridas visando equilibrar qualidade e custo. O trabalho destaca as vantagens e limitações de cada método em diferentes contextos produtivos, com o objetivo de fortalecer a cadeia cafeeira e promover a valorização do café brasileiro no mercado global.

1.1 Objetivo Geral

Investigar, por meio de uma análise comparativa, o impacto de diferentes métodos de secagem na qualidade do café, avaliando técnicas tradicionais e industriais, considerando a preservação das características sensoriais, composição físico-química, eficiência energética e viabilidade econômica, possibilitando uma escolha sustentável e de qualidade para diferentes escalas produtivas.

1.2 Objetivos Específicos

- Analisar os métodos tradicionais de secagem quanto à eficiência, uniformidade, suas limitações e impactos na qualidade físico-química e sensorial do café.
- Analisar secadores mecânicos em relação ao controle de temperatura e riscos de danos térmicos aos grãos.
- Explorar métodos industriais alternativos quanto à capacidade de preservar compostos voláteis, integridade dos grãos, tempo de processamento e custo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Café: história e valor econômico

A trajetória do café no Brasil foi fundamental para o desenvolvimento cultural e econômico do país. O clima favorável permitiu a expansão do cultivo para as diversas regiões do território nacional, ocasionando a formação de grandes zonas urbanas e o avanço de vários setores, como o ferroviário (Mapa, 2017; Vartan, 2023). De acordo com a International Coffee Organization (2024), o Brasil ocupa o primeiro lugar no ranking global de exportação de café e os produtos derivados desse grão são responsáveis pela geração de renda entre os mais variados setores da cadeia de produção e segmentos comerciais.

A chegada do café ao Brasil no século XVIII gerou grandes transformações na estrutura do país. A variedade de ecossistemas presentes no território brasileiro possibilitou a formação de uma gama de sabores e perfis de café, provenientes das diferentes formas de cultivo e climas regionais (Mapa, 2017). Inicialmente, o café era cultivado em grandes plantações a partir da mão de obra escrava. Com o passar dos anos, a produção passou a ser realizada por pequenos produtores e grandes produtores com sistemas mecanizados, se tornando a principal commodity agrícola brasileiro (Medeiros; Rodrigues, 2017).

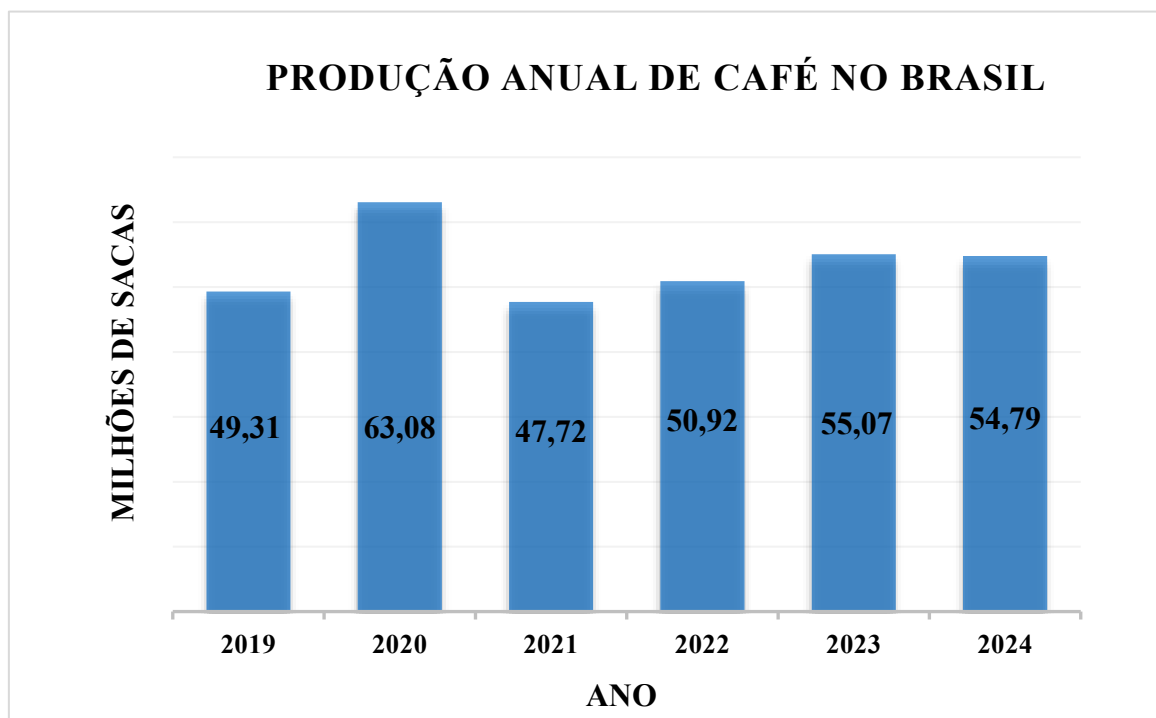
No cenário econômico vigente, o consumo crescente de café e derivados mostra a grande estima que o mercado internacional tem pelo produto, visto que ocupa a posição de segunda bebida mais consumida, abaixo apenas da água (Revista Cafeicultura, 2024). Contendo mais de 6000 espécies e 500 gêneros, o grão faz parte da família botânica *Rubiaceae*, onde duas principais espécies do gênero *Coffea* são comuns para o uso comercial no Brasil: *Coffea arabica*, conhecida como café Arábica, e *Coffea canephora*, popularmente denominada café Robusta (International Coffee Organization, 2024).

Segundo aponta Steven Topik (2019), o Brasil não apenas atendeu à demanda deste mercado, mas também alterou toda sua cadeia de produção, difundindo e popularizando o consumo da bebida em outros países e, por sua vez, tornando-se um dos principais fornecedores do grão a partir do século XIX. A colaboração entre o governo, a pesquisa e o setor privado gerou inovações e melhorias no setor, ampliando mercados, reduzindo os custos e aumentando a produtividade, o que foi fundamental para a valorização do produto nacional (Medeiros; Rodrigues, 2017).

A alta do preço do café no Brasil observada em 2024 é decorrente de fatores climáticos adversos, como seca, geadas e chuvas irregulares, que prejudicaram as últimas safras. Aspectos econômicos, como inflação, câmbio e aumento do consumo, também pressionaram os preços. A China, tradicional consumidora de chá, ampliou significativamente a demanda por café, com crescimento anual de 15%, impulsionado por novos hábitos e expansão de cafeterias. Como principal exportador, o Brasil priorizou as vendas ao mercado chinês, reduzindo a oferta interna. Além disso, a importação chinesa de grãos verdes intensificou a competição global, reforçando o protagonismo do país asiático na valorização do produto (Canal Rural, 2025).

A Figura 3 apresenta a quantidade de sacas de 60 kg produzida entre os anos de 2019 e 2024.

Figura 3 – Produção nacional de café.



Fonte: Adaptado de Conab (2024).

A criação da BSCA (Associação Brasileira de Cafés Especiais) ajudou a estabelecer novos padrões de qualidade para o café brasileiro, promovendo técnicas de controle eficientes. Enquanto os cafés especiais crescem 15% ao ano, os tradicionais aumentam apenas 2%, demonstrando a mudança nas preferências dos consumidores por cafés diferenciados. O Brasil tem alterado sua imagem no mercado global ao investir na capacitação de produtores e em melhorias na colheita e pós-colheita, agregando valor ao produto e garantindo práticas

sustentáveis. O objetivo é tornar o setor cafeeiro ecologicamente responsável, socialmente justo e economicamente viável (Pereira, 2017).

A valorização de cafés especiais, orgânicos e de alta qualidade são os principais fatores que tem alavancado o crescimento do setor cafeeiro. Aspectos como a origem do grão, os processos pós-colheita, a sustentabilidade e a certificação são cada vez mais apreciados, fortalecendo a competitividade entre os produtores. No Brasil, a ABIC (Associação Brasileira da Indústria de Café) é a responsável pela avaliação, qualificação e certificação do café. Já a BSCA qualifica os produtos seguindo rígidos padrões de avaliação. A indústria do café brasileira conta com cerca de 300 mil propriedades, empregando 8,4 milhões de empregos e movimentando um capital de R\$ 5 bilhões anuais (Cavalcanti, 2014).

Conforme Pereira (2017), os cafés especiais têm ganhado destaque, representando 16% das exportações brasileiras de café e alcançando preços entre 30% e 40% superiores aos cafés convencionais. O autor enfatiza que investimentos em estudos sobre a qualidade do café e nas tecnologias para aplicá-los de forma prática é essencial para aumentar a competitividade do Brasil no mercado internacional. Com melhorias constantes na qualidade do café e a adoção de práticas inovadoras, o Brasil poderá consolidar-se como líder mundial na produção de cafés de alto padrão, beneficiando produtores e consumidores que buscam por esses produtos.

A Certificação de Pureza e Qualidade da ABIC é a principal certificação da indústria cafeeira brasileira. Ela atesta a excelência dos produtos por meio de análises sensoriais, físico-químicas e laboratoriais. Essas garantem a pureza, a ausência de adulterantes e a conformidade com critérios técnicos como aroma, sabor, umidade dos grãos e uniformidade de torra. A certificação classifica os cafés em cinco categorias:

- **Tradicional:** perfil clássico e equilibrado;
- **Extraforte:** torra mais intensa e sabor marcante;
- **Superior:** maior complexidade sensorial;
- **Gourmet:** cafés de excelência, com aroma, corpo e sabor refinados;
- **Especial:** práticas sustentáveis em toda a cadeia produtiva, incluindo aspectos ambientais, sociais e econômicos.

Além de orientar o consumidor, a certificação oferece um diferencial competitivo. Ela promove qualidade, rastreabilidade e responsabilidade socioambiental do cultivo à xícara (Abic, 2024), como ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Certificado de pureza e qualidade ABIC.



Fonte: Abic (2024).

2.2. Produção e beneficiamento do café

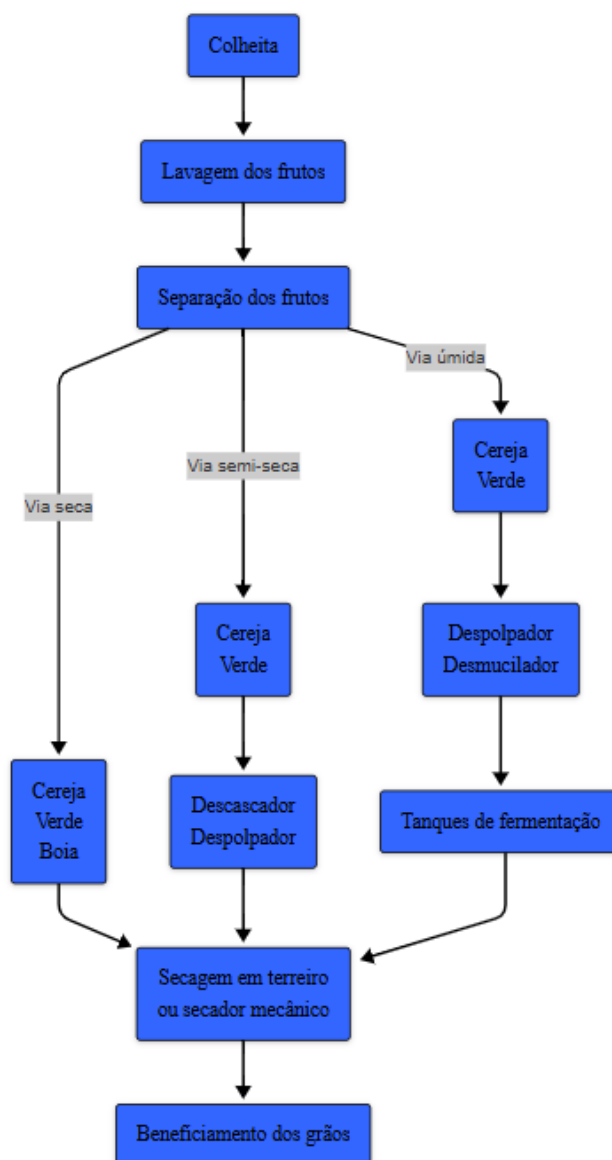
Entre o plantio até estar apto ao consumo, o café é submetido a várias etapas. Inicialmente, as sementes são selecionadas e o solo é preparado. Em geral, as mudas são cultivadas em viveiros antes de serem transferidas para o campo. Nessa fase, fatores como clima, tipo de solo e altitude influenciam diretamente o desenvolvimento (Pimenta, 2003). O cultivo do café requer cuidados contínuos, como adubação, irrigação e controle de pragas, sendo regiões montanhosas o ambiente de clima ideal para o crescimento dos grãos (Nuitin, 2007). Nessas áreas, as mudanças de temperatura desaceleram a maturação dos grãos, favorecendo o acúmulo gradual de açúcares e compostos aromáticos. A maior exposição solar potencializa a síntese de fenóis, enquanto o resfriamento noturno mantém a acidez, criando cafés com complexidade aromática e acidez marcante (Intercoffee, 2024).

A colheita do café pode ser realizada manualmente ou por meio de máquinas, comumente uma vez por ano, dependendo da região de cultivo. Os frutos colhidos possuem entre 30% e 65% de umidade em base úmida (bu), de acordo com seu estado de maturação, o que os tornam passíveis de rápida degradação. O indicado é que o café seja desidratado até alcançar a umidade aproximada de 10% a 12% (bu) antes do armazenamento (Borém *et al.*, 2008). Do café processado por via seca se obtém o chamado café natural, enquanto do processamento por via úmida é obtido outros três tipos de cafés: os descascados, os

desmucilados e os despulpados, onde nesses casos parte da estrutura dos frutos é extraída (Casé, 2022).

Durante o processamento por via úmida os frutos são lavados e a polpa é removida, permitindo que os grãos fermentem antes de serem secos, tendendo a produzir cafés com nuances sofisticadas, devido as características adquiridas pela fermentação (Evangelista *et al.*, 2014). Já no processamento por via seca, os frutos são secos ao sol sem remover a polpa, resultando em grãos de sabor mais adocicado e frutado (Ribeiro *et al.*, 2011). O processo semiseco consiste em retirar parte da polpa antes da secagem, combinando características dos processos úmido e seco (Vaz, 2021). As principais etapas do processo produtivo do café são esquematizadas conforme a Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma do processo de produção de café.



Fonte: Adaptado de Bressani (2017).

Do ponto de vista ecológico, o processamento a seco do café é mais sustentável em relação ao processamento úmido em razão dos baixos consumo de energia e redução na geração de resíduos. Entretanto, o processamento de café a seco é historicamente relacionado a bebidas de qualidade inferior. Apesar disso, ao processar e secar corretamente é possível obter uma bebida com alto padrão, encorpada e menos ácida se comparado ao café processado por via úmida (Borém *et al.*, 2018). Dentre todas as fases da produção, a secagem possui grande relevância, afetando diretamente a qualidade, a durabilidade e, consequentemente, o valor comercial do café.

Após a secagem, é feita a eliminação de impurezas, a separação dos grãos com base em sua densidade e a classificação, de forma a proporcionar lotes homogêneos. É feito também a remoção da mucilagem residual em cafés naturais que foram despulpados (Borém; Andrade, 2019). As fases seguintes consistem na torra e moagem dos grãos verdes, preparando-os para o consumo. Essas etapas são fundamentais, pois afetam consideravelmente a qualidade do café, provocando alterações microbianas e metabólicas que influenciam suas características finais (Bruyn *et al.*, 2017).

2.3. O papel da secagem na produção de café

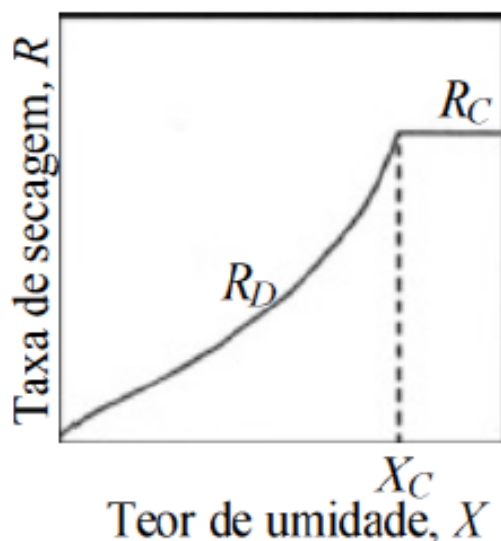
Uma vez realizada a colheita, o café passa por diversas etapas como o processamento, a secagem, o armazenamento, beneficiamento e transporte. De todas elas, a secagem é a que se destaca de forma mais significativa em relação ao consumo de energia e à preservação da qualidade. A secagem proporciona maior vida útil, facilita o transporte, o armazenamento e a comercialização. Sua eficácia está relacionada aos valores de temperatura e umidade do sistema (Ferreira; Montanucci, 2020). No entanto, fatores como a variação climática, as tecnologias disponíveis e as práticas agrícolas adotadas são desafios presentes na etapa de secagem e podem afetar diretamente a eficiência e a uniformidade desse processo (Borém *et al.*, 2018).

A etapa de secagem é constituída por duas fases. Na primeira fase, a taxa é mantida constante, uma vez que a água contida na superfície do grão é removida por evaporação e a umidade presente no interior dos grãos migra para a superfície com uma velocidade maior ou igual à velocidade de evaporação (Marques, 2006). Enquanto isso, na segunda fase observa-se uma redução progressiva da taxa de secagem, pois a velocidade da migração da água do interior do grão para a superfície ocorre a uma velocidade inferior à evaporação da umidade. Este fator

é responsável por aumentar significativamente o risco de danos térmicos durante o processo (Silva, 2000).

A Figura 6 apresenta uma curva típica da taxa de secagem em função do teor de umidade, sendo R_c o período de taxa constante; R_d o período de taxa decrescente e X_c o teor de umidade crítico (Guimarães, 2010).

Figura 6 – Curva típica da taxa de secagem em função do teor de umidade.



Fonte: Guimarães (2010).

Ao longo do período de secagem com taxa constante, a superfície do material permanece saturada, pois a umidade migra internamente em velocidade suficiente para repor a água evaporada, predominando a transferência de massa do vapor, a condução de calor no sólido e a troca térmica na fase gasosa. Nos balanços de massa e energia, considera-se apenas a convecção de calor entre a superfície e o ar de secagem, além da transferência de massa para o ar. O ar sofre um processo de umidificação adiabática, enquanto a temperatura do sólido se mantém constante, igual à temperatura de bulbo úmido do ar, desde que a troca de calor por radiação não tenha contribuição significativa (Geankoplis, 1993; Guimarães, 2010).

O período de taxa decrescente na secagem é caracterizado por duas fases distintas. A primeira, relativamente curta, ocorre enquanto a superfície do produto ainda apresenta pontos úmidos, resultando em uma redução gradual na taxa de secagem. Já a segunda fase, mais prolongada, inicia-se quando a superfície está totalmente seca, sendo a remoção da umidade dominada pela difusão interna até a superfície, seguida pela transferência de massa para o meio externo. Durante essa etapa, a temperatura do produto se eleva progressivamente, aproximando-

se da temperatura do ar de secagem, o que impacta diretamente a eficiência do processo. Adicionalmente, a resistência interna à migração da umidade aumenta, tornando a secagem progressivamente mais lenta. A compreensão dessas fases é fundamental para o controle adequado do processo e para assegurar a qualidade do produto (Geankoplis, 1993; Guimarães, 2010).

No decorrer do processo de secagem, é preciso adotar medidas que evitem a degradação dos componentes responsáveis por atribuir sabor e aroma ao produto, a fim de garantir a manutenção de sua qualidade sensorial (Bustos-Vanegas *et al.*, 2022). Considera-se como uma secagem eficiente o procedimento que além de diminuir o teor de água do material também conserva suas propriedades físicas, melhorando o processo de conservação e agregando valor ao produto (Oliveira *et al.*, 2021). No Brasil, a secagem do café é predominantemente feita em terreiros ou utilizando secadores mecânicos e até por uma combinação de ambos, buscando atingir maior eficiência e otimizar o processo para obter um produto de qualidade superior.

2.4. Secagem e análise da qualidade

Ao se avaliar a qualidade do café, fator de maior relevância durante a sua comercialização, várias características físicas e sensoriais devem ser consideradas. Dentre elas, destaca-se o índice de acidez, que pode apresentar variações de acordo com as condições de cultivo, o nível de maturação durante a colheita, os métodos de beneficiamento e secagem, entre outros. O pH e a acidez são responsáveis por conferir equilíbrio aos sabores da bebida. Embora não haja valores de referência definidos na legislação vigente para a acidez total titulável, níveis mais elevados de acidez estão associados a processos de fermentação e/ou degradação. O pH ideal ocorre na faixa de 4,95 a 5,20, e alterações nesse valor podem indicar fermentações indesejadas (Oliveira *et al.*, 2021).

Para se obter um produto de qualidade superior é preciso preservar durante o processamento do grão componentes como lipídeos, açúcares, compostos nitrogenados, ácidos orgânicos que, em conjunto, determinam o aroma único e outros atributos tão apreciados no café. O grau de acidez, quando equilibrado, contribui para notas sensoriais variadas, como florais e cítricas, mas o excesso gera um sabor amargo ou azedo. A oxidação desses compostos durante etapas inadequadas de secagem ou armazenamento pode acentuar defeitos (Andrade *et al.*, 2024; Oliveira *et al.*, 2021).

Moreira (2015) ressalta que a degradação da parede celular dos grãos durante a secagem pode comprometer a retenção de compostos essenciais, prejudicando a complexidade aromática da bebida. Para minimizar essas perdas, é fundamental adotar secagem gradual e controlada, garantindo que os atributos sensoriais sejam preservados até o consumo final. Além da análise físico-química, a avaliação da qualidade envolve a percepção sensorial, sendo a prova de xícara um método essencial para identificar defeitos provenientes do processamento inadequado. Cafés com acidez equilibrada, corpo aveludado e aroma intenso são valorizados no mercado.

Borém *et al.* (2017) demonstraram uma correlação inversa entre a condutividade elétrica, a lixiviação de potássio e os teores de ácidos graxos livres com a qualidade do café, parâmetros diretamente ligados a integridade celular dos grãos. Com a exposição à altas temperaturas os grãos são danificados e esses índices aumentam. O estudo mostrou também temperaturas de secagem entre 35°C e 40°C mantiveram as propriedades sensoriais mais elevadas, em comparação a cafés secos a 45°C que sofreram uma degradação expressiva, não podendo ser considerados cafés especiais.

Manter um controle preciso da temperatura e da umidade durante a secagem do café é fundamental para garantir a integridade e a qualidade do produto. O emprego de técnicas avançadas possibilita a obtenção de um café com maior estabilidade físico-química, melhor preservação dos compostos voláteis e sabor aprimorado. Investir em métodos de secagem sustentáveis não só eleva a qualidade sensorial do café, mas também torna o processo mais econômico e eficiente (Guimarães, 2010). O monitoramento rigoroso da atividade de água evita a degradação do produto, reduzindo o risco de contaminação microbiológica e prolongando sua vida útil (Andrade *et al.*, 2024).

2.5. Métodos tradicionais de secagem

2.5.1 Secagem em terreiros

A secagem em terreiros, ou pátios, é o método mais simples e comum praticado no Brasil. A técnica consiste em espalhar o café em uma superfície plana, expondo-o à luz solar e à circulação natural do vento. A movimentação periódica dos grãos, manual, mecânica ou por tração animal, é essencial para garantir uma secagem uniforme. Existem diversos materiais utilizados na construção de terreiros, como chão batido, concreto, tijolo, lama asfáltica e leito suspenso. A simplicidade e o baixo custo energético tornam esse método o mais adotado,

especialmente por pequenos produtores (Ferreira, 2022). Visualiza-se na Figura 7 a secagem de café em terreiro.

Figura 7 - Revolvimento manual periódico de café.



Fonte: Revista Expresso (2021).

Para a secagem do café, é essencial a utilização de terreiros localizados em áreas planas, bem drenadas, ventiladas e com boa exposição solar. Os terreiros de alvenaria, por exemplo, são mais duráveis e facilitam a higienização, contribuindo para um melhor manejo do café. De igual modo, para garantir uma secagem uniforme e de qualidade, é fundamental trabalhar com lotes homogêneos, levando em conta o estágio de maturação, teor de umidade e época da colheita. No entanto, muitas vezes, a secagem nesses terreiros não é suficiente, sendo necessária uma complementação em secadores mecânicos para que o café atinja o nível ideal de umidade para armazenamento e comercialização (Araújo, 2021).

Santos *et al.* (2018) investigaram a interferência do tipo de terreiro de secagem na qualidade sensorial do café e os efeitos das formas de preparo na composição química dos grãos. Os autores compararam os custos de construção de terreiros de lama de cimento, lama asfáltica, concreto, terra e leito suspenso, todos com 50m², e analisaram os processos de secagem de diferentes tipos de café. O terreiro de terra apresentou baixos custos, mas foi inviável devido a riscos sanitários. O terreiro de lama de cimento, com menor condutividade elétrica, associada a maior qualidade da bebida, demonstrou ser o mais adequado economicamente e preservou melhor as propriedades sensoriais do café.

A Tabela 1 mostra um comparativo das principais características dos tipos de pátios mais usados para a secagem.

Tabela 1 – Análise qualitativa dos principais tipos de terreiro de secagem.

Tipo de Terreiro	Vantagens	Desvantagens	Referências
Chão Batido	<ul style="list-style-type: none"> - Baixo custo de construção; - Construção simples. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bebida de qualidade inferior; - Alto risco de contaminações; - Secagem irregular e lenta. 	Santos <i>et al.</i> (2018); Ferreira (2022).
Concreto	<ul style="list-style-type: none"> - Boa secagem de grandes volumes; - Fácil limpeza e manejo; - Baixo custo de construção e manutenção. 	<ul style="list-style-type: none"> - Secagem menos uniforme; - Maior risco de superaquecimento. 	Borém <i>et al.</i> (2008); Araújo (2021).
Tijolo	<ul style="list-style-type: none"> - Menor risco de contaminação; - Maior durabilidade que o concreto; - Boa capacidade de secagem. 	<ul style="list-style-type: none"> - Exige mão de obra qualificada para a construção; - Alto custo de implementação. 	Reinato <i>et al.</i> (2012); Pimenta (2003).
Lama Asfáltica	<ul style="list-style-type: none"> - Fácil limpeza e manutenção; - Boa capacidade de secagem. 	<ul style="list-style-type: none"> - Custo de construção elevado; - Aquecimento excessivo; - Risco de contaminação. 	Rehagro (2023); A Lavoura (2016).
Leito Suspenso	<ul style="list-style-type: none"> - Secagem uniforme e controlada; - Menor risco de contaminação e fermentação; - Melhor aeração dos grãos; - Bebida de melhor qualidade. 	<ul style="list-style-type: none"> - Secagem lenta; - Seca em menores volumes; - Maior custo de construção e manutenção. 	Borém <i>et al.</i> (2018); Silva <i>et al.</i> (1995).

Fonte: Elaboração própria.

Embora requeira muitos trabalhadores e condições climáticas adequadas, a secagem em terreiros, sejam eles convencionais ou suspensos com estufa, ainda é predominante (Pimenta, 2003). Contudo, à medida em que se aumenta a produção, torna-se mais comum a adoção da secagem mecânica, permitindo a colheita precoce e reduzindo as perdas quantitativamente e qualitativamente. Apesar disso, é comum combinar a secagem em terreiros com a secagem mecânica, como forma de otimização e prevenção de perdas (Silva *et al.*, 1984).

O café natural seco em terreiros tem a qualidade comprometida em comparação ao café descascado, principalmente em terreiros não pavimentados. Suas sementes são danificadas

liberando eletrólitos na solução, ocasionando alta condutividade elétrica e lixiviação de potássio. Isso ocorre porque a casca e a mucilagem são substratos favoráveis ao desenvolvimento de microrganismos e sua remoção pode evitar fermentações indesejadas, além de facilitar a migração da umidade para a superfície, reduzindo o tempo de secagem. Por outro lado, a secagem excessiva provoca maior quebra dos grãos (Reinato *et al.*, 2012).

A cafeicultura enfrenta desafios relacionados aos custos operacionais e à qualidade do produto, fatores que afetam diretamente seu valor de mercado. Para se manterem competitivos, muitos produtores têm investido em automação, buscando reduzir despesas e garantir um café de padrão superior. Paralelamente, a exposição prolongada ao sol durante a secagem pode prejudicar a saúde dos trabalhadores, aumentando a incidência de doenças como o câncer de pele. Nesse contexto, a incorporação de novas tecnologias no cultivo e no processamento do café torna-se uma estratégia fundamental para aprimorar a produção e minimizar impactos negativos (Cezar-Vaz *et al.*, 2015).

Conforme relatado através da reportagem feita pelo G1 Sul de Minas (2018), alunos de uma instituição em Santa Rita do Sapucaí desenvolveram robôs para otimizar o plantio e a secagem do café em terreiros. Um dos protótipos, chamado *RoboCoffee*, é feito de MDF e controlado remotamente. É usado para revolver os grãos evitando esmagamento devido sua leveza, o que contribui para a preservação da qualidade do café. Essas inovações visam tornar o processo mais eficiente, diminuindo a necessidade de mão de obra e aprimorando o manejo pós-colheita.

A revista A Lavoura (2016) divulgou um projeto desenvolvido pela Embrapa Rondônia chamado Barcaça Seca Café, uma estrutura móvel destinada a cobrir terreiros de cimento durante a secagem dos grãos. O sistema consiste em uma armação metálica revestida com telhas de plástico transparente ou lona plástica, permitindo o aproveitamento da luz solar como fonte de calor. Essa inovação torna o processo mais eficiente, reduzindo a necessidade de mão de obra e contribuindo para a melhoria da qualidade do café. Assim, surge como uma alternativa sustentável aos secadores mecânicos.

Enquanto os secadores mecânicos operam a temperaturas muito acima da faixa ideal e geralmente estão distantes das propriedades rurais, a Barcaça Seca Café possibilita uma secagem mais eficiente e natural. Além disso, o custo por saca torna-se mais acessível, reduzindo os gastos da produção ao longo do tempo e tornando a tecnologia uma opção viável para cafeicultores de diferentes portes. Outro benefício significativo é a economia em relação

aos terreiros suspensos, já que a Barcaça Seca Café apresenta um custo cerca de 30% menor (A Lavoura, 2016).

Quando comparada às coberturas plásticas convencionais, que podem elevar a temperatura interna para aproximadamente 50°C e causar desconforto térmico aos trabalhadores, a estrutura móvel se destaca por permitir melhor ventilação e facilitar a movimentação dos grãos durante a secagem. Seu design é capaz de permitir uma melhor ventilação e facilita a movimentação dos grãos ao longo do processo de secagem, trazendo eficiência ao processo e conforto aos produtores (A Lavoura, 2016). A Figura 8 mostra o projeto implantado.

Figura 8 - Imagem aérea do projeto Barcaça Seca Café.



ROCHA, Rafael. Imagem aérea da tecnologia para secagem de café com qualidade. *A Lavoura*, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <https://alavoura.com.br/biblioteca/a-lavoura-716/estrutura-movel-oferece-vantagens-na-hora-de-secar-o-cafe/>. Acesso em: 28 mar. 2025.

2.5.2 Secagem com sistemas mecânicos

A escolha do método de secagem adequado pode se tornar complexo. Além da viabilidade econômica, fatores como condições climáticas, volume a ser processado, mão de obra disponível e espaço de armazenamento precisam ser avaliados durante a seleção do processo de secagem. Nesse contexto, a implantação de sistemas mecanizados passa a ser uma solução em potencial para a otimização do processo, permitindo maior uniformidade,

demandando pouca mão de obra, além da redução do tempo de secagem e de ser menos influenciados pelas variações climáticas, que é uma característica da secagem em terreiros (Vianna, 2017).

Usualmente se inicia com a pré-secagem em terreiros seguida de uma secagem complementar em secadores mecânicos. Em alguns modelos é possível fazer a secagem completa, não exigindo a pré-secagem em terreiros, o que amplia o leque de opções aos produtores. O mercado disponibiliza diversos secadores, cada um adaptado às necessidades da cafeicultura. Os modelos mais comuns são os verticais, os horizontais e os de leito fixo, permitindo flexibilidade e eficiência no processo de secagem do café (Rehagro, 2023).

A popularidade dos secadores verticais, também denominados secadores de fluxo cruzado, se deve à sua estrutura descomplicada, que facilita tanto a operação quanto a manutenção. O princípio de funcionamento desses equipamentos envolve a passagem de ar aquecido através da massa de café, enquanto os grãos descem por gravidade dentro de colunas verticais. Essa configuração, embora demonstre eficiência no processamento de grandes quantidades de café, impõe uma restrição operacional, limitando o uso a um único lote de grãos por vez. Essa característica pode impactar a flexibilidade do processo em situações que exigem o processamento de diferentes lotes simultaneamente (Brasileiro Filho, 2019).

A utilização de secadores verticais é comum como um complemento à secagem realizada em secadores horizontais. A secagem desigual dos grãos pode resultar em variações na qualidade do produto e o alto consumo de energia associado a esses equipamentos pode impactar os custos operacionais. O risco de superaquecimento pode comprometer a qualidade dos grãos e até mesmo gerar riscos de incêndio. Diante desse cenário, a implementação de sistemas de controle automatizados e o uso de sensores de temperatura e umidade podem auxiliar na mitigação desses problemas (Borém *et al.*, 2008).

A Figura 9 mostra o Secador de Múltipla Intermitência, um tipo de secador vertical de fluxo cruzado, projetado para a secagem final de café natural ou descascado, utilizando a gravidade para movimentar os grãos. Sua característica distintiva são as câmaras de secagem e repouso, que equalizam a umidade dos grãos, resultando em um processo mais uniforme. A temperatura e a vazão do ar são ajustadas para aquecer suavemente o café, prevenindo danos e minimizando a dispersão de umidade, características essenciais para produtos sensíveis. Este sistema, uma alternativa industrial aos secadores rotativos, está disponível em capacidades de 50 mil a 110 mil litros e já opera em diversas unidades em São Paulo e Minas Gerais, conforme informações do fabricante (Coolseeds Secadores, 2024).

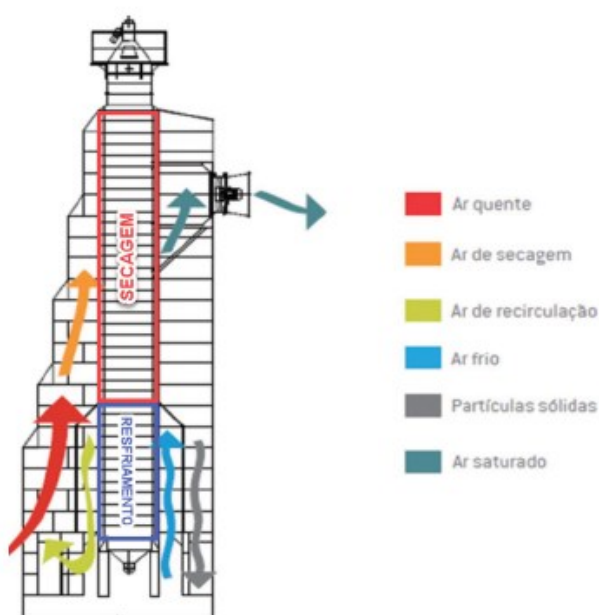
Figura 9 - Secador de café vertical modelo SMI.



Fonte: Coolseeds Secadores (2024).

Já a Figura 10 apresenta o esquema do secador vertical de fluxo contínuo.

Figura 10 – Secador de grãos convencional de fluxo contínuo.



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

Também muito requisitados, os secadores horizontais são de fácil manuseio e possuem secagem uniforme por possuir revolvimento constante, podendo atuar como pré-secador: operando com ar em temperatura ambiente por cerca de 2 horas, logo após com ar em temperatura de 30°C pelo tempo necessário no qual atinja a umidade ideal e possa ser

transferido para o secador vertical, de forma contínua ou como complementação à secagem feita no terreiro, operando com temperaturas de até 45°C (Borém *et al.*, 2008).

Os secadores rotativos horizontais são compostos por um cilindro que pode estar na posição horizontal ou levemente inclinado com um cilindro gira continuamente em torno de seu próprio promovendo a circulação do ar de maneira radial. Esse movimento constante favorece uma secagem homogênea, além de tornar mais ágeis as etapas de carregamento e descarregamento do produto, reduzindo o tempo total do processo. No entanto, seu uso implica em um alto custo de implementação e manutenção, alto consumo de energia e em uma maior probabilidade de desgaste mecânico dos grãos durante a secagem (Silva *et al.*, 1995). Na Figura 11 é apresentado um modelo comum de secador horizontal de duas câmaras.

Figura 11 - Secador rotativo horizontal.

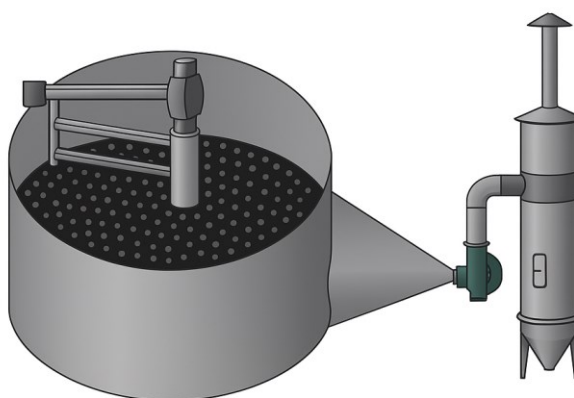


PALINI & ALVES Secadores. *Secador Rotativo horizontal de duas Câmaras*. Disponível em: <https://www.palinialves.com.br/produto.php?produto=260&pa-sr>. Acesso em: 28 mar. 2025.

Os secadores de leito fixo ou cama fixa, operam com a injeção de ar por um ventilador, enquanto os grãos permanecem estáticos e o ar aquecido é forçado a percorrer os espaços vazios entre elas, secando o material úmido próximo à entrada de ar mais rapidamente que o material próximo à saída de ar. Esses secadores apresentam baixo custo de operação, porém podem causar uma distribuição irregular da umidade na camada de grãos. Recomenda-se utilizar temperatura de 50°C e limitar a espessura a 50 cm (Berbert, 1991), sendo necessários revolvimentos em intervalos frequentes de forma que garanta a uniformidade da secagem (Campos *et al.*, 1999).

A secagem em cama fixa exige um controle preciso e moderado da temperatura do ar para evitar o ressecamento excessivo das camadas inferiores. A espessura da camada de grãos influencia diretamente tanto a temperatura quanto a vazão de ar, sendo necessário reduzir a temperatura e aumentar a vazão à medida que a camada se torna mais espessa. É essencial o ajuste da vazão de ar conforme a capacidade do ventilador e da perda de carga, a fim de otimizar a remoção da umidade de maneira eficaz (Casé, 2022). Pela Figura 12 é possível observar um secador de leito fixo.

Figura 12 - Secador de leito fixo.



Fonte: Adaptado de Polydryer (2014).

2.6 Métodos industriais alternativos de secagem de café

Com o aumento da demanda por novos produtos derivados do café e a crescente exigência dos consumidores por qualidade, têm sido desenvolvidos métodos inovadores que visam aprimorar a excelência do produto e, ao mesmo tempo, reduzir os custos de produção por meio de tecnologias sustentáveis. Um exemplo de produto que atende às exigências do consumidor moderno é o café solúvel, apreciado por sua praticidade e rápido preparo. Diferentemente da secagem de grãos, o café solúvel é produzido a partir da extração de sólidos solúveis com água, utilizando grãos previamente torrados e moídos. O extrato obtido é então concentrado e submetido a processos de secagem específicos, como a atomização e a liofilização (Esteves, 2006).

Esses dois métodos não são aplicados diretamente aos grãos de café, mas sim ao extrato concentrado. A atomização utiliza ar quente para evaporar rapidamente a água, formando partículas finas e homogêneas. Já a liofilização consiste no congelamento do extrato seguido da sublimação da água sob vácuo. Segundo Esteves (2006), ambos os métodos são eficazes na

produção de café solúvel, e Silva e Pasquim (2018) destacam que, embora os dois contribuam para a preservação dos compostos aromáticos, a liofilização se mostra mais eficiente nesse aspecto.

Nessa seção, serão abordados de forma sucinta diversos métodos avançados de secagem que são empregados na produção de café, porém não são tão comuns ou consolidados nesse mercado incluindo a secagem por fluidização e jorro, que promove uma remoção eficiente da umidade; a secagem por *spray dryer*, particularmente indicada para a produção de café instantâneo; e a liofilização, que preserva o aroma e o sabor do café por meio da sublimação da umidade em temperaturas extremamente baixas. Além disso, serão discutidas outras técnicas industriais promissoras, como a secagem a vácuo, secador roto-aerado e por micro-ondas, que podem ser aplicadas para a secagem de café de forma a otimizar a preservação das características sensoriais e reduzir o tempo de secagem. Cada um desses métodos será analisado em termos de suas vantagens, desafios e efeitos na qualidade final do café.

2.6.1 Secagem em leito fluidizado e leito de jorro

A secagem em leito fluidizado é um processo altamente eficiente, no qual partículas sólidas são mantidas em suspensão e movimentadas por um fluxo de ar ou gás aquecido. Essa intensa agitação promove ampla interação entre as superfícies das partículas, resultando em elevadas taxas de transferência de calor e massa. Como consequência, o tempo de secagem é significativamente reduzido em comparação com métodos tradicionais. A eficiência do processo está diretamente relacionada a variáveis como a umidade inicial do material, a temperatura do ar e a vazão do fluido, o que permite um controle preciso das condições operacionais (Geankoplis, 1993; Mujumdar, 2015).

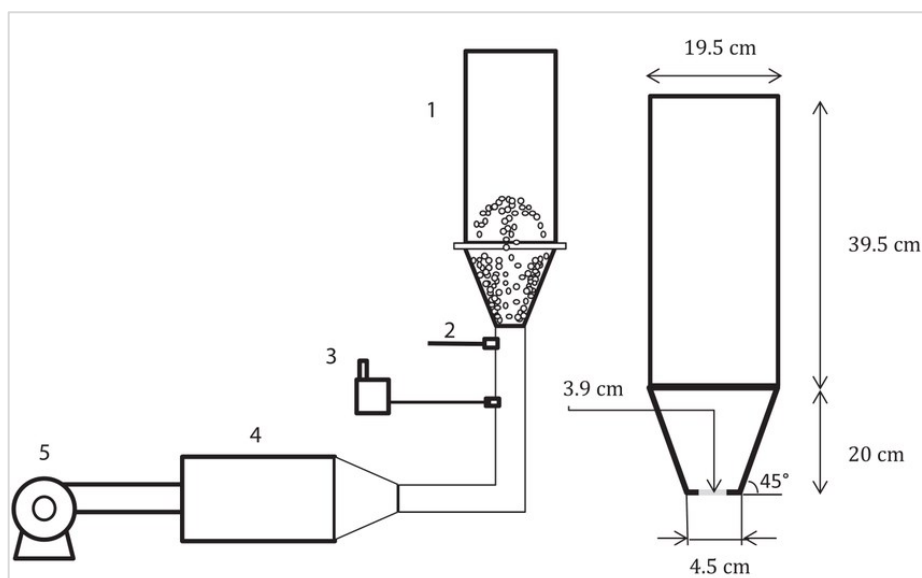
Entre as principais vantagens do leito fluidizado destacam-se a elevada taxa de remoção de umidade, a homogeneidade do produto e a facilidade de operação e manutenção. Contudo, essa tecnologia também apresenta algumas limitações, como alto consumo de energia, queda de pressão significativa, arraste de partículas finas e dificuldades na ampliação de escala devido a mudanças no comportamento do fluido em sistemas maiores. Ainda assim, quando integrado a fontes de energia renovável, como a biomassa oriunda de resíduos agrícolas, o leito fluidizado se mostra uma solução sustentável frente a métodos que utilizam combustíveis fósseis (Mujumdar, 2015).

Como alternativa ao leito fluidizado convencional, destaca-se o leito de jorro, que se caracteriza por uma região central de alta turbulência, circundada por um anel de partículas mais densas. Essa configuração permite melhor manejo de materiais com ampla distribuição granulométrica, como os resíduos agroindustriais, reduzindo problemas de segregação e aumentando a eficiência da secagem. Estudos indicam que a velocidade mínima de jorro não sofre grandes variações com a fração mássica do material, embora a queda de pressão possa variar com a altura do leito estático (Almeida, 2016; Macedo *et al.*, 2017).

Apesar de sua ampla aplicação em diversos produtos, o leito fluidizado não é o mais adequado para a fase inicial da secagem do café. Nesse caso, o leito de jorro se mostra mais eficaz para grãos recém-colhidos, com altos teores de umidade, entre 50% e 60%, pois seu fluxo de ar concentrado permite tratar eficientemente grãos mais úmidos e densos, evitando canalização e promovendo secagem uniforme. Já o leito fluidizado demonstra melhor desempenho em etapas posteriores, como a torrefação, quando os grãos já se encontram parcialmente secos, entre 10% e 12% de umidade, proporcionando aquecimento homogêneo e controle preciso do processo (Almeida, 2016; Macedo *et al.*, 2017; Mujumdar, 2015). A Figura 13 ilustra o esquema experimental de leito de jorro, onde:

- (1) leito de jorro cônico;
- (2) termopar;
- (3) transdutor de pressão;
- (4) sistema de aquecimento de ar com controlador de temperatura do tipo PID;
- (5) soprador.

Figura 13 – Comportamento fluidodinâmico do leito de jorro cônico.



Fonte: Lira *et al.* (2015).

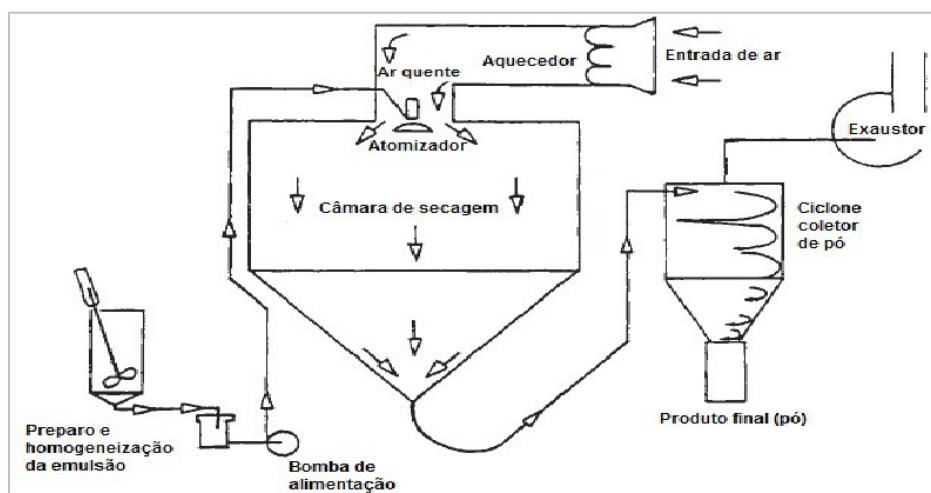
2.6.2 Secagem por spray dryer

O processo de secagem por atomização, ou *spray dryer*, é amplamente utilizado na produção de café solúvel. Nele, o extrato de café é pulverizado em uma câmara com ar quente, formando gotículas finas que evaporam rapidamente. Isso proporciona uma secagem eficiente, com tempo de residência entre 3 e 30 segundos. A técnica é ideal para substâncias sensíveis ao calor, como compostos aromáticos. No entanto, pode causar perda de sabor e aroma, afetando a qualidade sensorial do produto (Esteves, 2006; Guimarães, 2010).

O *spray dryer* é um equipamento versátil, utilizado tanto em escala laboratorial quanto em processos industriais de grande porte. Sua principal vantagem é o tempo extremamente curto de permanência do produto na câmara de secagem, o que reduz os danos térmicos. Entretanto, uma limitação importante é a dificuldade de realizar modificações estruturais no equipamento após sua instalação, o que restringe ajustes e ampliações de capacidade. A eficiência da secagem depende não apenas do tempo e da temperatura, mas também da composição do líquido alimentado, especialmente seu teor de sólidos e viscosidade (Geankoplis, 1993; Esteves, 2006).

O sistema de secagem por atomização é composto por um aquecedor de ar, uma câmara de secagem e um mecanismo de recuperação dos sólidos secos, geralmente ciclones. Embora não seja aplicável diretamente à secagem dos grãos de café, é fundamental para a obtenção de um pó fino e uniforme, característico do café instantâneo. O desempenho do processo também está atrelado ao projeto do equipamento, como o tipo de bico spray, a velocidade do ar e do líquido, e a temperatura aplicada. Esses fatores devem ser cuidadosamente controlados para garantir a qualidade final do produto e a preservação de suas propriedades sensoriais (Guimarães, 2010). A Figura 14 esquematiza esse processo.

Figura 14 - Esquema do processo de microencapsulação por *spray drying*.



Fonte: Carmo *et al.* (2015).

2.6.3 Secagem por liofilização

A secagem por liofilização é feita através da remoção da umidade dos grãos congelados, levando a uma versão desidratada e estável do produto. O congelamento rápido dos grãos preserva a estrutura celular do café. Os grãos após congelados são transferidos para uma câmara de vácuo, que devido à baixa pressão usada faz com que o gelo seja sublimado. Por meio dessa técnica é possível preservar o aroma, sabor e nutrientes naturais do café, sendo um método superior de secagem. Forma um produto leve, poroso e bem solúvel, adequado para uso no café instantâneo. Porém é um processo complexo e mais caro (Barroso, 2020).

Esse método de secagem submete os alimentos a temperaturas extremamente baixas, transformando a água em cristais e sublimando-a sem o uso de calor direto. É um método especialmente vantajoso para alimentos sensíveis, preservando sua qualidade e compostos voláteis. Durante o processo, os alimentos são colocados em uma câmara sob vácuo, onde a temperatura pode atingir até -60°C , facilitando a sublimação. Após um período de 6 a 12 horas, o produto atinge cerca de 1% de umidade. No entanto, é um processo caro, devido aos altos custos operacionais e de energia envolvidos (Guimarães, 2010).

Os principais pontos positivos da liofilização é sua capacidade de produzir café solúvel de boa qualidade e por proporcionar maior durabilidade ao produto. Por essa razão, em determinados mercados, o café solúvel obtido por liofilização é mais valorizado, especialmente quando a preservação das características sensoriais e a ampliação da vida útil do produto são prioridades (Esteves, 2006). A Figura 15 apresenta um modelo industrial de liofilizador.

Figura 15 - Foto ilustrativa de um liofilizador de escala industrial.



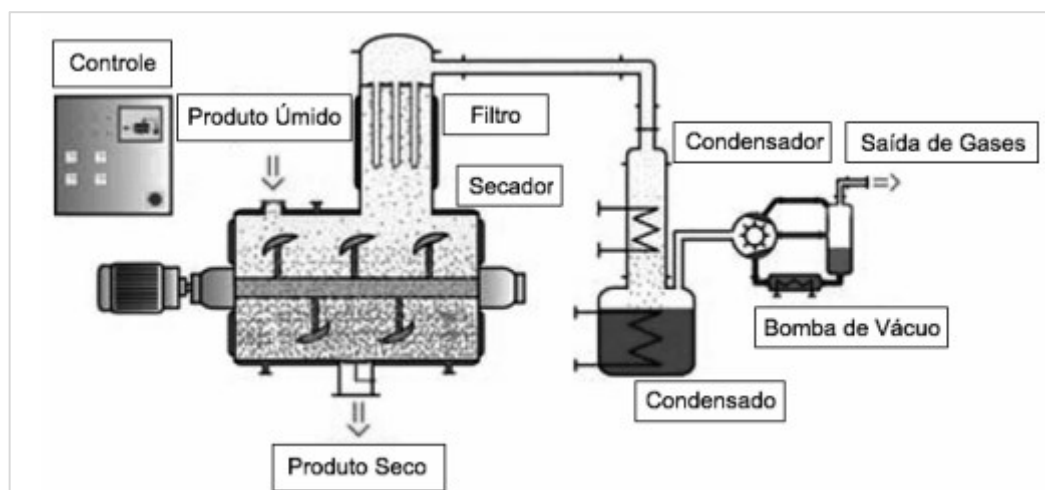
Fonte: TECNOLOGIA DE LIOFILIZAÇÃO, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/349465703_OPERACOES_UNITARIAS_EMPREGADAS_NOS_PROCESSOS_DE_PURIFICACAO_DE_L-ASPARAGINASE_UM_ANTI-LEUCEMICO/figures?lo=1. Acesso em: 2 abr. 2025.

2.6.4 Secagem a vácuo

O uso do vácuo para a operação de secagem é substituto ao ar aquecido, podendo diminuir o tempo de exposição e as altas temperaturas, evitando alterações que danifiquem a estrutura celular do grão e reduzindo custos energéticos. Essa prática viabiliza a evaporação da água em baixas temperaturas com maior taxa de secagem em menor tempo. Consiste em secar o material úmido sob pressão abaixo da atmosférica, evitando oxidação (Arévalo-Pinedo; Murr, 2005).

A secagem de café a vácuo, ou congelamento a vácuo, combina resfriamento e sublimação para remover a água do extrato de café sob pressão reduzida. O processo inicia-se com a redução da pressão na câmara até atingir a saturação correspondente à temperatura do produto, promovendo a evaporação da água livre. Em seguida, ocorrem a nucleação do gelo, a cristalização isotérmica e, por fim, a sublimação. Essa técnica é frequentemente associada à liofilização, pois gera uma estrutura porosa que facilita a secagem subsequente, contribuindo para a preservação de sabor, aroma e qualidade do café (Silva; Schmidt, 2019). O sistema de secagem à vácuo é exemplificado pela Figura 16.

Figura 16 - Esquema de secagem à vácuo.



Fonte: Ferreira *et al.*, (2022).

Dentre as dificuldades provenientes dessa forma de secagem de café se destacam o alto custo de implantação, necessidade de mão de obra qualificada e demanda por manutenção frequente. Sua principal limitação do método é a elevada perda de massa, variando entre 26% e 43%. A espessura da camada e a taxa de queda de pressão influenciam diretamente o tempo de secagem, tornando a otimização do processo essencial. Ainda assim, o congelamento a vácuo se destaca como uma alternativa eficiente para a produção de café solúvel por liofilização, pois

reduz o tempo de secagem e melhora a porosidade do produto, favorecendo sua concentração (Silva; Schmidt, 2019).

2.6.5 Secador roto-aerado

O secador roto-aerado combina elementos dos secadores rotativos tradicionais com um sistema de fluidização interna. Em vez de suspensores para movimentar os grãos, o equipamento utiliza mini tubos que canalizam o ar diretamente para as partículas, aprimorando a troca térmica e reduzindo o tempo de secagem. Esse método não apenas aumenta a eficiência do processo, mas também minimiza danos mecânicos e possibilita um controle mais preciso das variáveis operacionais, garantindo uma desidratação uniforme (Andrade, 2023).

No processamento de cafés especiais, sua aplicação oferece vantagens significativas. A redução rápida e homogênea da umidade preserva atributos essenciais, como acidez, aroma e concentração de açúcares. Estudos indicam que esse equipamento pode diminuir o tempo de secagem em até 88% em comparação a métodos convencionais, como terreiro e secadores mecânicos. Além disso, a regulação da temperatura e da velocidade do ar contribui para evitar superaquecimento e perda de qualidade (Silva *et al.*, 2016; Andrade, 2023).

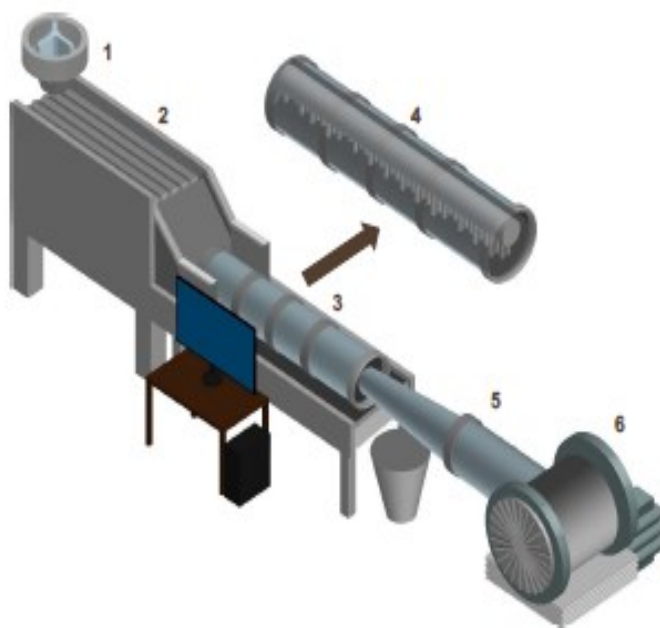
A pesquisa de Andrade (2023) confirmou a eficiência do secador roto-aerado na secagem de café despulpado, evidenciando não apenas a significativa redução do tempo de secagem, mas também um aumento de até 120 vezes na taxa de remoção de umidade. A modelagem matemática aplicada ao estudo validou o desempenho do equipamento, com diferenças médias de apenas 2,39% para umidade e 0,89% para temperatura entre os valores simulados e experimentais, reforçando a precisão do controle operacional.

Outro aspecto relevante identificado foi a preservação da qualidade físico-química dos grãos. O secador manteve parâmetros essenciais, como acidez, açúcares e ácidos orgânicos, dentro dos padrões desejáveis, garantindo a integridade sensorial do café. A análise de desejabilidade, ao integrar variáveis de desempenho e qualidade, apontou um equilíbrio entre eficiência energética e manutenção das características sensoriais. Dessa forma, essa tecnologia se destaca como uma alternativa promissora para a secagem de cafés especiais (Andrade, 2023). A Figura 17 detalha a unidade experimental utilizada por Andrade (2023) durante sua pesquisa, onde:

- (1) Recipiente de armazenamento do material;
- (2) Esteira de transporte;

- (3) Secador roto-aerado;
- (4) Visão interna (minitubos);
- (5) Sistema de aquecimento elétrico;
- (6) Soprador.

Figura 17 - Unidade experimental secador roto-aerado.



Fonte: Andrade (2023).

2.6.6 Secador por micro-ondas

O método de secagem de café por micro-ondas tem sido estudado como uma alternativa eficiente para reduzir o tempo de secagem e preservar a qualidade dos grãos. Esse processo utiliza radiação eletromagnética para aquecer a água dentro dos grãos, promovendo a evaporação da umidade de forma rápida e homogênea (Kumar; Karim, 2017). Ao contrário dos métodos tradicionais, que dependem da transferência de calor por convecção, os micro-ondas permitem um aquecimento volumétrico, garantindo maior uniformidade na secagem (Rabello *et al.*, 2022).

A principal vantagem da secagem por micro-ondas é a redução do tempo de processamento, o que ajuda a evitar a fermentação indesejada e a preservar a qualidade do café. Além disso, essa técnica contribui para a retenção de compostos aromáticos, uma vez que a menor exposição ao calor minimiza a degradação térmica dos grãos. Outro aspecto positivo é o aumento da porcentagem de lipídios, consequência da redução da massa total, sendo que os óleos do café auxiliam na retenção de substâncias aromáticas, aprimorando a qualidade do

produto. Assim, essa tecnologia se apresenta como uma alternativa eficaz à secagem prolongada ao sol (Rabello *et al.*, 2022).

Sobre os aspectos desfavoráveis se pode destacar a necessidade de controle preciso da temperatura para evitar o superaquecimento dos grãos, o que pode resultar em alterações indesejadas no sabor e o alto custo dos equipamentos de micro-ondas tornando sua adoção mais complexa para pequenos produtores. A viabilidade econômica da secagem por micro-ondas ainda depende de estudos adicionais para otimizar os parâmetros do processo e garantir sua aplicação em larga escala (Cunha; Canto; Marsaioli, 2003). O estudo conduzido por Rabello *et al.*, (2022) destacou o potencial da secagem por micro-ondas como alternativa viável para a cafeicultura. A tecnologia mostrou-se eficiente, rápida e capaz de manter a qualidade do produto.

É possível visualizar pela Figura 18 um exemplar de máquina de secagem por micro-ondas industrial.

Figura 18 - Máquina de secagem por microondas.



Fonte: **Loyal Industrial**. *Máquina de secagem por micro-ondas*. Disponível em: <https://loyal-machine.com/pt/microwave-drying-machine/>. Acesso em: 2 abr. 2025.

3. COMPARATIVO ENTRE AS OPERAÇÕES DE SECAGENS ABORDADAS

A escolha do método de secagem de grãos de café deve equilibrar aspectos como eficiência energética, custo, escala produtiva e impacto na qualidade sensorial. Enquanto técnicas tradicionais, como a secagem em terreiros e o uso de secadores mecânicos, permanecem amplamente adotadas, métodos mais recentes, como micro-ondas e roto-aerado, destacam-se pela maior rapidez e preservação de compostos voláteis. A Tabela 2 apresenta um resumo comparativo das principais características desses métodos, não incluindo técnicas como liofilização, spray dryer e fluidização, que são voltadas à secagem de extratos para a produção de café solúvel. O gasto energético foi convertido para a mesma unidade para facilitar a comparação.

Tabela 2 – Comparativo entre os métodos de secagem de grãos de café.

Método	Gasto energético (kWh/kg)	Vantagens	Desvantagens	Referências
Terreiros	-	- Baixo custo; - Simplicidade.	- Dependência climática; - Secagem irregular.	Afonso Júnior (2001); Donzeles (2002).
Secador Vertical	0,30 – 0,70	- Eficiente para grandes volumes.	- Secagem desigual; - Alto consumo de energia.	Embrapa (2012); Costa (2006).
Cama Fixa	0,20 – 0,50	- Baixo custo operacional.	- Umidade irregular; - Necessidade de revolvimento.	Afonso Júnior (2001); Embrapa (2012).
Secador Horizontal	0,40 – 0,80	- Secagem uniforme; - Revolvimento constante.	- Custo elevado; - Desgaste mecânico.	Afonso Júnior (2001); Embrapa (2012).
Micro-ondas	0,153	- Tempo ultrarrápido; - Preserva aromas.	- Risco de superaquecimento; - Equipamento caro.	Rabello et al. (2022); Cunha et al. (2003).
Roto-aerado	0,50 – 1,00	- Secagem homogênea; - Preserva qualidade sensorial.	- Requer mão de obra qualificada.	Andrade (2023); Santinato (2008); Pereira et al. (2019).
Vácuo	0,25 – 0,60	- Evita oxidação; - Preserva compostos voláteis.	- Perda de massa (26-43%); - Custo operacional elevado.	Borsoi et al. (2012); Corrêa et al. (2006).

Fonte: Elaboração própria.

Os métodos tradicionais, como terreiros e secadores mecânicos, são economicamente viáveis para pequenos e médios produtores, sendo amplamente utilizados no Brasil e em outros países produtores de café. A secagem em terreiros destaca-se pela extrema eficiência energética, pois não requer combustíveis ou eletricidade, além de ser uma opção sustentável e de baixo custo. No entanto, sua eficácia depende das condições climáticas e demanda maior tempo e mão de obra, além de resultar em secagens frequentemente irregulares.

Por sua vez, a secagem mecânica, utilizando equipamentos como secadores verticais, horizontais ou de cama fixa, oferece maior previsibilidade e independência das condições climáticas. Esses métodos possibilitam o processamento de grandes volumes, mas, em contrapartida, apresentam desafios relacionados ao elevado consumo de energia, à necessidade de revolvimento e ao risco de secagem desigual, especialmente em modelos verticais.

Entre as técnicas inovadoras, a secagem por micro-ondas destaca-se pelo tempo ultrarrápido e pela capacidade de preservar compostos voláteis essenciais para a qualidade sensorial do café. Apesar desses benefícios, o risco de superaquecimento e o alto custo dos equipamentos limitam sua aplicação, especialmente para pequenos produtores. De forma semelhante, o secador roto-aerado combina secagem rotativa e fluidização, proporcionando homogeneidade e reduzindo o tempo de processamento em até 88% em comparação aos métodos tradicionais, mantendo a qualidade sensorial. No entanto, o investimento elevado e a necessidade de mão de obra qualificada restringem sua adoção a produtores de médio e grande porte.

A secagem a vácuo também oferece vantagens importantes, como a redução da oxidação e a preservação dos compostos voláteis, que contribuem para a qualidade final do produto. Por outro lado, seu custo operacional elevado e a significativa perda de massa dificultam o uso em larga escala, limitando sua aplicação principalmente a cafés especiais. Embora essas técnicas apresentem potencial promissor, muitas ainda permanecem em estágio experimental ou de escala laboratorial, necessitando de estudos adicionais para viabilizar sua adaptação e aplicação exclusiva à secagem de grãos de café em contextos produtivos diversos.

Embora não incluídas na tabela por não serem aplicáveis à secagem direta dos grãos, técnicas como liofilização, spray dryer e secagem por leito fluidizado são fundamentais para a produção de café solúvel. A liofilização, em especial, destaca-se pela capacidade de preservar aroma, sabor e nutrientes, mas seu alto custo limita sua aplicação a nichos de mercado mais sofisticados. O spray dryer, por outro lado, é eficiente para produções em larga escala, embora com maiores perdas sensoriais, enquanto a fluidização apresenta elevada velocidade de

secagem, mas com significativo consumo energético e potenciais perdas por arraste de partículas.

No contexto atual, a integração de métodos tradicionais e modernos surge como uma estratégia promissora. Combinações híbridas, como a pré-secagem em terreiro seguida de secagem mecânica controlada a temperaturas moderadas (35–40°C), mostram-se eficazes na redução do tempo total de processamento e na minimização de danos térmicos, contribuindo para a preservação de compostos desejáveis, como açúcares e ácidos orgânicos. Estudos como o de Andrade (2023) demonstram que a associação entre a secagem inicial em terreiro suspenso e o secador roto-aerado potencializa a uniformidade da umidade e reduz perdas por fermentação.

Entretanto, desafios persistem, como a necessidade de maior acessibilidade a tecnologias avançadas, especialmente para pequenos produtores, bem como a padronização de parâmetros operacionais, que ainda dificultam a comparação direta entre estudos. Além disso, mais pesquisas são necessárias para avaliar a estabilidade dos compostos voláteis ao longo do armazenamento após a secagem, especialmente considerando as condições reais enfrentadas na cadeia produtiva.

Assim, a análise comparativa dos métodos de secagem evidencia que a escolha da técnica ideal depende de múltiplos fatores, incluindo orçamento, escala produtiva e padrão de qualidade exigido pelo mercado. Métodos tradicionais continuam sendo fundamentais para a sustentabilidade e viabilidade econômica de milhares de produtores, enquanto as inovações tecnológicas, apesar das barreiras, apontam caminhos promissores para o futuro da pós-colheita do café. É importante destacar que algumas dessas tecnologias mais recentes ainda necessitam de estudos específicos para adaptação e validação na secagem exclusiva de grãos de café, sendo potencialmente aplicáveis, mas ainda restritas a contextos experimentais ou industriais altamente especializados.

4. CONCLUSÃO E SUGESTÕES

4.1 – Conclusão

A secagem é uma etapa crítica na produção de café, com impacto direto na qualidade físico-química e sensorial do produto. Este estudo evidenciou que métodos tradicionais, como a secagem em terreiros, são economicamente viáveis e amplamente utilizados, especialmente por pequenos produtores, mas enfrentam limitações como dependência climática e irregularidade na desidratação. Em contrapartida, técnicas industriais, como secadores mecânicos oferecem maior controle operacional e eficiência, embora demandem alto custo energético e investimento inicial.

Tecnologias inovadoras, como secagem por micro-ondas, roto-aerado e vácuo, destacam-se pela rapidez e preservação de compostos voláteis, mas ainda enfrentam barreiras de custo e complexidade operacional. A integração de métodos híbridos, como pré-secagem em terreiros seguida de secagem mecânica controlada, surge como estratégia promissora para equilibrar eficiência, qualidade e sustentabilidade.

A análise comparativa reforça que a escolha do método ideal depende de fatores como escala produtiva, recursos financeiros e padrões de qualidade exigidos pelo mercado. Enquanto métodos tradicionais mantêm relevância para pequenos produtores, as tecnologias avançadas representam um caminho para a valorização de cafés especiais e a competitividade global do setor.

4.2 – Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, recomenda-se uma investigação mais detalhada sobre os impactos de cada técnica na composição química dos grãos e em seu perfil sensorial. Estudos empíricos que explorem ajustes nos parâmetros de temperatura, umidade e tempo de secagem de método podem contribuir para a melhoria da qualidade final do café, permitindo a otimização dos processos de secagem.

REFERÊNCIAS

ABIC. **Certificações de Qualidade.** ABIC, [s.d.]. Disponível em: <<https://www.abic.com.br/certificacoes/qualidade/>>. Acesso em: 12 mar. 2025.

AFONSO JÚNIOR, E. R. **Qualidade do café.** Lavras: UFLA, 2001.

ALMEIDA, P. S. **Estudo da fluidodinâmica e da secagem de resíduos do processamento do cacau em leite fluidizado.** 2016. Disponível em: <<https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/7992/2/EstudoFluidodinamicaSecagem.pdf>>. Acesso em: 03 mai. 2025.

ANDRADE, Paulo de; DUARTE, Claudio; BARROZO, Marcos. Improving the quality of Arabica coffee (*Coffea arabica* L.) through innovative optimization of roto-aerated drying. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, 2024. DOI: 10.1016/j.ifset.2024.103770.

ANDRADE, Paulo Sérgio de. **Estudo da secagem de café arábica (*Coffea arabica* L.) despulpado em secador roto-aerado.** 2023. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/37341>>. Acesso em: 06 mar. 2025.

ARAÚJO, Yuri Novais. **Proposta de automação de secagem de café em terreiros.** 2021. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2021.

ARÉVALO-PINEDO, A.; MURR, F. E. X. Influência da pressão, temperatura e pré-tratamentos na secagem a vácuo de cenoura e abóbora. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 25, n. 4, p. 636-643, 2005.

BARROSO, Livia Alves. **Otimização dos parâmetros de extração a frio (Cold brew) de café arábica da região de Minas Gerais para produção de cafés solúveis liofilizados.** 2020. 94 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2020.

BERBERT, P. A. **Secagem de café (*Coffea arabica* L.), em camada fixa, com inversão de sentido de fluxo de ar.** 1991. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1991. Disponível em: <<http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/202>>. Acesso em: 15 mar. 2025.

BORÉM, Flávio Meira (Ed.). **Pós-colheita do café.** Lavras: UFLA, 2008. 631 p.

BORÉM, F. M. et al. Quality of natural coffee dried under different temperatures and drying rates. **Coffee Science**, Lavras, v. 13, n. 2, p. 159-167, 2018. Disponível em: <<https://coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/1410>>. Acesso em: 4 fev. 2024.

BORÉM, F. M.; CORADI, P. C.; SAATH, R.; OLIVEIRA, J. Quality of natural and washed coffee after drying on ground and with high temperature. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, p. 1609-1615, 2008.

BORÉM, Flávio; ANDRADE, Ednilton. Processing and drying of coffee. In: HUI, C. L.; BORÉM, F. M. (Ed.). **Drying and Roasting of Cocoa and Coffee**. Boca Raton: CRC Press, 2019. cap. 6, p. 103-120. DOI: 10.1201/9781315113104-6.

BORSÓI, A.; LIMA, P. P.; RESENDE, O.; CORRÊA, P. C. Secagem a vácuo de grãos de café: avaliação da qualidade. **Engenharia na Agricultura**, v. 20, n. 2, p. 116-123, 2012.

BRASILEIRO FILHO, Francisco De Assis et al. **Secador contínuo tipo esteira e de fluxos**. 2019.

BRESSANI, A. P. P. **Avaliação química e sensorial de café Catuaí amarelo fermentado pelo processamento por via seca com inoculação de leveduras**. 2017. 101 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

BRUYN, F. et al. Exploring the impacts of postharvest processing on the microbiota and metabolite profiles during green coffee bean production. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 83, n. 1, p. e02398-16, jan. 2017. DOI: 10.1128/AEM.02398-16.

BUSTOS-VANEGAS, Jaime Daniel et al. Numerical approach for prediction of airflow behavior in coffee bean monolayers during drying process. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 42, n. 2, p. e20210205, 2022. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/eagri/a/SKy3xqptdmxhWFVLZbX68Rt/?lang=en>>. Acesso em: 8 jan. 2025.

CAMPOS, R. C. et al. Secagem intermitente de café em secador de camada fixa. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. 24, n. 1, p. 12-18, 1999.

CANAL RURAL. **Clima, aumento do consumo e a China devem manter preço do café no Brasil em alta, diz ABIC**. Canal Rural, [s.d.]. Disponível em: <<https://www.canalrural.com.br/agricultura/clima-aumento-do-consumo-e-a-china-devem-manter-preco-do-cafe-no-brasil-em-alta-diz-abic/>>. Acesso em: 12 mai. 2025.

CARMO, Eloá L. do; FERNANDES, Regiane V. B.; BORGES, Soraia V. Microencapsulação por spray drying, novos biopolímeros e aplicações na tecnologia de alimentos. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, [S. l.], v. 1, n. 2, p. 30-44, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.18540/jcecv11iss2pp30-44>>. Acesso em: 02 abr. 2025.

CASÉ, Isadora Nunes. **Processos alternativos de secagem do café arábica**. 2022. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

CAVALCANTI, Marly. Coffee clusters in Brazil. **International Journal of Research in Business and Technology**, v. 4, n. 3, p. 1-12, 2014. DOI: 10.17722/IJRBT.V4I3.257.

CEZAR-VAZ, Marta Regina. Câncer de pele em trabalhadores rurais: conhecimento e intervenção de enfermagem. **Revista da Escola de Enfermagem da USP**, São Paulo, v. 49, n. 4, p. 564-571, 2015. DOI: 10.1590/S0080-623420150000400005.

CONAB. **Boletim da Safra de Café**. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2024. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe/boletim-da-safra-de-cafe>>. Acesso em: 17 ago. 2024.

COOLSEEDS Secadores. **Secador de café vertical**. Disponível em: <<https://secadorescoolseed.com.br/produtos/secador-de-cafe-estatico/secador-de-cafe-vertical/>> . Acesso em: 28 mar. 2025.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; BAPTESTINI, F. M.; AFONSO JÚNIOR, E. R. **Secagem de alimentos e grãos**. Viçosa: UFV, 2006.

COSTA, E. B. **Secagem de Grãos**. Viçosa: UFV, 2006.

CUNHA, J. F.; CANTO, C. S.; MARSAIOLI, A. J. Estudo da secagem de café por microondas. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 27, n. 4, p. 893-899, 2003.

CUNHA, M. L.; CANTO, M. W.; MARSAIOLI, A. Secagem de café cereja descascado por ar quente e microondas. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 23, n. 3, p. 381-385, 2003. DOI: 10.1590/S0101-20612003000300015.

DONZELES, V. P. **Secagem de café em terreiro: avaliação do processo e da qualidade do produto**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

EMBRAPA CAFÉ. **Boas práticas agrícolas para o café**. Brasília, DF: Embrapa Café, 2012.

ESTEVEES, B. N. **Influência do processo de secagem por pulverização mecânica (spray dryer) no tamanho de partícula e densidade aparente do café solúvel**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-03072007-172100/publico/ESTEVESBNcorrigido.pdf>>. Acesso em: 28 nov. 2024.

EVANGELISTA, S. R. et al. Inoculation of starter cultures in a semi-dry coffee (*Coffea arabica*) fermentation process. **Food Microbiology**, v. 44, p. 87-95, 2014.

FERREIRA, B. A. G. et al. Principais métodos de secagem utilizados na obtenção de polpa de fruto em pó solúvel: uma revisão. **Main drying methods used to obtain soluble fruit pulp powders: a review**, 2022. DOI: 10.34115/basrv6n6-011.

FERREIRA, João. Modelo de terreiro de café de baixo custo. **Revista Rumos**, v. 1, n. 6, 2022. Disponível em: <<https://revistas.unicerp.edu.br/index.php/rumos/article/view/2525-278x-v1n6-1>>. Acesso em: 13 fev. 2024.

FERREIRA, M. D.; MONTANUCCI, E. D. Efeito da temperatura de secagem nas características físico-químicas e sensoriais do café. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, v. 14, n. 1, p. 2965-2978, 2020. DOI: 10.3895/rbta.v14n1.8380. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbta/article/view/8380>>. Acesso em: 10 jan. 2025.

G1 SUL DE MINAS. **Robôs prometem agilizar processos de plantio e secagem do café em terreiros em MG**. G1, 15 nov. 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/sul-de-minas/noticia/2018/11/15/robos-prometem-agilizar-processos-de-plantio-e-secagem-do-cafe-em-terreiros-em-mg.ghtml>>. Acesso em: 28 mar. 2025.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport Processes and Unit Operations**. 3. ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1993.

GUIMARÃES, Pâmela Virgínia Ramos. **Secagem de Café: Uma Revisão**. 2010. 45 f. Monografia (Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

HALL, C. W. **Drying and storage of agricultural crops**. Westport: AVI, 1980. 381 p.

INTERCOFFEE. **Saiba como a altitude na produção de café interfere no sabor da bebida**. [S. l.], 2024. Disponível em: <<https://blog.cafeamerica.com.br/saiba-como-a-altitude-na-producao-de-cafe-interfere-no-sabor-da-bebida/>>. Acesso em: 20 abr. 2025.

INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION (ICO). **Aspectos botânicos**. Disponível em: https://www.ico.org/pt/botanical_p.asp. Acesso em: 22 jun. 2024.

KUMAR, C.; KARIM, M. A. Microwave convective drying of food materials: A critical review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 59, n. 13, p. 379-394, 2017. DOI: 10.1080/10408398.2017.1373269.

LIRA, Taisa; LIBARDI, Bernardo; BARCELOS, Kamilla; XAVIER, Thiago; BACELOS, Marcelo; BARROZO, Marcos. Análise do comportamento da fluidodinâmica do leito de jorro cônico com misturas de areia e casca de macadâmia. **Anais do Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEMP**, São Carlos, SP, p. 472–480, 2015. DOI: 10.5151/ENEMP2015-LE-713.

MACEDO, A. S. et al. **Estudo da fluidodinâmica e da secagem de resíduos do processamento do cacau em leito fluidizado**. 2017. 29 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2017. Disponível em: <<https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/7992/2/EstudoFluidodinamicaSecagem.pdf>>. Acesso em: 03 mai. 2025.

MAPA. **Café no Brasil**. 2017. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/cafe/cafeicultura-brasileira>>. Acesso em: 12 jun. 2024.

MARQUES, E. R. **Alterações químicas, sensoriais e microscópicas do café cereja descascado em função da taxa de remoção de água**. 2006. 85 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit operations of chemical engineering**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1991. 1130 p.

MEDEIROS, R. de V. V.; RODRIGUES, P. M. A. A economia cafeeira no Brasil e a importância das inovações para essa cadeia. **A Economia em Revista - AERE**, v. 25, n. 1, p. 1-12, 2017.

MOREIRA, R. V. **Caracterização do processo de secagem do café natural submetido a diferentes métodos de secagem**. 2015. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

MUJUMDAR, A. S. (Ed.). **Handbook of Industrial Drying**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015.

NUINTIN, Adriano Antonio. **O desenvolvimento de indicadores do desempenho e da qualidade para o processo de produção: Estudo de casos do processo de produção do café**. 2007. Dissertação (Mestrado em Controladoria e Contabilidade) – Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2007. DOI: 10.11606/D.96.2007.tde-20072007-164549.

OLIVEIRA, Andressa Coelho de; OLIVEIRA, Ana Mery de; MINOZZO, Marcelo Giordani; JUDACEWSKI, Priscila. Efeito de diferentes métodos de secagem em *Coffea canephora* produzido em diferentes altitudes no estado do Espírito Santo. **Revista Ifes Ciência**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 01–09, 2021. Disponível em: <<https://ojs.ifes.edu.br/index.php/ric/article/view/1028>>. Acesso em: 15 fev. 2024.

OLIVEIRA, PD; BORÉM, FM; ISQUIERDO, EP; GIOMO, G. da S.; DE LIMA, RR; CARDOSO, RA. Aspectos fisiológicos de grãos de café, processados e secos por diferentes métodos, associados à qualidade sensorial. **Coffee Science**, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 211–220, 2013.

PEREIRA, R. G.; ALVES, L. C.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; PINTO, T. C. M. Qualidade do café submetido à secagem em secador rotativo com aeração. **Engenharia na Agricultura**, v. 27, n. 4, p. 336-345, 2019.

PEREIRA, Vanessa Vitoriano. **Análise sensorial de genótipos de café Arábica resistentes à ferrugem processados por via úmida**. 2022. 75 f. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG. 2022.

PIMENTA, Carlos José. **Qualidade do café**. Lavras: Editora UFLA, 2003. 304 p.

POLIDRYER. **Secador leito fixo**. Disponível em: <<http://www.polidryer.com.br/secador-leito-fixo>>. Acesso em: 20 mar. 2025.

RABELLO, A. A. et al. Estudo comparativo de processos de secagem de café em diferentes intervalos de exposição por micro-ondas. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 8, n. 11, p. 71347-71355, 2022. DOI: 10.34117/bjdv8n11-040.

RABELLO, A. C. F.; ANDRADE, R. V.; FERREIRA, W. P.; REIS, J. B.; ALVARENGA, C. S. A. Secagem de café por micro-ondas: uma alternativa viável para a cafeicultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, n. 4, p. 288-293, 2022.

RASI, José Roberto; NETO, Mário Mollo; BERNARDO, Roberto. **Revisão bibliográfica para avaliação dos atuais processos de secagem de grãos**. In: HOLZMANN, Henrique Ajuz; DALLAMUTA, João (Orgs.). *Engenharia Mecânica: A Influência de Máquinas, Ferramentas e Motores no Cotidiano do Homem*. Atena Editora, 2021. p. 65–80. DOI: 10.22533/at.ed.8232117037.

REHAGRO. **Secagem mecânica de cafés: manejo e cuidados**. 2023. Disponível em: <<https://rehagro.com.br/blog/secagem-mecanica-de-cafes-manejo-e-cuidados/>>. Acesso em: 20 mar. 2025.

REINATO, C. H. R.; BOREM, F. M.; CIRILLO, M. Â.; OLIVEIRA, E. C. Qualidade do café secado em terreiros com diferentes pavimentações e espessuras de camada. **Coffee Science**, Lavras, v. 7, n. 3, p. 223-237, set./dez. 2012.

REVISTA A LAVOURA. **Estrutura móvel oferece vantagens na hora de secar o café.** *A Lavoura*, n. 716, 2016. Disponível em: <<https://alavoura.com.br/biblioteca/a-lavoura-716/estrutura-movel-oferece-vantagens-na-hora-de-secar-o-cafe/>>. Acesso em: 28 mar. 2025.

REVISTA CAFEICULTURA. No Dia Mundial do Café, conheça curiosidades da segunda bebida mais consumida no mundo. **Revista Cafeicultura**, [s.d.]. Disponível em: <<https://revistacafeicultura.com.br/no-dia-mundial-do-cafe-conheca-curiosidades-da-segunda-bebida-mais-consumida-no-mundo/>>. Acesso em: 14 jan. 2025.

RIBEIRO, Bruno Batista et al. Parâmetros qualitativos do café proveniente de diferentes processamentos na pós-colheita. **Revista Agrarian**, Dourados, v. 14, n. 4, p. 273-279, 17 out. 2011.

SANTINATO, R. **Cultivo do café: da planta ao grão**. Uberaba: Grupo Cultivar, 2008.

SANTOS, O. L. et al. Custo-benefício da secagem de café em diferentes tipos de terreno. **Revista Agrogeoambiental**, v. 9, n. 4, 2018. DOI: 10.18406/2316-1817v9n42017966.

SILVA, Andressa Carla Cintra da; SCHMIDT, F. C. Vacuum Freezing of Coffee Extract Under Different Process Conditions. **Food and Bioprocess Technology**, v. 12, n. 10, p. 1683-1695, 2019. DOI: 10.1007/s11947-019-02314-x.

SILVA, J. de S. **Secagem e armazenamento de produtos agrícolas**. Viçosa: Aprenda Fácil, 2000. 502 p.

SILVA, J.S.; AFONSO, A.D.L.; LACERDA FILHO, A.F. Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. In: SILVA, J.S. **Pré-processamento de produtos agrícolas**. Juiz de Fora: Instituto Maria, p. 395-461, 1995.

SILVA, J. S.; LACERDA FILHO, A. F. **Construção de um secador para produtos agrícolas**. Viçosa: Imprensa Universitária, 1984.

SILVA, Maria Izabela de Almeida; PASQUIM, Thaís Bruna Sala. **Acoffee: indústria de café solúvel**. 2018. 190 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, 2018.

TOPIK, Steven. How Brazil Expanded the World Coffee Economy. **Österreichische Zeitschrift für Geschichtswissenschaften**, v. 30, n. 3, p. 11-41, 2019. DOI: 10.25365/oezg-2019-30-3-2.

VARTAN, Julio. Coffee cultivation and industry in Brazil: a comprehensive review. **International Journal of Science and Society**, v. 5, n. 3, p. 323-332, 2023. DOI: 10.54783/ijssoc.v5i3.751.

VAZ, Carlos Johnantan Tolentino. **Efeito da fermentação na qualidade físico-química e sensorial do café arábica variedade catuaí amarelo (Coffea arabica)**. 2021. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal de Uberlândia, Patos de Minas, 2021. DOI: <<https://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.67>>.

VIANNA, A. P. F. **Avaliação tridimensional da sustentabilidade do terreiro de "lama asfáltica": a percepção dos cafeicultores e extensionistas da região Sul de Minas Gerais**. 2017. 58 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável e Extensão) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.