



RAFAELA REZENDE MIZAE

**LIOFILIZAÇÃO, UMA ALTERNATIVA PROMISSORA PARA
A CONSERVAÇÃO DE SEMENTES DE COFFEA ARABICA L.**

**LAVRAS-MG
2026**

RAFAELA REZENDE MIZAE

**LIOFILIZAÇÃO, UMA ALTERNATIVA PROMISSORA PARA A CONSERVAÇÃO
DE SEMENTES DE COFFEA ARABICA L.**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, na área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

Pesq. Dra. Sttela Dellyzete Veiga Franco da Rosa
Orientadora

Dra. Ana Maria Oliveira Ferreira
Coorientadora

Dra. Nathália Aparecida Bragança Fávaris
Coorientadora

**LAVRAS - MG
2026**

Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Mizael, Rafaela Rezende.

Liofilização, uma alternativa promissora para a conservação de sementes de *Coffea arabica* L. / Rafaela Rezende Mizael. - 2026.
76 p.

Orientadora: Sttela Dellyzete Veiga Franco da Rosa
Coorientadora: Ana Maria Oliveira Ferreira

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2025. Bibliografia.

1. *Coffea arabica* L.. 2. Liofilização. 3. Armazenamento. I. Rosa, Sttela Dellyzete Veiga Franco da. II. Ferreira, Ana Maria Oliveira. III. Fávaris, Nathália Aparecida Bragança. IV. Universidade Federal de Lavras. V. Título.

RAFAELA REZENDE MIZAE

**LIOFILIZAÇÃO, UMA ALTERNATIVA PROMISSORA PARA A CONSERVAÇÃO
DE SEMENTES DE COFFEA ARABICA L.**

**FREEZE-DRYING, A PROMISING ALTERNATIVE FOR THE CONSERVATION
OF COFFEA ARABICA L. SEEDS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, na área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 28 de agosto de 2025.

Pesq. Dra. Sttela Dellyzete Veiga Franco da Rosa EMBRAPA

Dra. Raquel Maria de Oliveira Pires

UFLA

Cristiane Carvalho Pereira

HELIX SEMENTES E
BIOTECNOLOGIA

Orientadora

Pesq. Dra. Sttela Dellyzete Veiga Franco da Rosa

Coorientadora

Dra. Ana Maria Oliveira Ferreira

Coorientadora

Dra. Nathália Aparecida Bragança Fávaris

**LAVRAS – MG
2026**

AGRADECIMENTOS

À Deus, por Sua graça e sustento constantes, toda honra e glória por tornar possível esta conquista.

Agradeço à minha família por todo apoio, por cada pesagem de curva na madrugada, por cada teste de germinação aos finais de semana, vocês são meu exemplo de vida e minha segurança.

Agradeço de forma especial, ao meu namorado Wallace, por ter sido meu porto seguro nos momentos mais difíceis. Sua torcida e apoio incondicional foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Agradeço à minha orientadora, Pesq. Dra. Sttela Dellyzete Veiga Franco da Rosa, que desde o Bic-Júnior reafirma meus valores e minha determinação, obrigada por todo apoio, disponibilidade e incentivo!

Agradeço às minhas coorientadoras, Dra. Ana Maria Oliveira Ferreira e Dra. Nathália Aparecida Bragança Fávaris pela atenção, orientação e apoio constantes, e pelas valiosas contribuições ao longo desta pesquisa.

Agradeço especialmente à Dra. Ana Luiza de Oliveira Vilela que me acompanhou desde o meu TCC, seu apoio, incentivo, paciência e palavras de encorajamento foram essenciais para manter minha motivação, essa dissertação não teria sido possível sem você!

Agradeço à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio institucional, científico e financeiro concedido, fundamental para a realização e o desenvolvimento deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado e investimento no desenvolvimento dessa pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Setor de Sementes pelo apoio institucional. A todos que me ajudaram direta ou indiretamente, suas contribuições foram essenciais para a minha formação e para essa conquista.

MUITO OBRIGADA!

“A ciência é o cultivo permanente da curiosidade”.
- Autor Desconhecido

RESUMO

A conservação de sementes de café ainda representa um grande desafio para a cafeicultura devido à perda de sua qualidade fisiológica após quatro a seis meses de armazenamento. Essa característica está relacionada à sensibilidade das sementes à dessecação. As sementes de *Coffea arabica* L. são classificadas como intermediárias por não tolerarem baixos teores de água, por isso, o objetivo deste estudo foi avaliar a sobrevivência de sementes de café arábica após liofilização e armazenamento em temperatura ambiente. Em um primeiro experimento, sementes da cultivar MGS Paraíso 2 foram secadas em sílica gel ou em peneiras suspensas até teores de água de 35, 30, 25, 20, 15 e 12% (base úmida) e posteriormente liofilizadas até cerca de 5% de umidade (bu). A qualidade fisiológica foi avaliada pelos testes de germinação, tetrazólio e condutividade elétrica. Num segundo experimento, avaliou-se pelos mesmos testes, o desempenho durante o armazenamento por seis meses, de sementes liofilizadas após secagem em sílica gel ou em peneiras suspensas até as umidades citadas acima. A liofilização comprometeu a formação de plântulas normais de sementes liofilizadas e pré-secadas entre 35% e 12% de umidade, enquanto a viabilidade não foi afetada nos teores de 15 e 20%. Após seis meses de armazenamento sem controle de temperatura, mais de 80% das sementes liofilizadas com 12% de umidade permaneceram viáveis e com alta porcentagem de protrusão radicular.

Palavras-chave: café; desidratação; secagem a vácuo; germinação; armazenamento.

ABSTRACT

The preservation of coffee seeds still represents a major challenge for coffee farming due to the loss of their physiological quality after six to eight months of storage. This characteristic is related to the sensitivity of the seeds to desiccation. *Coffea arabica* L. seeds are classified as intermediate because they do not tolerate low water content. In this context, freeze-drying emerges as an alternative by promoting water removal through sublimation at low temperatures and under vacuum, preserving cellular structures and metabolic functions for prolonged periods. The objective of this study was to evaluate the survival of Arabica coffee seeds after freeze-drying and storage at room temperature. In a first experiment, seeds of the cultivar MGS Paraíso 2 were dried on silica gel or suspended sieves to water contents of 35, 30, 25, 20, 15, and 12% (wet basis) and subsequently freeze-dried to approximately 5% moisture (wt). Physiological quality was evaluated by germination, tetrazolium, and electrical conductivity tests. In a second experiment, the performance of freeze-dried seeds was evaluated using the same tests during nine months of storage after drying on silica gel or suspended sieves to the moisture levels mentioned above. Freeze-drying compromised the formation of normal seedlings in freeze-dried and pre-dried seeds between 35% and 12% moisture, while viability was not affected at moisture levels of 15% and 20%. After nine months of storage without temperature control, more than 80% of the freeze-dried seeds with 12% moisture remained viable and with a high percentage of root protrusion.

Keywords: coffee; desiccation; vacuum drying; germination; storage.

INDICADORES DE IMPACTO

Na presente pesquisa foi avaliada a sobrevivência de sementes de *Coffea arabica* L. secadas em diferentes umidades e submetidas à liofilização, com foco na qualidade fisiológica. Os resultados demonstraram o potencial da liofilização como tecnologia alternativa para manter a viabilidade das sementes por um período maior que no armazenamento convencional. Os impactos gerados são de natureza tecnológica, econômica e ambiental, com aplicação em programas de melhoramento, bancos de sementes e cadeias produtivas do café, especialmente em regiões de cultivo como o Sul de Minas Gerais. Os resultados do estudo contribuem para o desenvolvimento de soluções sustentáveis no manejo de sementes, com potencial para beneficiar viveiristas, produtores, instituições de pesquisa e de conservação, além de cooperativas agrícolas. Houve envolvimento direto de docentes, estudantes de graduação e pós-graduação e técnicos de laboratório, resultando em capacitação e fortalecimento da formação científica na área de tecnologia de sementes. Os impactos se inserem nas áreas temáticas da Política Nacional de Extensão referentes à Tecnologia e Produção, Meio Ambiente e Educação, ao passo que se alinham aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, em especial os ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis). A pesquisa apresenta caráter extensionista em potencial, uma vez que os conhecimentos gerados poderão ser transferidos a setores produtivos e à sociedade, mediante parcerias com órgãos de extensão rural, viveiros comerciais e instituições de pesquisa. Desse modo, o estudo representa contribuição efetiva para a sustentabilidade e inovação tecnológica na agricultura, integrando ciência, conservação e desenvolvimento territorial.

IMPACT INDICATORS

In the present study, the survival of *Coffea arabica* L. seeds dried to different moisture levels and subjected to lyophilization was evaluated, with emphasis on physiological quality. The results demonstrated the potential of freeze-drying as an alternative technology to extend seed survival, reducing the need for refrigerated storage and contributing to the efficient conservation of germplasm. The impacts generated are technological, economic, and environmental in nature, with applications in breeding programs, seed banks, and coffee production chains, particularly in cultivation regions such as Southern Minas Gerais. The findings contribute to the development of sustainable solutions in seed management, with potential benefits for nurserymen, producers, research and conservation institutions, as well as agricultural cooperatives. The research involved the direct participation of professors, undergraduate and graduate students, and laboratory technicians, resulting in training and strengthening of scientific expertise in the field of seed technology. The impacts fall within the thematic areas of the National Extension Policy related to Technology and Production, Environment, and Education, while aligning with the United Nations Sustainable Development Goals, especially SDG 2 (Zero Hunger and Sustainable Agriculture), SDG 9 (Industry, Innovation, and Infrastructure) and SDG 12 (Responsible Consumption and Production). The study also presents extension potential, since the knowledge generated can be transferred to productive sectors and society through partnerships with rural extension services, commercial nurseries, and research institutions. Thus, the research represents an effective contribution to sustainability and technological innovation in agriculture, integrating science, conservation, and territorial development.

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE.....	11
1	INTRODUÇÃO GERAL	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
	SEGUNDA PARTE	21
	ARTIGO 1 - LIOFILIZAÇÃO DE SEMENTES DE <i>Coffea arabica</i> L. PRÉ- SECADAS POR DIFERENTES MÉTODOS ATÉ DECRESCENTES UMIDADES.....	22
	REFERÊNCIAS.....	44
	APÊNCICES	47
	ARTIGO 2 - ARMAZENAMENTO DE SEMENTES DE <i>Coffea arabica</i> L. LIOFILIZADAS	49
	REFERÊNCIAS.....	69
	APÊNDICES	71
	TERCEIRA PARTE.....	72
1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	72
	REFERÊNCIAS.....	73

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café, concentrando cerca de 31,8% da produção global do grão (Brasil, 2025). De acordo com o segundo levantamento de safra, realizado no mês de maio de 2025, pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a estimativa de produção para a safra brasileira de café em 2025 foi de 55,7 milhões de sacas beneficiadas, incluindo as espécies arábica e canéfora. Essa produção representa 1,5 milhão de sacas acima do volume produzido em 2024, apesar da influência dos efeitos da bienalidade negativa no café arábica e das condições climáticas adversas das safras anteriores que ainda exercem influência na produtividade do café canéfora. Tal produção evidencia a expressividade da cultura enquanto *commodity* tanto no mercado interno quanto no externo (CONAB, 2025). O café arábica (*Coffea arabica* L.) é uma das culturas agrícolas de maior relevância socioeconômica no cenário global, respondendo por cerca de 60% da produção mundial de café (Brasil, 2025) e movimentando uma extensa cadeia produtiva que envolve pequenos e grandes produtores, cooperativas, indústria e exportação (OIT, 2024). No país, o café arábica ocupa posição estratégica no agronegócio, contribuindo significativamente para o PIB agrícola, geração de empregos e desenvolvimento regional, especialmente em estados como Minas Gerais, São Paulo e Espírito Santo (CONAB, 2025).

A base para o sucesso produtivo de qualquer cultura agrícola reside na qualidade fisiológica das sementes utilizadas. Desde a sua maturação, as sementes iniciam um processo degenerativo e perdem gradativamente sua longevidade inerente. Por isso, para além de utilizar sementes de qualidade, é essencial ser capaz de retardar a perda de viabilidade das sementes. Uma das estratégias fundamentais para alcançar esse objetivo consiste na conservação da qualidade das sementes por meio de métodos eficientes de armazenamento (Sano *et al.*, 2016; Marcos Filho, 2016). As sementes de café possuem baixa longevidade, o que tem sido atribuído à sua sensibilidade à dessecação. Apesar de já terem sido classificadas como de comportamento recalcitrante e ortodoxo, após o estudo de Ellis *et al.* (1991), as sementes de café foram inseridas em uma categoria intermediária, visto que foram capazes de sobreviver ao armazenamento por doze meses sob uma temperatura de 15 °C após dessecação até aproximadamente 10% de umidade, segundo os autores.

Nesse contexto, a liofilização surge como uma alternativa para a conservação das sementes de café durante o armazenamento, sendo um método de secagem que consiste na

remoção da água, por meio da sublimação sob vácuo (Gonçalves, 2015). Amplamente utilizada na preservação de materiais biológicos sensíveis, a técnica apresenta como vantagens a redução drástica do teor de água e, conseqüentemente, a inibição de reações metabólicas degradativas, preservando a integridade estrutural dos tecidos, possibilitando o armazenamento em temperatura ambiente por longos períodos (Chumacero *et al.*, 2022). Entretanto, a aplicação da técnica em sementes de café ainda é pouco explorada, não sendo encontrados, na literatura, estudos que avaliem os efeitos da liofilização sobre a qualidade fisiológica dessas sementes. Além disso, a eficiência da técnica depende da adequação do teor de água das sementes antes do processo, uma vez que as etapas de congelamento e secagem por sublimação podem provocar danos celulares, comprometendo a viabilidade e o desempenho fisiológico das sementes. Dessa forma, objetivou-se nesse trabalho avaliar a sobrevivência de sementes de *Coffea arabica* L. submetidas à secagem por diferentes métodos e teores de água, posteriormente liofilizadas e armazenadas em condições de ambiente.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Importância do café no Brasil e no mundo

O café arábica está entre as commodities agrícolas de maior valor no cenário global, representando dois terços do mercado mundial de café. Trata-se de uma cultura de expressiva importância econômica, cultivada em aproximadamente 80 países de clima tropical, com uma produção anual próxima a sete milhões de toneladas de grãos verdes. Além disso, é a segunda commodity mais valiosa exportada por países em desenvolvimento, sendo fundamental para a subsistência de mais de 75 milhões de pessoas (Nasiro, 2024).

O Brasil ocupa a posição de maior produtor e exportador de café no mercado mundial desde o final do século XIX. Desde então, o setor cafeeiro tornou-se um dos principais responsáveis pela geração de riqueza para o país, respondendo atualmente por 31,4% da produção mundial (OIT, 2024). Entre os meses de janeiro e agosto de 2024, o país exportou 32,1 milhões de sacas de 60 kg de café, e no mês de dezembro as exportações brasileiras de café superaram o recorde anual do ano de 2020 de 43,9 milhões de sacas de 60 kg (CONAB, 2024). Segundo dados divulgados pela Associação Brasileira da Indústria de Café (ABIC), em 2024, o brasileiro consumiu mais de 21,9 milhões de sacas de café, se destacando como o segundo maior país consumidor. O Estado de Minas Gerais é o maior produtor de café no Brasil. Em 2025, a produção estimada para o Estado mineiro foi de 26,1 milhões de sacas, redução de 7,1% em comparação ao total colhido na safra anterior devido às estiagens, acompanhadas por altas temperaturas durante o ciclo reprodutivo das lavouras. Em seguida, destacam-se os Estados do Espírito Santo, São Paulo e Bahia possuem produção estimada de 14,64 milhões, 5,5 milhões e 3,7 milhões respectivamente (CONAB, 2025).

2.2 Caracterização do cafeeiro

A origem do café remonta ao século IX, na Etiópia, e está envolta em histórias e tradições que marcaram o início de sua trajetória. No Brasil, o café surgiu pela introdução de sementes e mudas no Estado do Pará em 1727, oriundas da Guiana Francesa pelo sargento-mor Francisco de Mello Palheta (Matiello *et al.*, 2016).

Os cafeeiros pertencem à divisão das Fanerógamas, classe Angiosperma, subclasse Eudicotiledônea, ordem Rubiales, família das *Rubiaceae*, tribo *Coffeae*, subtribo *Coffeinae*, gêneros *Coffea* e *Psilanthus*, sendo o primeiro gênero composto pelos subgêneros *Coffea* e

Baracoffea. As espécies de café mais conhecidas estão reunidas no subgênero *Coffea*, na seção *Eucoffea*, que remonta às regiões central e oeste do continente africano (Guerreiro Filho *et al.*, 2008). Dentro do gênero *Coffea*, as espécies *Coffea arabica* L. e *Coffea canephora* Pierre são as de maior destaque econômico no país, sendo que o cultivo de *C. arabica* detém cerca de 81,7% da área total destinada à cafeicultura, tornando a espécie a mais importante do gênero (CONAB, 2025).

O café é uma planta perene, de porte arbustivo de crescimento contínuo, com caule lenhoso, lignificado, reto e quase cilíndrico. Os ramos apresentam dimorfismo em relação à direção que crescem: os ramos ortotrópicos crescem em sentido vertical e formam as hastes ou os troncos, e os ramos plagiotrópicos crescem na horizontal onde se dá a produção dos frutos. As plantas apresentam folhas opostas de coloração verde-escura e brilhante na face superior do limbo, enquanto a face inferior é mais clara, opaca e com nervuras salientes. Normalmente as flores são brancas, mas também podem apresentar coloração amarela e rosa claro. São tubulosas e comumente possuem cinco pétalas. As flores são hermafroditas, crescem em rosetas e duram cerca de 3 a 4 dias após sua abertura. Por fim, o fruto originado é do tipo drupa, composto por camadas. A camada mais externa é o exocarpo (casca) que, dependendo da cultivar, pode apresentar coloração vermelha ou amarela quando maduro. O mesocarpo ou mucilagem, é uma camada gelatinosa rica em açúcares e água. O endocarpo, também chamado de pergaminho, é a camada mais interna, e à medida que o fruto amadurece, torna-se mais coriáceo (Rena e Maestri, 1986). Há ainda o espermoderma, também chamado de película prateada, uma película fina que envolve a semente. Em sua estrutura interna, o fruto geralmente contém dois lóculos, cada um abrigando uma semente plano-convexa, envolvida individualmente pelo pergaminho. A cor da casca do fruto varia do amarelo ao roxo, sendo as cores mais comuns o vermelho e o amarelo (Matiello *et al.*, 2016).

O ciclo fenológico do café depende diretamente da espécie. O café arábica, principal espécie do gênero, possui um ciclo fenológico de dois anos. No primeiro ano, durante a primavera e o verão, são formados os ramos plagiotrópicos e as gemas vegetativas axilares nos nós do ramo ortotrópico. No outono e inverno, as mesmas gemas são induzidas por fotoperiodismo, em gemas produtivas. As gemas produtivas amadurecem e entram em dormência até a ocorrência das chuvas ou irrigação e, após passados 10 a 15 dias há a abertura dos botões florais, indicando o começo do segundo ano fenológico. Posteriormente, os grãos passam pelo estágio de expansão até seu tamanho final, passando do estágio de “chumbinho” até a granação (enchimento) e por fim, a maturação dos frutos (Dussert *et al.*, 2012).

2.3 Caracterização das sementes de *Coffea arabica* L.

A semente constitui o principal insumo para garantir a produtividade de uma lavoura e, ao mesmo tempo, representa o resultado de todo o trabalho desenvolvido por produtores e melhoristas. Dentre as espécies do gênero *Coffea*, *Coffea arabica* L. é a mais antiga e cultivada, destacando-se por sua expressiva importância econômica. As sementes do café arábica têm entre 10 e 18 mm de comprimento e 6,5 a 9,5 mm de largura, são de formato elíptico ou ovalado e possuem um sulco longitudinal na superfície plana (Dedecca, 1957). São constituídas de embrião, endosperma e um envoltório, também chamado de película prateada. O embrião está localizado próximo à superfície convexa da semente e possui poucas reservas de armazenamento. Ele tem de 3 a 4 mm de comprimento e é composto por radícula, hipocótilo e cotilédones. O endosperma é o que fornece as reservas energéticas essenciais para o processo de germinação e emergência, sendo constituído principalmente por carboidratos. A película prateada é constituída de inúmeras células esclerenquimatosas dispersas em diversas direções, sendo a maioria delas paralelamente à superfície da semente (Veiga, 2005).

Em sua composição química, as sementes do cafeeiro possuem teores de carboidratos de 55 a 65%, lipídeos de 15 a 18%, compostos nitrogenados de 11 a 15%, proteína de 8,5 a 12%. Teores de ácidos cítrico, málico, clorogênico, acético, butírico e valérico variando de 8 a 11%, minerais de 3 a 5,4%, lignina de 1 a 3%, e cafeína de 0,8 a 1,4% (Pimenta, 2003). Além dos componentes químicos, as sementes apresentam diferentes formas de água em sua estrutura, que podem ser classificadas como água absorvida e água adsorvida. A água absorvida encontra-se nos espaços intergranulares e nos poros, sendo retida por forças capilares, o que caracteriza ligações mais fracas. Já a água adsorvida, encontra-se aderida por meio de forças de atração molecular de natureza física ou química, sendo também denominada água ligada ou água presa. Em função da natureza das ligações estabelecidas entre as moléculas de água e os constituintes da semente, a água pode ser classificada em cinco tipos. A água do tipo 1, denominada água de constituição, encontra-se fortemente ligada aos constituintes químicos da semente, sendo retida por potenciais matriciais inferiores a -150 MPa. As águas do tipo 2 e do tipo 3 correspondem, respectivamente, às faixas de umidade entre 8 e 22% e entre 22% e 33% (base úmida), representando o intervalo normalmente alcançado durante a secagem comercial de sementes. A água do tipo 4 corresponde a teores de água entre 33% e 55% (bu), enquanto a água do tipo 5 corresponde a teores superiores a 55% (bu). Embora a água dos tipos 4 e 5 seja facilmente removida, sua extração em condições inadequadas pode comprometer a qualidade da semente. Por isso, a secagem de sementes com elevados teores de água deve ser conduzida sob

temperaturas mais baixas e com maior velocidade do ar, de modo a minimizar a ocorrência de danos e preservar a qualidade fisiológica. (Oliveira, Rosa e Carvalho, 2021).

A germinação das sementes de café é lenta e desuniforme. Diversos fatores influenciam essa lentidão, entre os quais destacam-se as características relacionadas ao desenvolvimento e maturação dos frutos, processos de pós-colheita, possível existência de inibidores naturais e a presença do pergaminho. Durante o processo germinativo, a faixa ótima de temperatura fica entre 25 °C e 35 °C, para estudos realizados em laboratório a temperatura recomendada é de 30 °C e, nessa temperatura, com cinco dias a protrusão da radícula se inicia e até o décimo quinto dia, a maioria das sementes já germinou (Mendonça, 2023). Ao longo do tempo, diversas cultivares de *C. arabica* foram desenvolvidas pelo melhoramento genético visando melhorar características como vigor, produtividade, adaptabilidade, resistência a pragas e doenças, além de qualidade da bebida. A cultivar MGS Paraíso 2 foi desenvolvida pelo Programa de Melhoramento Genético do Cafeeiro da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais – EPAMIG e instituições parceiras, a partir da hibridação artificial entre o ‘Catuaí Amarelo IAC 30’ e o Híbrido de Timor UFV 445-46 (Botelho *et al.*, 2021; Oliveira *et al.*, 2021; Nasiro, 2024). As sementes desta cultivar demonstraram elevada capacidade produtiva em diversos ambientes, além de ampla adaptação às regiões produtoras de café de Minas Gerais e resistência à ferrugem. Além disso, a cultivar alcançou nota máxima de vigor na escala proposta por Carvalho, Monaco e Fazuoli (1979), o que confere às plantas alto vigor e alto crescimento de ramos produtivos (Pereira *et al.*, 2019; Botelho *et al.*, 2021). A expressão dessas características depende, entre outros fatores, da manutenção da qualidade fisiológica das sementes. Todas as sementes estão sujeitas a perda da qualidade em decorrência das alterações bioquímicas e fisiológicas que ocorrem principalmente entre a maturidade fisiológica e a semeadura, embora o processo de deterioração tenha início logo após a fertilização do óvulo. Contudo, a velocidade em que ocorre é influenciada principalmente pela interação entre o genótipo, o teor de água presente nas sementes e as condições ambientais (Carvalho, 2017).

2.4 Longevidade e tolerância à dessecação

As sementes, como organismos vivos, também estão sujeitas ao processo de envelhecimento, que resulta na perda gradual da viabilidade e do vigor. A longevidade corresponde ao período máximo em que uma semente permanece viva e capaz de germinar sob condições adequadas de armazenamento. Essa “vida útil” é uma característica inerente às sementes, geneticamente determinada, variando entre as diferentes espécies vegetais (Dadlani

e Yadava, 2023). Entre os diversos fatores que influenciam a longevidade das sementes, destaca-se a sensibilidade à dessecação. Comumente chamada de tolerância à dessecação, refere-se à capacidade da semente de sobreviver à remoção de quase toda a água livre celular e retomar suas funções metabólicas sem danos permanentes após a reidratação (Oliver *et al.*, 2000; Phillips *et al.*, 2002). Essa habilidade é adquirida progressivamente durante o desenvolvimento e a maturação, e sementes de diferentes espécies, bem como suas estruturas constituintes, exibem diferentes níveis de tolerância à dessecação.

De acordo com a resposta à dessecação e o comportamento durante o armazenamento, as sementes foram inicialmente classificadas em dois tipos principais: ortodoxas e recalcitrantes. As espécies ortodoxas toleram secagem intensa (entre 5% e 7% de umidade) e baixas temperaturas por longos períodos, enquanto as recalcitrantes são liberadas da planta-mãe com elevados teores de água, teores que devem permanecer altos durante seu desenvolvimento e armazenamento para não haver perda de viabilidade e/ou morte (Brandão Júnior *et al.*, 2002; Costa, 2009; Marcos Filho, 2016). As espécies do gênero *Coffea* apresentam ampla variabilidade com relação a sensibilidade à desidratação. Diversos estudos demonstram que as sementes de café arábica podem ser parcialmente desidratadas sem perda de viabilidade. Entretanto, os limites de tolerância à dessecação ainda são controversos. De acordo com a literatura, o teor de água letal varia entre 5% e 16% da massa fresca (MF), dependendo dos autores (Dussert *et al.*, 2012). Com isso, foi observado que as sementes de café toleram mais baixos teores de água e temperatura que as sementes recalcitrantes, mas não toleram as mesmas condições que as ortodoxas e, portanto, passaram a ser consideradas como intermediárias, categoria identificada por Ellis e colaboradores, no final do século XX (Huang *et al.*, 2014). Devido a seu comportamento intermediário, as sementes de café possuem longevidade limitada, o que dificulta sua conservação, visto que um armazenamento eficiente requer baixos teores de água e baixas temperaturas e que procedimentos tradicionalmente empregados na secagem e armazenamento podem causar danos irreversíveis à sua viabilidade (Coelho *et al.*, 2015; Carvalho, 2017).

2.5 Secagem e liofilização

A desidratação é um dos processos mais antigos de preservação de alimentos. O fato de os alimentos serem desidratados era uma vantagem para os povos primitivos quando precisavam percorrer grandes distâncias, visto que além da conservação, o alimento ficava mais leve e fácil de ser transportado (Gonçalves, 2015). Tais vantagens ainda são aproveitadas na

atualidade, sendo a secagem amplamente utilizada na indústria farmacêutica e química e para o armazenamento e transporte de grãos e sementes. Segundo Oliveira, Rosa e Carvalho (2021), por definição, a secagem consiste na transferência simultânea de calor e de massa entre a semente e o ar de secagem. O calor fornecido pelo ar promove a evaporação da água presente nas sementes, enquanto o vapor gerado é transportado para a corrente de ar e removido da massa de sementes, reduzindo gradativamente seu teor de água. Esse processo constitui uma etapa fundamental na pós-colheita de sementes, influenciando diretamente na preservação de sua qualidade fisiológica. Com a redução do teor de água, ocorre a diminuição da atividade metabólica e da respiração, retardando os processos de deterioração e consequentemente preservando seu vigor e viabilidade por mais tempo durante o armazenamento. Quando conduzida inadequadamente, pode não apenas prejudicar as sementes, mas também inutilizá-las (Carvalho e Nakagawa, 2012). Nesse contexto, a liofilização é um processo de secagem que envolve a remoção da água de um produto por sublimação e em condições de baixa temperatura e de baixa pressão. Em outras palavras, a água transita do estado sólido (gelo) diretamente para o estado gasoso (vapor), sem passar pelo líquido (Nowak e Jakubczyk, 2020). Assim como nos outros tipos de secagem, ocorrem durante a liofilização processos de transferência de calor e massa simultaneamente. As forças motrizes desses processos são os gradientes de temperatura e de pressão parcial (El-Bachá e Kim, 2014).

A liofilização ocorre em três estágios: congelamento, secagem primária e secagem secundária. Durante a etapa de congelamento, o material é disposto sobre prateleiras dentro da câmara de secagem e inicialmente resfriado a temperaturas tão baixas quanto -50°C , promovendo o congelamento da maior parte da água presente, denominada “água livre” (Fissore, Basano e Barresi, 2014). Ao final dessa fase, cerca de 65 a 90% do solvente (comumente água) estará na forma sólida. Nessa etapa é de extrema importância que a maior parte da solução seja congelada, visto que a forma, o tamanho e a distribuição dos poros na camada seca serão formados a partir da sublimação desse solvente congelado (Lima, 2021). Em seguida, a pressão na câmara é reduzida, permitindo a sublimação do gelo. Nesse momento, é necessário fornecer calor ao produto, uma vez que a sublimação é um processo endotérmico. No último estágio, eleva-se a temperatura do produto (e, em alguns casos, reduz-se ainda mais a pressão na câmara), intensificando a remoção da água “ligada” pela dessorção, até que se atinja o teor residual de umidade desejado (Marques e Costa, 2015; Juckers *et al.*, 2023).

Dentre as vantagens que a técnica apresenta, destacam-se a facilidade de aplicação, a rapidez no processo de reidratação e a economia de espaço para armazenamento. Além disso, a liofilização contribui para a preservação das características sensoriais do produto, mantendo

propriedades próximas às observadas no produto original (Marques e Costa, 2015). O método é amplamente utilizado para a estabilização de alimentos de alta qualidade, materiais biológicos e produtos farmacêuticos, incluindo proteínas, vacinas, bactérias e células de mamíferos. Durante o processo, as propriedades biológicas, nutricionais e organolépticas dos produtos secos são mantidas, pois o congelamento da água no material inibe processos químicos, bioquímicos e microbiológicos. A ausência de água líquida e as baixas temperaturas durante a liofilização restringem ou eliminam atividades degradativas, como a degradação de proteínas, ação microbiana, reações enzimáticas e escurecimento não enzimático. O alto vácuo na câmara de liofilização também reduz a concentração de oxigênio disponível, retardando significativamente a deterioração de componentes sensíveis ao calor e ao oxigênio. Como resultado, sabor, cheiro e conteúdo de diversos nutrientes permanecem inalterados (Nowak e Jakubczyk, 2020; Nwankwo *et al.*, 2023). Por essa razão, se o produto for acondicionado e armazenado em condições adequadas, pode permanecer inalterado por um período prolongado (Bartolomeu, 2014). Perante todas as vantagens, o processo também apresenta limitações, sendo as principais, o custo elevado atribuído à baixa pressão requerida e a longa duração do processo, assim como, a necessidade de embalagens que forneçam vedação a vácuo, de modo a evitar reações de oxidação lipídica e absorção de água pelo produto que se torna altamente higroscópico ao final do processo (El-Bachá e Kim, 2014).

A secagem e o teor de água exercem grande influência sobre a qualidade das sementes de café, principalmente em função de sua sensibilidade à dessecação (Coelho *et al.*, 2015), por isso a liofilização destaca-se como uma alternativa promissora para a secagem dessas sementes, por promover a remoção da água em baixas temperaturas e sob pressão reduzida, minimizando possíveis danos fisiológicos. Além disso, essa técnica pode favorecer um armazenamento mais seguro e prolongado, contribuindo para a conservação da qualidade e da viabilidade das sementes ao longo do tempo.

2.6 Armazenamento de sementes

O armazenamento de sementes compreende o conjunto de práticas destinadas a preservar sua qualidade fisiológica, mantendo elevados os níveis de viabilidade e vigor até o momento de sua semeadura ou comercialização (Dadlani e Yadava, 2023). Durante esse período, as sementes permanecem vivas e mantêm atividade metabólica em baixa intensidade, estando sujeitas a um processo contínuo de deterioração, de caráter inevitável e irreversível. Esse processo envolve alterações fisiológicas, bioquímicas e estruturais, como a degradação

das membranas celulares, a desorganização de sistemas enzimáticos e o aumento da respiração celular (Matias *et al.*, 2023). Como consequência, ocorre redução progressiva do vigor e da viabilidade, refletindo em menor germinação, desenvolvimento mais lento de plântulas e maior sensibilidade a condições adversas. A intensidade desse processo é influenciada por fatores como o teor de água das sementes, a umidade relativa do ar, a temperatura de armazenamento e ao tipo de embalagem utilizada.

As estratégias para a conservação de sementes de café envolvem, principalmente, a realização de uma secagem adequada logo após a colheita, reduzindo o teor de água das sementes a níveis que diminuam a atividade metabólica sem provocar danos por dessecação. Isso porque, a redução excessiva da umidade pode comprometer a integridade celular em razão da sensibilidade das sementes de café à dessecação, reduzindo seu potencial de armazenamento (Corrêa *et al.*, 2022; Dadlani e Yadava, 2023).

O uso de embalagens adequadas constitui outra importante estratégia de conservação, uma vez que embalagens impermeáveis ou semipermeáveis auxiliam na estabilidade do teor de água das sementes durante o armazenamento, reduzindo as trocas de umidade com o ambiente (Salomão, 2021; Corrêa *et al.*, 2022). Além disso, a utilização de sementes de alta qualidade fisiológica no início do armazenamento é fundamental, uma vez que sementes deterioradas apresentam menor potencial de conservação (Freitas, 2010).

Outro aspecto fundamental é o monitoramento periódico da qualidade das sementes armazenadas por meio de testes que permitam avaliar sua viabilidade, vigor e estado fisiológico. Essas avaliações possibilitam acompanhar as alterações fisiológicas ao longo do armazenamento e subsidiam a adoção de medidas para minimizar perdas de qualidade (Marcos Filho, 2016).

SEGUNDA PARTE

Artigo 1 - Elaborado conforme a norma NBR 6022	
Título do artigo:	Liofilização de sementes de <i>Coffea arabica</i> L. pré-secadas por diferentes métodos até decrescentes umidades
Autores:	Rafaela Rezende Mizael, Sttela Dellyzete Veiga Franco da Rosa, Ana Maria Oliveira Ferreira, Nathália Aparecida Bragança Fávaris



ARTIGO 1 - LIOFILIZAÇÃO DE SEMENTES DE *Coffea arabica* L. PRÉ-SECADAS POR DIFERENTES MÉTODOS ATÉ DECRESCENTES UMIDADES

FREEZE-DRYING OF *Coffea arabica* L. SEEDS PRE-DRIED BY DIFFERENT METHODS TO DECREASING MOISTURE LEVELS¹

Rafaela Rezende Mizael

<https://orcid.org/0009-0006-0051-7837>

Sttela Dellyzete Veiga Franco da Rosa

<https://orcid.org/0000-0001-9959-6606>

Ana Maria Oliveira Ferreira

<https://orcid.org/0000-0003-1456-9815>

Nathália Aparecida Bragança Fávaris

<https://orcid.org/0000-0001-6836-890X>

Resumo: Sementes de café são sensíveis à dessecação, sendo que os danos causados pela redução do teor de água dependem, dentre outros fatores, do próprio método de secagem utilizado. Devido à essa alta sensibilidade à dessecação, as sementes de café têm baixa longevidade, apresentando grandes complicações quanto à sua conservação. Uma alternativa a ser investigada é a liofilização, que consiste num processo de secagem que reduz drasticamente a água, por meio da sublimação em baixas temperaturas e sob vácuo, permitindo a preservação das estruturas celulares e das funções metabólicas em materiais biológicos sensíveis. Nesse sentido, o objetivo no trabalho foi avaliar a sobrevivência de sementes de *Coffea arabica* L. após pré-secagem por diferentes métodos e após liofilização. No primeiro experimento, sementes da cultivar MGS Paraíso 2 foram secadas em sílica gel ou em peneiras suspensas até as umidades de 35, 30, 25, 20, 15, 12 e 5% base úmida (bu) e avaliadas pelos testes de germinação, tetrazólio e condutividade elétrica. No segundo experimento, as sementes pré-secadas foram liofilizadas, até atingirem umidade de 4 a 5% bu e avaliadas pelos mesmos testes. A secagem até 5% de umidade provoca a perda acentuada da capacidade de sementes de *Coffea arabica* L. produzirem plântulas normais, mas os embriões isolados são preservados nesta mesma umidade. As sementes liofilizadas após pré-secagem até as umidades testadas, de 35 até 12% bu, tem a formação de plântulas normais comprometida, porém em umidade de 20 ou 15% bu, as sementes não têm a viabilidade afetada.

Palavras-chave: café arábica; sementes; secagem; qualidade fisiológica.

¹ Artigo científico apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal.

Abstract: Coffee seeds are sensitive to desiccation, and the damage caused by the reduction of water content depends, among other factors, on the drying method used. Due to this high sensitivity to desiccation, coffee seeds have low longevity, presenting significant complications regarding their conservation. An alternative to be investigated is freeze-drying, which consists of a drying process that drastically reduces water, through sublimation at low temperatures and under vacuum, allowing the preservation of cellular structures and metabolic functions in sensitive biological materials. In this sense, the objective of this study was to evaluate the survival of *Coffea arabica* L. seeds after pre-drying by different methods and after freeze-drying. In the first experiment, seeds of the cultivar MGS Paraíso 2 were dried in silica gel or in suspended sieves up to the humidity of 35, 30, 25, 20, 15, 12 and 5% wet basis (wb) and evaluated by germination, tetrazolium and electrical conductivity tests. In the second experiment, the pre-dried seeds were lyophilized until they reached a moisture content of 4 to 5% wb and evaluated by the same tests. Drying up to 5% moisture content causes a marked loss of the ability of *Coffea arabica* L. seeds to produce normal seedlings, but the isolated embryos are preserved at this same moisture level. The freeze-dried seeds after pre-drying to the tested moistures, from 35 to 12% wb, have the formation of normal seedlings compromised, but at humidity of 20 or 15% bu, the seeds do not have their viability affected.

Keywords: arabica coffee; seeds; drying; physiological quality.

1 INTRODUÇÃO

O café (*Coffea arabica* L.) é uma das culturas agrícolas de maior importância econômica e social no mundo, desempenhando papel estratégico na geração de renda, empregos e divisas para diversos países produtores (CONAB, 2025). O Brasil destaca-se como o maior produtor e exportador mundial da espécie, sendo responsável por uma parcela expressiva da produção global (OIT, 2024). Nesse contexto, a utilização de sementes de elevada qualidade fisiológica é fundamental para o estabelecimento de lavouras uniformes e produtivas, contribuindo para a expressão do potencial genético das cultivares (Marcos Filho, 2016).

As sementes de *C. arabica* apresentam comportamento fisiológico intermediário em relação à dessecação, tolerando apenas reduções moderadas no teor de água antes que ocorram perdas significativas de vigor e viabilidade (Huang *et al.*, 2014). Essa característica limita a aplicação de métodos convencionais de conservação e dificulta a manutenção da qualidade fisiológica por longos períodos (Carvalho, 2017). Assim, compreender os limites de tolerância à dessecação e desenvolver estratégias que minimizem os danos decorrentes da remoção de água constituem desafios relevantes para a tecnologia de sementes de café.

Entre as técnicas de secagem disponíveis, a liofilização destaca-se por promover a remoção da água em condições de baixa temperatura e baixa pressão, reduzindo danos térmicos e preservando características estruturais e funcionais. Entretanto, a eficiência dessa técnica depende de fatores como o teor de água inicial do material e as condições de processamento (Fissore, Basano e Barresi, 2014; Marques e Costa, 2015). No caso das sementes de café, não foram encontrados na literatura, estudos que avaliem os efeitos da liofilização sobre a qualidade fisiológica, especialmente considerando a influência do método de pré-secagem e dos diferentes teores de água das sementes antes da liofilização. Pesquisas recentes indicam que sementes com maior teor de água não toleram a liofilização, enquanto aquelas submetidas a níveis de umidade suficientemente baixos podem manter parte de sua viabilidade (Carvalho *et al.*, 2023).

Diante desse cenário, torna-se necessária a investigação de estratégias que permitam ampliar o conhecimento sobre a resposta de sementes de *Coffea arabica* L. à liofilização. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar a qualidade fisiológica de sementes previamente secadas por diferentes métodos até decrescentes teores de água e, posteriormente, submetidas à liofilização, buscando identificar condições que favoreçam a preservação de sua viabilidade e vigor.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Obtenção e processamento do material vegetal

Frutos maduros de *Coffea arabica* L., cultivar MGS Paraíso 2, foram colhidos manualmente no estádio cereja, na área de pesquisa do Setor de Cafeicultura/DAG/ESAL da UFLA. Após a colheita, os frutos foram descascados mecanicamente. As sementes foram desmuciladas por fermentação em água durante 24 horas, em câmara de crescimento à 25 °C. Posteriormente, foram lavadas até a completa retirada da mucilagem e passaram por seleção manual para a retirada de sementes defeituosas, sem pergaminhos, com cascas e outras impurezas. As sementes foram colocadas em peneiras de malhas de nylon, à sombra, para a secagem da umidade superficial ($\pm$ 2-3 dias). Os experimentos foram conduzidos no Laboratório Central de Pesquisa em Sementes - LCPS, do Departamento de Agricultura da Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras, Minas Gerais.

2.2 Caracterização inicial das sementes

A caracterização inicial das sementes foi realizada por meio da determinação do teor de água e da avaliação da qualidade fisiológica. O teor de água inicial foi de 47,06% pelo método da estufa 105 °C (Brasil, 2025). As sementes apresentaram 97% de protrusão radicular e 97% de formação de plântulas normais no teste de germinação (Brasil, 2025), 98% de viabilidade no teste de tetrazólio e condutividade elétrica de $100,57 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$.

2.3 Delineamento experimental

Os experimentos foram realizados em delineamento inteiramente casualizado, sendo o primeiro em esquema fatorial $2 \times 7 + 1$, sendo dois métodos de secagem (sílica gel ou peneiras suspensas) e sete umidades (35, 30, 25, 20, 15, 12 e 5% bu), mais um adicional com umidade de 47% utilizado como tratamento controle. No segundo experimento foi utilizado o esquema fatorial $2 \times 6 + 2$, para cada método de secagem, sendo dois tipos de sementes (liofilizadas e não liofilizadas) e seis umidades (35, 30, 25, 20, 15 e 12% bu), mais dois adicionais, sendo sementes sem liofilização nas umidades 12% e 5% bu.

2.4 Experimento 1: Secagem das sementes por diferentes métodos

Foram realizados dois tipos de secagem: rápida, em sílica gel, e lenta, em peneiras suspensas. Em ambos, as sementes foram secadas até atingirem as seguintes umidades: 35, 30, 25, 20, 15, 12 e 5% base úmida (bu). A secagem em sílica gel foi realizada dispondo as sementes, com pergaminho, em camada única sobre telas metálicas, no interior de caixas de acrílico do tipo gerbox, contendo ± 60 mg de sílica gel ativada em seu interior, abaixo das telas. Os gerbox foram mantidos em câmaras de germinação do tipo B.O.D., em temperatura constante de 25 °C. A sílica foi trocada conforme foi adsorvendo a água das sementes e perdendo sua coloração azul. Para a secagem em peneiras suspensas, as sementes com pergaminho foram dispostas em camada única sobre telas de nylon mantidas em uma sala fechada, à sombra, sem controle da umidade ambiente, permanecendo descobertas e expostas ao ar durante todo o processo, sendo revolvidas três vezes ao dia. Em ambos os métodos, a perda de água durante a secagem foi monitorada por pesagens contínuas em balança de precisão (0,001 g), até que as sementes atingissem os teores de água de interesse (Coelho *et al.*, 2020). Durante e após a secagem, o teor de água das sementes foi conferido pelo método de estufa a 105 °C (Brasil, 2025).

2.4.1 Avaliação fisiológica das sementes

Teste de germinação

O teste foi realizado de acordo com as Regras para Análise de Sementes – RAS, com modificações. Foram semeadas quatro repetições de 25 sementes, sem os pergaminhos, em papel de germinação umedecido em água destilada em quantidade equivalente a 2,5 vezes o peso do papel seco. Os rolos de germinação, foram mantidos em germinador do tipo “Mangelsdorf” em temperatura constante de 30 °C. Aos 15 dias foi determinada a porcentagem de protrusão radicular e aos 30 dias foi determinada a porcentagem de plântulas normais considerando apenas as que apresentavam raiz principal e pelo menos duas raízes laterais.

Teste de tetrazólio

Foram utilizadas quatro repetições de 10 sementes, sem os pergaminhos, as quais foram embebidas em água destilada durante 36 horas a 30 °C em germinador, de acordo com Clemente

et al. (2011). Após a embebição, os embriões foram extraídos com o auxílio de bisturi e mantidos em solução antioxidante polivinilpirrolidona (PVP) e, em seguida, foram imersos em solução de sal de tetrazólio a 0,5%, na ausência de luz, por período de 3 horas, a 30 °C em germinador. Posteriormente foram avaliados quanto a coloração vermelha, em intensidade e localização, sendo os resultados expressos em porcentagem de embriões viáveis.

Condutividade elétrica

Quatro repetições de 25 sementes, sem os pergaminhos, foram inicialmente pesadas e colocadas para embeber em copos plásticos, em 37,5 mL de água deionizada, sendo mantidas por 24 horas em B.O.D. em temperatura constante de 25 °C (Krzyzanowski *et al.*, 2020). Após esse período foi realizada a leitura da condutividade elétrica da solução contendo as sementes, em condutivímetro de bancada, sendo os resultados expressos em $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$.

2.4.2 Análise estatística

Foi realizado o teste de normalidade e de homogeneidade das variâncias por meio do teste Shapiro-Wilk, e, quando necessário, os dados foram transformados em porcentagem de raiz quadrada de arco seno. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knot, considerando $p < 0,05$. A análise dos dados foi realizada com o software estatístico R, versão 4.2.3 (R CORE TEAM, 2023).

2.5 Experimento 2: Liofilização de sementes pré-secadas

Para a liofilização, as sementes previamente secadas em sílica gel ou peneiras até os teores de água de 35, 30, 25, 20, 15 e 12% (bu), mantidas com pergaminho, foram distribuídas em três sacos de “filó” para cada tratamento, de modo a não obstruir a passagem do vapor de água das sementes no interior do liofilizador. Em seguida, os sacos foram acondicionados em liofilizador de bancada (Integrated SpeedVac System modelo L101, marca Liobras), permanecendo no equipamento até que as sementes atingissem teor de água de aproximadamente 5% (b.u.).

Além dos tratamentos submetidos à liofilização, foram incluídos dois tratamentos adicionais como controle, constituídos por sementes não liofilizadas, secadas em sílica gel ou peneiras, com teores de água de 12% e 5% (bu). O teor de água de 12% foi escolhido por

corresponder à condição normalmente utilizada para o armazenamento de sementes de café. Já o teor de água de 5% foi adotado por ser equivalente ao das sementes submetidas à liofilização, permitindo distinguir, se eventuais efeitos observados eram decorrentes da redução do teor de água ou do próprio processo de liofilização.

2.5.1 Pré-umedecimento das sementes

Antes da avaliação fisiológica, as sementes liofilizadas foram submetidas a um pré-umedecimento, segundo testes anteriores, para evitar danos de embebição, tendo em vista o baixo teor de água das sementes após a liofilização. Para isso, as sementes foram distribuídas em camada única sobre telas metálicas de caixas acrílicas, do tipo gerbox, contendo ± 40 mL de água destilada em seu interior e abaixo das telas. Os gerbox foram mantidos em câmaras de germinação do tipo B.O.D., em temperatura constante de 25 °C. O ganho de água foi monitorado por pesagens contínuas, em balança de precisão (0,001 g), até que as sementes atingissem a umidade de $\pm 12\%$ (bu). As análises fisiológicas foram realizadas conforme descrito no item 2.4.1.

2.5.2 Análise Estatística

Foi realizado o teste de normalidade e de homogeneidade das variâncias por meio do teste Shapiro-Wilk, e, quando necessário, os dados foram transformados em porcentagem de raiz quadrada de arco seno. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knot, considerando $p < 0,05$. A análise dos dados foi realizada com o software estatístico R, versão 4.2.3 (R CORE TEAM, 2023).

2.6 Declaração de uso de IA

Ferramentas de Inteligência Artificial (ChatGPT e Perplexity AI) foram utilizadas durante a elaboração deste trabalho com finalidade de revisão de ortografia e gramática, bem como melhora de fluidez do texto. A responsabilidade integral pelo conteúdo, pela veracidade e pela originalidade dos dados gerados cabe exclusivamente aos autores.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Experimento 1

Com base nos resultados obtidos, a qualidade fisiológica das sementes de *C. arabica* L. foi influenciada pelo método de secagem e pelo teor de água final nas variáveis protrusão radicular, formação de plântulas normais e condutividade elétrica (Apêndices A e B). Para a viabilidade, entretanto, não foram observados efeitos significativos dos fatores isolados e da interação destes fatores.

Na Tabela 1 são apresentados os resultados de protrusão radicular de sementes secadas em sílica gel ou em peneiras até diferentes teores de água. Houve diferença entre os métodos apenas nos teores de água de 15% e 5%. Na umidade de 15%, as sementes secadas em peneira apresentaram maior protrusão radicular (96%), enquanto a secagem em sílica resultou em redução dessa variável (84%).

Tabela 1. Porcentagem de protrusão radicular de sementes de *Coffea arabica* L. secadas em sílica gel ou em peneira, até diferentes umidades.

Secagem	Umidades finais (% bu)						
	35	30	25	20	15	12	5
Peneira	94 aA	93 aA	90 aA	86 aB	96 aA	90 aA	79 aB*
Sílica	89 aA	91 aA	93 aA	92 aA	84 bA*	93 aA	8 bB*
Controle 47% de umidade	97*						

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e letra maiúscula na linha, agrupam entre si pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade. (*) Diferem do tratamento adicional 47% no teste de *Dunnet*, ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: elaboração própria.

Nos demais teores de água, compreendidos entre 35% e 20%, bem como a umidade de 12%, os percentuais permaneceram elevados variando de 86% a 94%, sem diferenças significativas entre os métodos de secagem. Esses resultados podem estar relacionados à menor intensidade do estresse imposto pela dessecação nesses tratamentos. Como o café produz sementes de comportamento intermediário, elas não possuem os mesmos mecanismos de proteção à dessecação encontrados em sementes ortodoxas, necessitando de determinado nível de hidratação para manter a funcionalidade de enzimas e estruturas celulares essenciais à retomada do crescimento embrionário (Brandão Júnior *et al.*, 2002; Marcos Filho, 2016).

A redução mais acentuada foi observada no teor de água de 5%, especialmente nas sementes secadas em sílica gel, as quais apresentaram apenas 8% de protrusão radicular. Esse resultado pode estar relacionado à rápida remoção de água promovida pela sílica, que possivelmente intensificou o estresse celular em baixos teores de água, comprometendo processos metabólicos e mecanismos de reparação necessários à manutenção da viabilidade das sementes (Coelho *et al.*, 2015). Rosa *et al.* (2005) destacam que, a secagem afeta negativamente a germinação independentemente da velocidade empregada, embora, os maiores prejuízos ocorram sob secagem rápida. Nesse sentido, Santos, Von Pinho e Rosa, (2013), Abreu *et al.* (2014) e Figueiredo (2016), relatam que a maior tolerância das sementes de café à dessecação pode estar associada à secagem lenta, uma vez que o maior tempo de exposição permite a indução e a atuação de mecanismos de proteção celular capazes de minimizar os danos causados pela perda de água, como observado no tratamento secado a 5% em peneira que obteve porcentagem de 79% de protrusão. A elevada protrusão radicular observada no tratamento adicional (97%) está associada a maior umidade das sementes, condição frequentemente relacionada ao alto vigor fisiológico em sementes recém-colhidas (Carvalho e Nakagawa, 2012).

Os resultados da Tabela 2, corroboram parcialmente aqueles observados para protrusão radicular. As sementes mantiveram elevado potencial germinativo até 12% de umidade, com valores superiores a 85% em ambos os métodos de secagem.

Tabela 2. Porcentagem de plântulas normais de sementes de *Coffea arabica* L. secadas em sílica gel ou em peneira, até diferentes umidades.

Secagem	Umidades finais (% bu)						
	35	30	25	20	15	12	5
Peneira	95 aA	95 aA	97 aA	90 bB	89 aB	85 bB*	*6 aC
Sílica	96 aA	92 aA	92 aA	97 aA	90 aA	93 aA	*0 aB
Controle 47% de umidade	97*						

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e letra maiúscula na linha, agrupam entre si pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade. (*) Diferem do tratamento adicional 47% no teste *t* de Student, ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: elaboração própria.

Entre 35% e 15% de umidade, os dois métodos de secagem proporcionaram desempenhos fisiológicos semelhantes, avaliado pela porcentagem de plântulas normais aos 30 dias no teste de germinação, com percentuais variando de 89% a 97%, sem diferenças significativas entre os tratamentos. Diferenças mais expressivas foram observadas nos menores

teores de água. Em 20% e 12% de umidade, as sementes secadas em sílica gel apresentaram maior porcentagem de plântulas normais (97% e 93%) em relação às secadas em peneira (90% e 85%). No teor de água de 5%, ambos os métodos promoveram drástica redução na formação de plântulas normais (Tabela 2), sendo o efeito mais severo na secagem em sílica gel, que resultou em ausência total de plântulas. Nas sementes secadas em peneira, apesar de 79% terem emitido radícula (Tabela 1), apenas 6% originaram plântulas normais, indicando que a secagem lenta favoreceu a ativação de mecanismos de proteção e reparação celular, mas não foi suficiente para minimizar os danos decorrentes da redução extrema do teor de água, permitindo o início da germinação, mas comprometendo o desenvolvimento normal das plântulas (Figueiredo, 2016).

Para a variável viabilidade, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos. Mesmo nos tratamentos com o teor de água de 5%, a viabilidade média foi de 95% para as sementes secadas em peneiras e 90% para as sementes secadas em sílica gel, indicando que a redução do teor de água não comprometeu significativamente a capacidade de sobrevivência dos embriões que mantiveram elevada viabilidade. Entretanto, esse resultado difere daqueles obtidos no teste de germinação, sugerindo que, embora os embriões permanecessem viáveis, houve comprometimento da capacidade de originar plântulas normais. Resultados semelhantes foram relatados por Coelho *et al.* (2015), que observaram baixo desempenho no teste de germinação associado à elevada viabilidade pelo teste de tetrazólio em sementes secadas até esse teor de água. Carvalho *et al.* (2023) também verificaram comportamento semelhante, com germinação praticamente nula e mais de 70% de embriões viáveis após a secagem. Embora Ellis *et al.* (1991) indiquem que o teor de água considerado letal para a sobrevivência das sementes de café encontra-se na faixa de 4 a 5% de umidade, a elevada viabilidade observada neste estudo sugere maior tolerância do embrião à dessecação em comparação aos tecidos do endosperma. Segundo Marcos Filho (2016), a tolerância à secagem não é uniforme entre os tecidos da semente, sendo o eixo embrionário geralmente mais resistente que a semente como um todo. Dessa forma, os resultados reforçam a hipótese de que os danos provocados pela secagem ocorreram predominantemente no endosperma, comprometendo a germinação e o desenvolvimento das plântulas sem necessariamente afetar a viabilidade dos embriões.

O teste de condutividade elétrica estima o grau de deterioração das sementes por meio da quantificação dos solutos e íons lixiviados durante a embebição (Krzyzanowski *et al.*, 2023). Em sementes de café, a secagem tende a aumentar a perda de eletrólitos, independentemente do método empregado e do teor de água final (Figueiredo, 2016). Esse comportamento é

evidenciado pelos resultados apresentados na Tabela 3, especialmente pelo menor valor observado no tratamento adicional ($12,095 \mu\text{S.cm}^{-1}.\text{g}^{-1}$), estatisticamente inferior à maioria dos tratamentos submetidos à secagem, com exceção das sementes secadas em sílica gel até 35%, evidenciando que sementes mais úmidas possuem melhor organização estrutural dos sistemas de membranas (Krzyzanowski *et al.*, 2023).

Tabela 3. Condutividade elétrica ($\mu\text{S.cm}^{-1}.\text{g}^{-1}$) de sementes de *Coffea arabica* L. secadas em sílica gel e em peneira até diferentes umidades.

Secagem	Umidades finais (% bu)						
	35	30	25	20	15	12	5
Peneira	18,897 aA*	17,332 aA*	21,290 aA*	19,134 aA*	18,919 aA*	21,271 aA*	33,556 aB*
Sílica	16,213 aA	18,220 aA*	18,981 aA*	21,294 aB*	24,533 bB*	22,366 aB*	62,198 bC*
Controle 47% de umidade	12,095*						

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e letra maiúscula na linha, agrupam entre si pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade. (*) Diferem do tratamento adicional 47% no teste de *Dunnet*, ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: elaboração própria.

Entre os tratamentos submetidos à secagem, não houve diferenças entre os métodos nos teores de água entre 35% e 20%, bem como em 12%. Diferenças significativas foram observadas apenas em 15% e 5% de umidade, situações em que as sementes secadas em sílica gel apresentaram maiores valores de condutividade elétrica. O efeito foi mais pronunciado em 5% de umidade, com valores de $62,198 \mu\text{S.cm}^{-1}.\text{g}^{-1}$ na secagem em sílica gel e $33,556 \mu\text{S.cm}^{-1}.\text{g}^{-1}$ para a secagem em peneira.

Ao analisar cada método separadamente, observa-se que, na secagem em peneira, os valores permaneceram estatisticamente semelhantes entre 35% e 12% de umidade, aumentando apenas em 5%. Já na secagem em sílica gel, os menores valores ocorreram em sementes com 35% e 25% de umidade, com aumento progressivo à medida que o teor de água foi reduzido, atingindo o máximo em 5%. Resultados semelhantes foram relatados por Segato e Cintra (2021), que observaram aumento da condutividade elétrica após a secagem de sementes de *C. arabica*, especialmente nos tratamentos com menor teor de água. Segundo Marcos Filho (2016), a dessecação excessiva em sementes de espécies sensíveis promove alterações estruturais que aumentam a permeabilidade celular e favorecem a lixiviação de eletrólitos durante a embebição. Da mesma forma, Costa (2003) e Alixandre (2024), observaram que maiores valores de condutividade elétrica estão relacionados à redução da germinação, confirmando a relação

inversa entre lixiviação de solutos e qualidade fisiológica das sementes. Esses autores, juntamente com Krzyzanowski *et al.*, (2023), reforçam que sementes mais vigorosas restabelecem mais rapidamente sua organização celular durante a embebição, reduzindo a perda de eletrólitos para o meio.

3.2 Experimento 2

Na sequência são apresentados os resultados do segundo experimento (Apêndice C). Ressalta-se que as sementes não liofilizadas apresentaram desempenho superior em todas as variáveis avaliadas, independentemente do método de secagem.

3.2.1 Teste de germinação

Na Tabela 4, são apresentados os resultados de protrusão radicular de sementes pré-secadas em sílica gel, antes e após a liofilização. Após o processo, foi observado redução da protrusão radicular em todos os tratamentos, com intensidade variando em função da umidade inicial das sementes.

Tabela 4. Porcentagem de protrusão radicular, antes e após a liofilização, de sementes de *Coffea arabica* L. pré-secadas em sílica gel até diferentes umidades.

Liofilização	Umidades iniciais (%)					
	35	30	25	20	15	12
Antes	89 aA*	91 aA*	93 aA*	92 aA*	84 aA*	93 aA*
Depois	4 bC●	2 bC●	50 bB*●	53 bB*●	71 bA*●	78 bA*
Adicional 12% de umidade sem liofilização				●90		
Adicional 5% de umidade sem liofilização				*8		

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e letra maiúscula na linha, agrupam entre si pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade. (●) Diferem do tratamento adicional 12% sem liofilização no teste de *Dunnet*, ao nível de 5% de probabilidade. (*) Diferem do tratamento adicional 5% sem liofilização no teste de *Dunnet*, ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: elaboração própria.

Os melhores resultados foram observados nos tratamentos com 15% e 12% de umidade, os quais mantiveram 71% e 78% de protrusão radicular, respectivamente, representando as menores reduções em relação aos valores observados antes da liofilização. Esse comportamento

pode estar relacionado ao equilíbrio hídrico proporcionado por esses teores de água. A pré-secagem reduziu a quantidade de água livre passível de cristalização, minimizando os danos causados pelo congelamento durante a liofilização, mas ainda preservou água estrutural suficiente para manter parcialmente a organização das membranas e proteínas celulares. Em sementes intermediárias, como as de café, esse equilíbrio é fundamental, pois tanto o excesso quanto a deficiência de água podem comprometer a qualidade fisiológica (Figueiredo, 2016).

As sementes com 25% e 20% de umidade também mantiveram percentuais expressivos de protrusão radicular após a liofilização (50% e 53%, respectivamente), enquanto os tratamentos com 35% e 30% apresentaram os menores valores, com apenas 4% e 2%. Os tratamentos adicionais sem liofilização reforçam a influência do teor de água sobre a qualidade das sementes. Enquanto aquelas mantidas com 12% de umidade sem liofilização apresentaram 90% de protrusão, as secadas até 5% registraram apenas 8%, evidenciando que a dessecação excessiva foi severamente prejudicial, mesmo sem a liofilização.

Os resultados evidenciam redução drástica na formação de plântulas normais em todos os tratamentos após a liofilização (Tabela 5). Segundo Bewley *et al.* (2013), sementes deterioradas podem manter a capacidade de iniciar a germinação, mas apresentar limitações fisiológicas que comprometem o desenvolvimento subsequente da plântula. Esse comportamento foi observado no presente estudo, visto que diversos tratamentos apresentaram elevada protrusão radicular (Tabela 4), porém baixa ou nenhuma formação de plântulas normais.

Tabela 5. Porcentagem de plântulas normais, antes e após a liofilização, de sementes de *Coffea arabica* L. pré-secadas em sílica gel até diferentes umidades.

Liofilização	Umidades iniciais (%)					
	35	30	25	20	15	12
Antes	96 aA*	92 aA*	92 aA*	97 aA*	90 aA*	93 aA*
Depois	0 bB●	0 bB●	10 bA*●	5 bA●	2 bB●	7 bA●
Adicional 12% de umidade sem liofilização			●87			
Adicional 5% de umidade sem liofilização			*0			

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e letra maiúscula na linha, agrupam entre si pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade. (●) Diferem do tratamento adicional 12% sem liofilização no teste de *Dunnet*, ao nível de 5% de probabilidade. (*) Diferem do tratamento adicional 5% sem liofilização no teste de *Dunnet*, ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: elaboração própria.

Os maiores percentuais de plântulas normais após a liofilização, foram observados nas sementes com 25%, 20% e 12% de umidade inicial, os quais atingiram 10%, 5% e 7% de plântulas, respectivamente. Apesar de superiores aos demais tratamentos, esses valores permaneceram muito abaixo dos observados antes da liofilização e, também, no tratamento adicional de sementes com 12% de umidade não liofilizadas. Porém, foram maiores que a umidade de 5% não liofilizada, onde não foram observadas plântulas normais. Assim como as sementes com 35% e 30% de umidade. Quando comparados aos resultados de protrusão radicular (Tabela 4), observa-se que a emissão da radícula não foi acompanhada pelo desenvolvimento normal das plântulas. As sementes com 15% e 12% de umidade, por exemplo, atingiram 71% e 78% de protrusão radicular após a liofilização, mas originaram apenas 2% e 7% de plântulas normais. Da mesma forma, os tratamentos com 25% e 20% de umidade registraram 50% e 53% de protrusão radicular, porém apenas 10% e 5% de plântulas normais, respectivamente. O tratamento adicional composto por sementes não liofilizadas com 5% de umidade, apresentou ausência de plântulas normais e apenas 8% de protrusão, evidenciando que a dessecação excessiva foi severamente prejudicial às sementes. Nesse nível de secagem, pode estar ocorrendo a remoção de água fortemente ligada aos constituintes celulares, comprometendo processos metabólicos essenciais e reduzindo drasticamente a sobrevivência das sementes (Oliveira, Rosa e Carvalho, 2021).

A Tabela 6 apresenta os resultados de protrusão radicular de sementes pré-secadas em peneiras. Após a liofilização, os melhores resultados foram observados nas sementes com 20% e 15% de umidade, que atingiram 63% e 55% de protrusão radicular.

Tabela 6. Porcentagem de protrusão radicular, antes e após a liofilização, de sementes de *Coffea arabica* L. pré-secadas em peneiras até diferentes umidades.

Liofilização	Umidades iniciais (%)					
	35	30	25	20	15	12
Antes	94 aA	93 aA	90 aA	86 aA	96 aA*	90 aA
Depois	0 bC*●	6 bC*●	45 bB*●	63 bA*●	55 bA*●	46 bB*●
Adicional 12% de umidade sem liofilização				●94		
Adicional 5% de umidade sem liofilização				*79		

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e letra maiúscula na linha, agrupam entre si pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade. (●) Diferem do tratamento adicional 12% sem liofilização no teste de *Dunnet*, ao nível de 5% de probabilidade. (*) Diferem do tratamento adicional 5% sem liofilização no teste de *Dunnet*, ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: elaboração própria.

Os piores resultados também foram observados nas sementes com 35% e 30% de umidade inicial, com 0% e 6%, como ocorreu para as sementes pré-secadas em sílica gel. As sementes com 25% e 12% de umidade, apresentaram desempenho intermediário, com 45% e 46% de protrusão radicular. Diferentemente do observado para a pré-secagem em sílica gel, em que o teor de 12% proporcionou o melhor resultado após a liofilização, com 78% de protrusão radicular (Tabela 4), as sementes secadas em peneiras e submetidas ao mesmo teor de água sofreram redução de 32%. Esses resultados indicam que a resposta à liofilização foi influenciada não apenas pela umidade final, mas também pelo método de pré-secagem empregado. A secagem em sílica gel promove remoção mais rápida e uniforme da água, enquanto a secagem em peneiras ocorre de forma mais gradual. Em sementes de café, que apresentam comportamento intermediário, a permanência prolongada em faixas críticas de umidade pode favorecer a ocorrência de danos fisiológicos, reduzindo a capacidade de tolerar os estresses decorrentes do congelamento e da sublimação durante a liofilização (Walters *et al.*, 2001). Os resultados dos tratamentos adicionais reforçam essa interpretação, uma vez que as sementes não liofilizadas mantiveram elevados percentuais de protrusão radicular, atingindo 94% e 79% nas umidades de 12% e 5%, respectivamente.

Embora as sementes tenham apresentado protrusão radicular após a liofilização, a formação de plântulas normais foi significativamente reduzida, para todos os tratamentos (Tabela 7).

Tabela 7. Porcentagem de plântulas normais, antes e após a liofilização, de sementes de *Coffea arabica* L. pré-secadas em peneiras até diferentes umidades.

Liofilização	Umidades iniciais (%)					
	35	30	25	20	15	12
Antes	95 aA*	95 aA*	97 aA*●	90 aB*	89 aB*	85 aB*
Depois	0 bA●	0 bA●	2 bA●	4 bA●	2 bA●	0 bA●
Adicional 12% de umidade sem liofilização			●88			
Adicional 5% de umidade sem liofilização			*6			

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e letra maiúscula na linha, agrupam entre si pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade. (●) Diferem do tratamento adicional 12% sem liofilização no teste de *Dunnet*, ao nível de 5% de probabilidade. (*) Diferem do tratamento adicional 5% sem liofilização no teste de *Dunnet*, ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: elaboração própria.

O maior percentual foi observado nas sementes com 20% de umidade, de 4%, embora sem diferença estatística em relação aos demais tratamentos. Ainda assim, esse valor foi severamente reduzido, comparado aos 90% registrados antes do processo. Nos tratamentos com 35% e 30% de umidade, não houve formação de plântulas normais, reforçando que teores elevados de água aumentam a susceptibilidade aos danos provocados pelo congelamento, em razão da formação de cristais de gelo nos tecidos, durante a liofilização (Benson, 2008; Figueiredo, 2016). Por outro lado, a ausência de plântulas normais nas sementes com 12% de umidade sugere que a dessecação excessiva também comprometeu severamente a recuperação fisiológica após a reidratação.

As diferenças entre os métodos de secagem indicam que a resposta à liofilização foi influenciada não apenas pelo teor de água final, mas também pela dinâmica de remoção da água. A secagem em sílica gel, por ocorrer de forma mais rápida e uniforme, possibilitou melhor desempenho das sementes com 15% e 12% de umidade se comparado a secagem em peneiras, provavelmente por reduzir a quantidade de água livre disponível para congelamento durante a liofilização, sem prolongar a exposição ao estresse de desidratação. Em contrapartida, a secagem em peneiras pode ter favorecido o acúmulo de danos fisiológicos durante a dessecação, resultando em menor tolerância à liofilização nos menores teores de água. Dessa forma, as sementes com 20% e 15% de umidade apresentaram o melhor equilíbrio entre os efeitos da dessecação e do congelamento, proporcionando os maiores percentuais de plântulas normais após o processo (Brandão Junior *et al.*, 2002; Dussert *et al.*, 2012; Huang *et al.*, 2014). A baixa ocorrência de plântulas normais observada em ambos os métodos pode estar associada aos danos causados pelo congelamento durante a liofilização. De modo geral, produtos destinados à liofilização passam previamente por uma etapa de pré-congelamento, no caso das sementes de café, entretanto, tal procedimento poderia resultar em morte precoce. Conforme discutido por El-Bachá e Kim (2014), o congelamento lento, favorece a formação de cristais de gelo irregulares e poros de maiores dimensões, os quais, apesar de facilitarem a remoção de vapor d'água, também comprometem a estrutura dos tecidos. Os resultados dos tratamentos adicionais reforçam essa interpretação, uma vez que as sementes não liofilizadas com 12% de umidade exibiram 88% de plântulas normais, enquanto que aquelas secadas até 5% atingiram apenas 6%, indicando ser compatível com a faixa crítica de umidade considerada letal para sementes de café (Ellis *et al.*, 1991).

3.2.2 Viabilidade das sementes no teste de tetrazólio

Conforme apresentado na Tabela 8, as sementes pré secadas em sílica gel mantiveram alta viabilidade de embriões após a liofilização, embora com respostas distintas em função do teor de água inicial. Os tratamentos com 20% e 15% de umidade conservaram 100% de viabilidade, não diferindo dos valores observados antes da liofilização. As sementes com 30%, 25% e 12% de umidade apresentaram valores intermediários, mas ainda altos, de 85%, 87% e 92%, respectivamente. Em contrapartida, o tratamento com 35% de umidade registrou a maior redução, atingindo 62% de viabilidade e diferindo estatisticamente dos demais tratamentos e adicionais.

Tabela 8. Porcentagem de viabilidade, antes e após liofilização, das sementes de *Coffea arabica* L. pré-secadas em sílica gel até diferentes umidades.

Liofilização	Umidades iniciais (%)					
	35	30	25	20	15	12
Antes	97 aA	92 aA	95 aA	95 aA	92 aA	100 aA
Depois	62 bC*●	85 aB●	87 aB	100 aA	100 aA	92 aB
Adicional 12% de umidade sem liofilização			●95			
Adicional 5% de umidade sem liofilização			*90			

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e letra maiúscula na linha, agrupam entre si pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade. (●) Diferem do tratamento adicional 12% sem liofilização no teste de *Dunnet*, ao nível de 5% de probabilidade. (*) Diferem do tratamento adicional 5% sem liofilização no teste de *Dunnet*, ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: elaboração própria.

A análise conjunta dos resultados de protrusão radicular e de formação de plântulas normais (Tabelas 4 e 6), evidencia que os melhores resultados de viabilidade estão associados aos maiores valores de protrusão radicular, mas não necessariamente aos maiores percentuais de plântulas normais. As sementes com 15% e 12% de umidade, por exemplo, apresentaram elevada porcentagem de viabilidade e de protrusão radicular (71% e 78%), mas a formação de plântulas normais permaneceu baixa, com apenas 2% e 7%. Comportamento semelhante foi observado nos tratamentos com 25% e 20% de umidade, que mantiveram elevada viabilidade e valores intermediários de protrusão radicular, porém originaram apenas 10% e 5% de plântulas normais, respectivamente. Por outro lado, os tratamentos com 35% e 30% de umidade

apresentaram redução simultânea da viabilidade, da protrusão radicular e da formação de plântulas normais após a liofilização.

Mesmo diante da expressiva redução da germinação e do desenvolvimento de plântulas em sementes pré-secadas em peneiras, uma alta porcentagem de embriões permaneceu viável, especialmente nos tratamentos em que as sementes foram pré-secadas a menores teores de água (Tabela 9).

Tabela 9. Porcentagem de viabilidade antes e após liofilização, das sementes de *Coffea arabica* L. pré-secadas em peneiras até diferentes umidades.

Liofilização	Umidades iniciais (%)					
	35	30	25	20	15	12
Antes	95 aA	95 aA	90 aA●	95 aA	97 aA	95 aA
Depois	57 bC*●	90 aB●	92 aB	97 aA	100 aA	100 aA
Adicional 12% de umidade sem liofilização			●100			
Adicional 5% de umidade sem liofilização			*95			

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e letra maiúscula na linha, agrupam entre si pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade. (●) Diferem do tratamento adicional 12% sem liofilização no teste de *Dunnet*, ao nível de 5% de probabilidade. (*) Diferem do tratamento adicional 5% sem liofilização no teste de *Dunnet*, ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: elaboração própria.

Após a liofilização, o tratamento com 35% de umidade inicial apresentou comportamento distinto dos demais, com redução da viabilidade para 57%, associada à ausência de protrusão radicular e de plântulas normais. Nesse caso, o elevado teor de água provavelmente favoreceu a formação de cristais de gelo durante o congelamento, causando danos severos às células embrionárias. Em contraste, as sementes com 20%, 15% e 12% de umidade mantiveram os maiores percentuais de viabilidade, com 97%, 100% e 100%, respectivamente. Os tratamentos com 30% e 25% de umidade também conservaram elevada viabilidade, sem diferirem estatisticamente dos valores observados antes da liofilização, com 90% e 92%.

A comparação com os resultados de protrusão radicular e de formação de plântulas normais evidencia que a manutenção da viabilidade não foi acompanhada pela recuperação plena da capacidade germinativa. As sementes com 20%, 15% e 12% de umidade apresentaram viabilidade próxima de 100%, porém originaram apenas 63%, 55% e 46% de protrusão radicular e baixos percentuais de plântulas normais após a liofilização. Assim como observado na pesquisa de Figueiredo (2016), a secagem rápida em sílica gel resultou em melhor

desempenho fisiológico após a liofilização, enquanto a secagem lenta em peneiras proporcionou maiores percentuais de viabilidade no teste de tetrazólio. Essa discrepância sugere que a liofilização provocou danos insuficientes para causar a morte dos embriões, mas capazes de comprometer o desenvolvimento normal das sementes após a embebição. Esses resultados corroboram os achados de Coelho *et al.* (2015) e Dussert *et al.* (2006), que observaram maior sensibilidade do endosperma à secagem e ao congelamento em comparação aos embriões de sementes de café. Assim, a elevada viabilidade observada, associada à redução da protrusão radicular e da formação de plântulas normais, indica que os principais danos decorrentes da secagem e da liofilização ocorreram no endosperma e em estruturas relacionadas ao processo germinativo, e não necessariamente nos embriões, que permaneceram viáveis mesmo após os processos.

3.2.3 Condutividade elétrica

De acordo com os resultados de condutividade elétrica das sementes pré-secadas em sílica gel (Tabela 10), após o processo de liofilização houve aumento significativo da condutividade das sementes em relação aos tratamentos não liofilizados.

Tabela 10. Condutividade elétrica ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$), antes e após liofilização, das sementes de *Coffea arabica* L. pré-secadas em sílica gel até diferentes umidades.

Liofilização	Umidades iniciais (%)					
	35	30	25	20	15	12
Antes	16,215 aA*	18,220 aA*	18,982 aA*	21,292 aA*	24,532 aA*	22,365 aA*
Depois	65,158 bC●	48,807 bB*●	31,155 bA*	33,760 bA*	34,252 bA*	34,365 bA*
Adicional 12% de umidade sem liofilização	●26,605					
Adicional 5% de umidade sem liofilização	*62,197					

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e letra maiúscula na linha, agrupam entre si pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade. (●) Diferem do tratamento adicional 12% sem liofilização no teste *t* de Student, ao nível de 5% de probabilidade. (*) Diferem do tratamento adicional 5% sem liofilização no teste *t* de Student, ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: elaboração própria.

Os maiores valores foram observados nas sementes com 35% e 30% de umidade inicial, as quais atingiram $65,158 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ e $48,807 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ após a liofilização, diferindo também do tratamento adicional com 12% de umidade. Esses resultados coincidem com o baixo

desempenho fisiológico observado nesses tratamentos, caracterizado por reduzida protrusão radicular, ausência de plântulas normais e menor viabilidade dos embriões. Em contrapartida, o tratamento com 25% de umidade apresentou o menor valor de condutividade entre os tratamentos liofilizados, embora sem diferir estatisticamente das sementes com 20%, 15% e 12%. O tratamento adicional de 5% sem liofilização apresentou 62,197 $\mu\text{S.cm}^{-1}.\text{g}^{-1}$, valor muito elevado e próximo ao observado nas sementes liofilizadas com 35%.

Os resultados de condutividade elétrica para sementes pré-secadas em peneira indicam o aumento da lixiviação de solutos após a liofilização em todos os tratamentos (Tabela 11). Antes da liofilização, os valores variaram entre 17,330 e 21,290 $\mu\text{S.cm}^{-1}.\text{g}^{-1}$, enquanto após o processo, oscilaram de 33,830 a 74,805 $\mu\text{S.cm}^{-1}.\text{g}^{-1}$, superando inclusive o adicional com 5% de umidade sem liofilização. As sementes com umidade inicial de 35% e 30% apresentaram os maiores valores de condutividade, associados aos menores percentuais de protrusão radicular e ausência total ou quase total de plântulas normais.

Tabela 11. Condutividade elétrica ($\mu\text{S.cm}^{-1}.\text{g}^{-1}$), antes e após liofilização, das sementes de *Coffea arabica* L. pré-secadas em peneiras até diferentes umidades.

Liofilização	Umidades iniciais (%)					
	35	30	25	20	15	12
Antes	18,900 aA*	17,330 aA*	21,290 aA*	19,135 aA*	18,917 aA*	21,270 aA*
Depois	74,805 bC*●	46,897 bB*●	44,170 bB*●	35,400 bA●	33,830 bA●	40,297 bB●
Adicional 12% de umidade sem liofilização	●19,922					
Adicional 5% de umidade sem liofilização	*33,555					

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e letra maiúscula na linha, agrupam entre si pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade. (●) Diferem do tratamento adicional 12% sem liofilização no teste *t* de Student, ao nível de 5% de probabilidade. (*) Diferem do tratamento adicional 5% sem liofilização no teste *t* de Student, ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: elaboração própria.

Por outro lado, as sementes com 20% e 15% de umidade apresentaram os menores valores de condutividade e os maiores percentuais de protrusão radicular e plântulas normais. As sementes com 12% de umidade exibiram comportamento distinto, embora tenham mantido 100% de viabilidade embrionária após a liofilização, expressaram condutividade relativamente mais elevada (40,297 $\mu\text{S.cm}^{-1}.\text{g}^{-1}$), baixa protrusão radicular e ausência de plântulas normais. O teste de tetrazólio avalia a viabilidade evidenciada pela atividade metabólica dos tecidos embrionários, mas não a capacidade da semente para formar uma plântula normal (França-Neto

e Krzyzanowski, 2019). Assim, o embrião pode permanecer viável, enquanto outros tecidos essenciais ao processo germinativo são comprometidos.

De modo geral, o aumento da condutividade elétrica constitui forte indicativo de dano ou alteração estrutural nos sistemas de membranas celulares. Segundo Marcos Filho (2016), valores elevados de condutividade elétrica refletem maior lixiviação de eletrólitos durante a embebição, indicando desorganização das membranas e redução do vigor fisiológico. Dessa maneira, embora os resultados do teste de tetrazólio tenham demonstrado elevada viabilidade embrionária na maioria dos tratamentos, os resultados de condutividade sugerem a ocorrência de danos estruturais e fisiológicos que comprometeram a reorganização das membranas durante a reidratação. Como consequência, parte das sementes permaneceu viável, mas apresentou redução da protrusão radicular e, principalmente, da formação de plântulas normais, evidenciando que a sobrevivência dos embriões nas sementes liofilizadas não está associada à capacidade germinativa e ao desenvolvimento normal das plântulas após a liofilização.

Para todas as variáveis avaliadas, o pior desempenho fisiológico foi observado nas sementes com 35% e 30% de umidade inicial, indicando que sementes com elevado teor de água não suportam a etapa de congelamento durante o processo de liofilização. Nessas condições, grande parte da água corresponde à água livre nos espaços intracelular e extracelular, favorecendo o processo de nucleação e o crescimento de cristais de gelo. A formação desses cristais provoca ruptura física de membranas, desorganização de organelas e perda da compartimentalização celular. Além dos danos mecânicos, o congelamento de tecidos altamente hidratados altera a estrutura das membranas fosfolipídicas, reduzindo sua estabilidade durante o descongelamento e dificultando a retomada do metabolismo germinativo. Isso explica a perda quase total da protrusão radicular, acompanhada pela ausência de plântulas normais, a diminuição da viabilidade e o aumento da condutividade elétrica nas sementes desses tratamentos (El-Bachá e Kim, 2014; Wesley-Smith *et al.*, 2014; Juckers *et al.*, 2023). A análise conjunta dos resultados indica que sementes com teores de água entre 12% e 20% apresentaram maior tolerância à liofilização, mantendo elevada viabilidade e os maiores percentuais de protrusão radicular após o processo. Por sua vez, o teor de 25% apresentou comportamento intermediário e relativamente uniforme entre os métodos, porém com desempenho fisiológico inferior ao observado para 12% e 20% de umidade.

4 CONCLUSÃO

A redução da umidade de sementes de *Coffea arabica* L. para 5% bu provoca perda acentuada de plântulas normais, embora os embriões sejam preservados nesta umidade.

Sementes de *Coffea arabica* L. pré-secadas e submetidas à liofilização têm protrusão radicular e plântulas normais reduzidas, porém quando pré-secadas entre 12 e 15% de umidade e liofilizadas, a protrusão radicular é superior a 70%.

Sementes de *Coffea arabica* L. pré-secadas entre 12 e 20% de umidade, mantém viabilidade próxima de 100%.

Sementes de *Coffea arabica* L. com umidades de 30 e 35% não suportam o processo de liofilização.

REFERÊNCIAS

- ABREU, L. A. S. *et al.* Behavior of coffee seeds to desiccation tolerance and storage. **Journal of Seed Science**, v.36, n.4, p.399-406, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/2317-1545v36n41008>
- ALIXANDRE, R. D. *et al.* Physiological quality of seeds of arabic coffee cultivars stored for a period of two years. **Brazilian Journal of Biology**, v. 84, p. e285879, 2024. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.285879>
- BENSON, E. E. Cryopreservation of phytodiversity: a critical appraisal of theory and practice. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 27, n. 3, p. 141–219, 2008.
- BEWLEY, J.D.; BRADFORD, K.J.; HILHORST, H.W.M.; NONOGAKI, H. Seeds: physiology of development, germination and dormancy. **New York: Springer**, 408p., 2013.
- BRANDÃO JUNIOR, D. S.; VIEIRA, M. G. G. C.; GUIMARÃES, R. M.; HILHORST, H. W. M. Tolerância à dessecação de sementes de cafeeiro (*Coffea arabica* L.). **Revista Brasileira de Sementes**, v. 24, n. 2, p.17-23, 2002.
- BRASIL, Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA). **Regras para Análise de Sementes (RAS)**. Brasília - DF: MAPA, 2025.
- CARVALHO, M. H. DE. **Aspectos fisiológicos e moleculares de sementes de *Coffea arabica* submetidas à secagem**. 2017. 74 p. Tese (Doutorado em Biotecnologia Vegetal), Escola de Ciências Agrárias - Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG, 2017.
- CARVALHO, M. H. DE *et al.* Drying of arabica coffee and its effect on the gene expression and activity of enzymes linked to seed physiological quality. **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 45, p. 1–12, 20 set. 2023.
- CARVALHO, N. M. DE; NAKAGAWA J. Sementes: ciência, tecnologia e produção. 5. Ed., Jaboticabal: **FUNEP**, 2012, 590 p.
- CLEMENTE, A. C. S. *et al.* Preparo das sementes de café para a avaliação da viabilidade pelo teste de tetrazólio. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v. 33, n.1, p. 38-44, 2011.
- COELHO, S. V. B. *et al.* Alterações fisiológicas e bioquímicas em sementes de café secas em sílica gel e soluções salinas saturadas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 6, p. 483–491, jun. 2015.
- COELHO, S. V. B. *et al.* Ultrastructural damage in coffee seeds exposed to drying and to subzero (°C) temperatures. **Coffee Science**, v. 15, n. 1, p. 1–6, 2020.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de café. Safra 2024, segundo levantamento**. v. 12, n. 2, 56 p., mai. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-cafe/2o-levantamento-de-cafe-safra-2025/2o-levantamento-de-cafe-safra-2025>. Acesso em: 12 ago. 2026.

COSTA, P. S. C. **Teste de condutividade elétrica para avaliação da qualidade fisiológica de sementes de café (*Coffea arabica* L.)**. 2003. 93 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia), Escola de Ciências Agrárias – Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG, 2003.

DUSSERT, S. *et al.* Oxidative stress, phospholipid loss and lipid hydrolysis during drying and storage of intermediate seeds. **Physiologia Plantarum**. Copenhagen, v. 127, n. 4, p. 192-204, apr. 2006.

DUSSERT, S. *et al.* Biologie de la conservation des semences de caféiers: Aspects fondamentaux et conséquences pratiques. Une revue. **Cahiers Agricultures**, v. 21, n. 2–3, p. 106–114, 2012.

EL-BACHÁ, A.; KIM, R. **Estudo do processo de secagem da polpa de açaí por liofilização e atomização**. 2014. 63 p. Trabalho de Conclusão de Curso II, Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 18 ago. 2014.

ELLIS, R. H. The longevity of seeds. **HortScience**, v. 26, n. 9, set. 1991.

FRANÇA-NETO, J. B.; KRZYZANOWSKI, F. C. Tetrazolium: an important test for physiological seed quality evaluation. **Journal of Seed Science**, v. 41, n. 3, p. 359–366, 2019.

FIGUEIREDO, M. A. **Secagem e resfriamento de sementes de *Coffea arabica* L. visando à criopreservação**. 2016. 199 p. Tese (Doutorado em Produção Vegetal), Escola de Ciências Agrárias - Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG, 11 de julho de 2016.

FISSORE, D.; PISANO, R.; BARRESI, A. A. Applying quality-by-design to develop a coffee freeze-drying process. **Journal of Food Engineering**, v. 123, p. 179–187, 2014.

HUANG, Y. *et al.* Desiccation and storage studies on three cultivars of Arabica coffee. **Seed Science and Technology**, v. 42, n. 1, p. 60–67, 1 abr. 2014.

JUCKERS, A. *et al.* Effect of the freezing step on primary drying experiments and simulation of lyophilization processes. **Processes**, v. 11, n. 5, 1 maio 2023.

KRZYZANOWSKI, F. C., FRANÇA-NETO, J. de B., GOMES-JUNIOR, F. G., & NAKAGAWA, J. Testes de vigor baseados em desempenho de plântulas. In **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: ABRATES, cap. 2, 2020, p. 79 – 140.

KRZYZANOWSKI, F. C., FRANÇA-NETO, J. B., PRADO, J. P., HENNING, F. A. Teste de condutividade elétrica para avaliar o vigor da semente de soja. In: **Circular Técnica 199, Embrapa**, Londrina-PR, 2023. ISSN 2176-2864

MARCOS FILHO, J. Fisiología de Semillas de Plantas Cultivadas / Júlio Marcos-Filho; traducción: Daniel Ricardo Sosa Gomez. – 2 ed. – Londrina: PR: **ABRATES**, 2016. 663 p.: il.

MARQUES, E. C.; COSTA, S. R. R. DA. Estudo da liofilização pela engenharia de produto no processamento industrial de alimentos. **Acta Tecnológica**, v. 10, n. 1, p. 44–52, 2015.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO TRABALHO (OIT). Cadeia Produtiva do Café - Avanços e desafios rumo à promoção do trabalho decente: análise situacional. Genebra: **Organização Internacional do Trabalho**, 2024.

OLIVEIRA, J. A.; ROSA, S. D. V. F. DA; CARVALHO, E. R. Secagem de sementes. In: **Processamento pós-colheita de sementes: abordagem agrônômica visando aprimorar a qualidade**. 1. ed. Lavras, MG: Editora UFLA, v. 1, p. 67–93, 2021.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2023. URL: <https://www.R-project.org/>

ROSA, S. D. V. F. DA. *et al.* Effects of different drying rates on the physiological quality of *Coffea canephora* Pierre seeds. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 17, n. 2, p. 199-205, 2005.

SANTOS, G. C.; VON PINHO, E. V. R.; ROSA, S.D.V.F. Gene expression of coffee seed oxidation and germination processes during drying. **Genetics and Molecular Research**, Ribeirão Preto, v. 12, n. 4, p. 6968-6982, dec. 2013.

SEGATO, S. V.; CINTRA, K. P. Secagem natural de grãos de duas variedades de café arábica: Reflexos na condutividade elétrica. **Nucleos**, v. 18, n. 1, abr. 2021. <https://doi.org/10.3738/1982.2278.3819>

WALTERS, C.; PAMMENTER, N. W.; BERJAK, P.; CRANE, J. Desiccation damage, accelerated ageing and respiration in desiccation tolerant and sensitive seeds. **Seed Science Research**, v. 11, n. 2, p. 135–148, 2001.

WESLEY-SMITH, J.; BERJAK, P.; PAMMENTER, N. W.; WALTERS, C. Intracellular ice and cell survival in cryo-exposed embryonic axes of recalcitrant seeds of *Acer saccharinum*: an ultrastructural study of factors affecting cell and ice structures. **Annals of Botany**, v. 113, n. 4, p. 695–709, mar. 2014. <https://doi.org/10.1093/aob/mct284>

APÊNCICES

APÊNDICE A – Resumo das análises de variância das características avaliadas no experimento 1 em sementes de *Coffea arabica* L. submetidas a diferentes teores de água e métodos de secagem.

	Sem trans.	x ^{0,5}	Sem trans.	x ^{0,5}	Sem trans.	x ^{0,5}	Sem trans.	x ^{0,5}
FV	PR	PR	PN	PN	VIAB	VIAB	CE	CE
Umidade	**	**	**	**	-	-	**	**
Secagem	**	**		**	-	-	**	**
Umidade x Secagem	**	**	*	**	-	-	**	**
CV	7,05	4,46	6,00	3,33	6,10	3,07	9,02	3,94

PR: protrusão radicular; PN: plântulas normais; VIAB: viabilidade; CE: condutividade elétrica.

** menor que 0,01, altamente significativo. – Não houve diferença significativa.

Fonte: elaboração própria.

APÊNDICE B – Resumo das análises de variância das características avaliadas no experimento 2 em sementes de *Coffea arabica* L. pré-secadas em sílica gel e liofilizadas.

	Sem trans.	x ^{0,5}	Sem trans.	x ^{0,5}	Sem trans.	x ^{0,5}	Sem trans.	x ^{0,5}
FV	PR	PR	PN	PN	VIAB	VIAB	CE	CE
Umidade	**	**	**	**	**	**	**	**
Liofilização	**	**	**	**	**	**	**	**
Umidade x Liofilização	**	**	**	**	**	**	**	**
CV	12,42	13,42	17,39	18,87	2,9	1,46	7,75	3,57

PR: protrusão radicular; PN: plântulas normais; VIAB: viabilidade; CE: condutividade elétrica.

** menor que 0,01 – altamente significativo.

Fonte: elaboração própria.

APÊNDICE C – Resumo das análises de variância das características avaliadas no experimento 2 em sementes de *Coffea arabica* L. pré-secadas em peneiras e liofilizadas.

	Sem trans.	x ^{0,5}	Sem trans.	x ^{0,5}	Sem trans.	x ^{0,5}	Sem trans.	x ^{0,5}
FV	PR	PR	PN	PN	VIAB	VIAB	CE	CE
Umidade	**	**	**	**	**	**	**	**
Liofilização	**	**	**	**	**	**	**	**
Umidade x Liofilização	**	**	**	**	**	**	**	**
CV	10,37	5,44	15,38	19,77	2,9	1,51	6,07	2,87

PR: protrusão radicular; PN: plântulas normais; VIAB: viabilidade; CE: condutividade elétrica.

** menor que 0,01 – altamente significativo.

Fonte: elaboração própria.

Artigo 2 - Elaborado conforme a norma NBR 6022	
Título do artigo:	Armazenamento de sementes de <i>Coffea arabica</i> L. liofilizadas
Autores:	Rafaela Rezende Mizael, Sttela Dellyzete Veiga Franco da Rosa, Ana Maria Oliveira Ferreira, Nathália Aparecida Bragança Fávaris



ARTIGO 2 - ARMAZENAMENTO DE SEMENTES DE *Coffea arabica* L. LIOFILIZADAS

STORAGE OF FREEZE-DRIED *Coffea arabica* L. SEEDS¹

Rafaela Rezende Mizael

<https://orcid.org/0009-0006-0051-7837>

Sttela Dellyzete Veiga Franco da Rosa

<https://orcid.org/0000-0001-9959-6606>

Ana Maria Oliveira Ferreira

<https://orcid.org/0000-0003-1456-9815>

Nathália Aparecida Bragança Fávaris

<https://orcid.org/0000-0001-6836-890X>

Resumo: A conservação de sementes de café por períodos prolongados ainda é um desafio e, muito embora já exista metodologia segura, como a criopreservação, a busca por métodos de menor custo que garantam a preservação de espécies de *Coffea* spp. é de grande interesse. A liofilização, já utilizada para sementes de outras culturas, como de hortaliças, é um processo de secagem que remove a água das sementes por meio da sublimação, através da transição direta do estado sólido para o gasoso, proporcionando a preservação da germinação e vigor das sementes e facilitando o armazenamento. Assim, o objetivo nesta pesquisa foi estudar o armazenamento de sementes de café liofilizadas. Sementes da cultivar MGS Paraíso 2 foram pré-secadas em peneiras suspensas ou em sílica gel, até as umidades de 35, 30, 25, 20, 15, 12 e 5% bu, submetidas à liofilização e armazenadas em frascos herméticos protegidos da luz por seis meses. A cada três meses, sementes de todos os tratamentos foram avaliadas nos testes de germinação, tetrazólio e condutividade elétrica. Apesar de comprometer a formação de plântulas normais, as sementes liofilizadas com umidades entre 20 e 12%, apresentam alta porcentagem de protrusão radicular e de viabilidade no teste de tetrazólio após seis meses de armazenamento em embalagem hermética e ambiente sem controle de temperatura. A perda de qualidade das sementes, devido à liofilização, é acompanhada por danos em membranas celulares, sendo que as sementes liofilizadas com mais alta umidade apresentam maior condutividade elétrica.

Palavras-chave: café; sementes; secagem a vácuo; qualidade fisiológica; conservação.

¹ Artigo científico apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal.

Abstract: The conservation of coffee seeds for prolonged periods is still a challenge and, although there is already a safe methodology, such as cryopreservation, the search for lower-cost methods that ensure the preservation of *Coffea* spp. species is of great interest. Freeze-drying, already used for seeds of other crops, such as vegetables, is a drying process that removes water from the seeds through sublimation, through the direct transition from the solid to the gaseous state, providing the preservation of seed germination and vigor and facilitating storage. Thus, the objective of this research was to study the storage of freeze-dried coffee seeds. Seeds of the cultivar MGS Paraíso 2 were pre-dried in suspended sieves or silica gel, up to the humidity of 35, 30, 25, 20, 15, 12 and 5% wb, submitted to freeze-drying and stored in hermetic flasks protected from light for six months. Every three months, seeds of all treatments were evaluated in the germination, tetrazolium and electrical conductivity tests. Despite compromising the formation of normal seedlings, freeze-dried seeds with moisture levels between 20 and 12% have a high percentage of root protrusion and viability in the tetrazolium test after six months of storage in airtight packaging and environment without temperature control. The loss of seed quality due to freeze-drying is accompanied by damage to cell membranes, with freeze-dried seeds having higher moisture content exhibiting higher electrical conductivity.

Keywords: coffee; seeds. vacuum drying; physiological quality; conservation.

1 INTRODUÇÃO

A conservação de sementes de *Coffea arabica* L., apresenta grande complexidade, sobretudo em função do comportamento intermediário da espécie em termos de armazenamento, o que impõe desafios à preservação de sua qualidade fisiológica em médio e longo prazos (Penido *et al.*, 2021). Quando armazenadas em sacos de papel, à temperatura ambiente e com teor de água próximo a 15%, essas sementes tendem a perder a capacidade de germinação em um curto período de tempo, geralmente entre quatro a seis meses após a colheita. Por esse motivo, a produção de mudas depende, quase exclusivamente, de sementes produzidas na mesma safra. Dessa forma, a semeadura é realizada logo após a colheita ou dentro desse curto intervalo de armazenamento, o que nem sempre coincide com condições ambientais mais favoráveis ao estabelecimento da cultura (Corrêa *et al.*, 2022; Veiga, 2005).

Diversos fatores interferem na manutenção da viabilidade e do vigor das sementes ao longo do armazenamento, destacando-se o teor de água, a temperatura, a umidade relativa do ambiente, a embalagem utilizada e as características fisiológicas inerentes à espécie (Carvalho e Nakagawa, 2012; Sinício, 2011). Conforme descrito por Marcos Filho (2016), a manutenção do potencial fisiológico durante o armazenamento depende diretamente da conservação de um nível de umidade adequado e específico nas sementes, o que torna a sensibilidade à dessecação um importante fator limitante para sua conservação e longevidade, visto que, para muitas espécies o armazenamento eficiente está associado à redução do teor de água e à utilização de baixas temperaturas, condições que minimizam a atividade metabólica e retardam o processo de deterioração (Dussert *et al.*, 2012; Carvalho *et al.*, 2023). Entretanto, para sementes de comportamento intermediário, como as de café arábica, a redução excessiva do teor de água pode provocar danos irreversíveis, restringindo a adoção das estratégias convencionalmente utilizadas para espécies ortodoxas.

Nesse contexto, torna-se necessária a busca por tecnologias capazes de conservar essas sementes sem comprometer sua qualidade fisiológica. A liofilização destaca-se como uma alternativa promissora, pois promove a remoção da água por sublimação em condições de baixa temperatura e pressão reduzida, diminuindo os danos térmicos e, potencialmente, preservando a integridade dos tecidos durante o armazenamento. Contudo, a eficiência desse processo depende de fatores como o teor de água inicial das sementes, o método de secagem empregado antes da liofilização e as condições de reidratação. Até o momento, não foram encontrados estudos que avaliem diretamente o armazenamento de sementes de *Coffea arabica* L. após a liofilização, avaliando sua qualidade fisiológica ao longo do tempo. Caso a liofilização seja

capaz de preservar a qualidade fisiológica das sementes de café arábica durante o armazenamento, essa tecnologia poderá representar uma alternativa à criopreservação convencional, especialmente para a conservação de germoplasma e para o uso em instituições e regiões com infraestrutura limitada para armazenamento em condições criogênicas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Obtenção e processamento do material vegetal

Frutos maduros de *Coffea arabica* L., cultivar MGS Paraíso 2, foram colhidos manualmente no estágio cereja, na área de pesquisa do Setor de Cafeicultura/DAG/ESAL da UFLA. Após a colheita, os frutos foram descascados mecanicamente. As sementes foram desmuciladas por fermentação em água durante 24 horas, em câmara de crescimento à 25 °C. Posteriormente, foram lavadas até a completa retirada da mucilagem e passaram por seleção manual para a retirada de sementes defeituosas, sem pergaminhos, com cascas e outras impurezas. As sementes foram colocadas em peneiras de malhas de nylon, à sombra, para a secagem da umidade superficial ($\pm$ 2-3 dias). Os experimentos foram conduzidos no Laboratório Central de Pesquisa em Sementes - LCPS, do Departamento de Agricultura da Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras, Minas Gerais.

2.2 Caracterização inicial das sementes

A caracterização inicial das sementes foi realizada por meio da determinação do teor de água e da avaliação da qualidade fisiológica. O teor de água inicial foi de 47,06% pelo método da estufa 105 °C (Brasil, 2025). As sementes apresentaram 97% de protrusão radicular e 97% de formação de plântulas normais no teste de germinação (Brasil, 2025), 98% de viabilidade no teste de tetrazólio e condutividade elétrica de $100,57 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$.

2.3 Delineamento experimental

Foram realizados experimentos independentes para cada tipo de secagem (sílica gel ou peneiras suspensas), utilizando-se o delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 3 x 8, composto por três tempos de armazenamento (0, 3 e 6 meses) e oito tratamentos. Os tratamentos corresponderam a sementes com teores de água de 35, 30, 25, 20, 15, 12% (bu) submetidas à liofilização, além de sementes com 12% e 5% de umidade que não foram submetidas à liofilização.

2.4 Pré-secagem e liofilização das sementes

As sementes foram pré-secadas por meio de dois métodos: em sílica gel ou peneiras suspensas. Em ambos os métodos, as sementes foram secadas até atingirem as seguintes umidades: 35, 30, 25, 20, 15, 12 e 5% base úmida (bu). A secagem em sílica gel foi realizada dispondo as sementes com pergaminho, em camada única sobre telas metálicas, no interior de caixas de acrílico do tipo gerbox, contendo ± 60 mg de sílica gel ativada em seu interior, abaixo das telas. Os gerbox foram mantidos em câmaras de germinação do tipo B.O.D., em temperatura constante de 25 °C. A sílica foi trocada conforme foi absorvendo a umidade das sementes e perdendo sua coloração azul. Para a secagem em peneiras suspensas, as sementes com pergaminho foram dispostas em camada única sobre telas de nylon mantidas em uma sala fechada, à sombra, sem controle de umidade, permanecendo descobertas e expostas ao ar durante todo o processo, sendo revolvidas três vezes ao dia. Em ambos os métodos, a perda de água durante a secagem foi monitorada por pesagens contínuas em balança de precisão (0,001 g), até que as sementes atingissem os teores de água de interesse (Coelho *et al.*, 2020). Durante e após a secagem, o teor de água das sementes foi conferido pelo método de estufa a 105 °C (Brasil, 2025).

Para a liofilização, as sementes previamente secadas, mantidas com o pergaminho, foram distribuídas em três sacos de “filó” para cada tratamento, de modo a não obstruir a passagem do vapor de água das sementes no interior do liofilizador. Em seguida, os sacos foram acondicionados em liofilizador de bancada (Integrated SpeedVac System modelo L101, marca Liobras), permanecendo no equipamento até que as sementes atingissem teor de água de aproximadamente 5% (b.u.).

2.5 Armazenamento das sementes

As sementes foram acondicionadas em frascos de vidro de coloração âmbar envoltos em papel alumínio, a fim de bloquear a luminosidade e a troca de umidade com o ar. Os frascos contendo as sementes de cada tratamento foram armazenados em ambiente de laboratório, sem controle de temperatura e de umidade do ar.

O período de armazenamento teve início após todas as sementes terem sido liofilizadas. As análises para avaliação dos efeitos dos tratamentos foram realizadas nos períodos de 0, 3 e 6 meses, podendo ser referidos como tempo 0, 1 e 2, respectivamente.

2.6 Avaliação da qualidade fisiológica das sementes

Antes da avaliação fisiológica, as sementes liofilizadas foram submetidas a um pré-umedecimento, segundo testes anteriores, para evitar danos de embebição, tendo em vista o baixo teor de água das sementes após a liofilização. Para isso, as sementes foram distribuídas em camada única sobre telas metálicas de caixas acrílicas, do tipo gerbox, contendo ± 40 mL de água destilada em seu interior e abaixo das telas. Os gerbox foram mantidos em câmaras de germinação do tipo B.O.D., em temperatura constante de 25 °C. O ganho de água foi monitorado por pesagens contínuas, em balança de precisão (0,001 g), até que as sementes atingissem a umidade de $\pm 12\%$ (bu). As análises fisiológicas foram realizadas mediante os testes descritos a seguir:

Teste de germinação

O teste foi realizado de acordo com as Regras para Análise de Sementes – RAS, com modificações. Foram semeadas quatro repetições de 25 sementes, sem os pergaminhos, em papel de germinação umedecido em água destilada em quantidade equivalente a 2,5 vezes o peso do papel seco. Os rolos de germinação, foram mantidos em germinador do tipo “Mangelsdorf” em temperatura constante de 30 °C. Aos 15 dias foi determinada a porcentagem de protrusão radicular e aos 30 dias foi determinada a porcentagem de plântulas normais considerando apenas as que apresentavam raiz principal e pelo menos duas raízes laterais.

Teste de tetrazólio

Foram utilizadas quatro repetições de 10 sementes, sem os pergaminhos, as quais foram embebidas em água destilada durante 36 horas a 30 °C em germinador, de acordo com Clemente *et al.*, (2011). Após a embebição, os embriões foram extraídos com o auxílio de bisturi e mantidos em solução antioxidante polivinilpirrolidona (PVP) e, em seguida, foram imersos em solução de sal de tetrazólio a 0,5%, na ausência de luz, por período de 3 horas, a 30 °C em germinador. Posteriormente foram avaliados quanto a coloração vermelha, em intensidade e localização, sendo os resultados expressos em porcentagem de embriões viáveis.

Condutividade elétrica

Quatro repetições de 25 sementes, sem os pergaminhos, foram inicialmente pesadas e colocadas para embeber em copos plásticos, em 37,5 mL de água deionizada, sendo mantidas por 24 horas em B.O.D. em temperatura constante de 25 °C (Krzyzanowski *et al.*, 2020). Após esse período foi realizada a leitura da condutividade elétrica da solução contendo as sementes, em condutivímetro de bancada, sendo os resultados expressos em $\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}.\text{g}^{-1}$.

2.7 Análise estatística

Foi realizado o teste de normalidade e homogeneidade das variâncias por meio do teste Shapiro-Wilk, e, quando necessário, os dados foram transformados em porcentagem de raiz quadrada de arco seno. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knot, considerando $p < 0,05$. A análise dos dados foi realizada com o software estatístico R, versão 4.2.3 (R CORE TEAM, 2023).

2.8 Declaração de uso de IA

Ferramentas de Inteligência Artificial (ChatGPT e Perplexity AI) foram utilizadas durante a elaboração deste trabalho com a finalidade de revisão de ortografia e gramática, bem como para melhora da fluidez do texto. A responsabilidade integral pelo conteúdo, pela veracidade e pela originalidade dos dados gerados cabe exclusivamente aos autores.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Germinação das sementes

As análises de variância referentes às características avaliadas durante o armazenamento das sementes liofilizadas encontram-se apresentadas nos Apêndices A e B.

A Tabela 1 apresenta os resultados de protrusão radicular de sementes de *Coffea arabica* L. submetidas a pré-secagem em sílica gel, liofilizadas ou não, avaliadas imediatamente após liofilização, com três e seis meses de armazenamento (tempos 0, 1 e 2). Os resultados evidenciam influência tanto do teor de água inicial antes da liofilização quanto do período de armazenamento sobre a capacidade germinativa das sementes.

Tabela 1. Porcentagem de protrusão radicular de sementes de *Coffea arabica* L. liofilizadas após pré-secagem em sílica gel e armazenadas por seis meses.

Armazenamento (meses)	Umidades iniciais (%)							
	Com liofilização						Sem liofilização	
	35	30	25	20	15	12	12	5
0	4 aE	2 bE	50 aC	53 aC	71 aB	78 aB	93 aA	22 bD
3	0 aF	13 aE	54 aC	48 aC	67 aB	65 bB	89 aA	36 aD
6	3 aD	21 aC	62 aA	57 aA	49 bB	62 bA	4 bD	40 aB

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e letra maiúscula na linha, agrupam entre si pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade.

Fonte: elaboração própria.

No tempo 0, os melhores resultados entre os tratamentos liofilizados foram obtidos nas sementes com 15% e 12% de umidade, que apresentaram 71% e 78%, respectivamente. Ao longo dos seis meses porém, esses valores reduziram para 49% e 62%. As sementes com 25% e 20% de umidade também mantiveram desempenho satisfatório, com valores de protrusão radicular entre 48% e 62% durante todo o período experimental, sem diferenças estatísticas entre os tempos de armazenamento. De modo geral, os resultados sugerem que a liofilização das sementes em teores de água intermediários favoreceu a manutenção da capacidade germinativa das sementes. Por outro lado, as sementes liofilizadas com 35% e 30% de umidade, apresentaram os menores percentuais de protrusão radicular em todos os tempos de avaliação. Na umidade de 35%, a protrusão radicular foi abaixo de 4%, permanecendo praticamente nula durante todo o armazenamento. Já para as sementes com 30% de umidade, os percentuais

variaram de 2% no tempo inicial para 21% aos seis meses. Tendência semelhante foi observada nas sementes com 25% de umidade e nas sementes não liofilizadas com 5% de umidade.

A formação de plântulas normais após a liofilização reduziu de forma acentuada. Conforme apresentado na Tabela 2, ao final dos seis meses, os melhores resultados para protrusão radicular foram observados nas sementes liofilizadas com 12% de umidade, com 18% de protrusão.

Tabela 2. Porcentagem de plântulas normais de sementes de *Coffea arabica* L. liofilizadas após pré-secagem em sílica gel e armazenadas por seis meses.

Armazenamento (meses)	Umidades iniciais (%)							
	Com liofilização						Sem liofilização	
	35	30	25	20	15	12	12	5
0	0 aC	0 aC	10 bB	5 aB	2 aC	7 bB	92 aA	0 aC
3	0 aD	0 aD	45 aB	6 aC	8 aC	12 bC	71 bA	0 aD
6	0 aB	0 aB	0 cB	4 aB	4 aB	18 aA	1 cB	3 aB

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e letra maiúscula na linha, agrupam entre si pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade.

Fonte: elaboração própria.

Nos tempos 0 e 1, as mesmas sementes apresentaram 7% e 12% de protrusão radicular, percentual menor que o observado ao final do armazenamento (Tabela 2). Esse comportamento pode estar relacionado à capacidade de reparo de danos celulares durante a embebição. Segundo Bewley *et al.* (2013), sementes submetidas a níveis moderados de deterioração podem restaurar parcialmente sua funcionalidade fisiológica após a absorção de água, permitindo a conclusão da germinação. Entretanto, à medida que os danos se acumulam durante o armazenamento, os mecanismos de reparo tornam-se progressivamente menos eficientes, comprometendo inicialmente o vigor e o desenvolvimento normal das plântulas e, posteriormente, a própria viabilidade das sementes. Quando comparados aos resultados de protrusão radicular, observa-se que as sementes liofilizadas com 25%, 20% e 15% de umidade mantiveram elevada capacidade de emissão de radícula durante o armazenamento, porém sem formação de plântulas normais. O caso mais evidente ocorreu nas sementes com 25% de umidade, que apresentaram 62% de protrusão radicular aos seis meses, mas não produziram plântulas normais.

As sementes com 35% e 30% de umidade exibiram baixa porcentagem ou ausência de protrusão radicular e não desenvolveram plântulas normais ao longo do armazenamento. Da mesma forma, as sementes não liofilizadas, mas mantidas com 5% de umidade também não obtiveram desenvolvimento de plântulas normais, indicando que tanto o excesso quanto a

deficiência de água podem ser prejudiciais à manutenção da qualidade fisiológica das sementes. Esses resultados estão de acordo com as observações de Penido *et al.* (2021), que verificaram influência do teor de água e do período de armazenamento sobre a qualidade fisiológica de sementes de café, verificando manutenção dessa qualidade nos primeiros três meses e redução após períodos mais prolongados de armazenamento.

Os percentuais de protrusão observados nas sementes não liofilizadas e armazenadas com 12% de umidade foram de 92% e 71% nos tempos 0 e 1. Contudo, após seis meses de armazenamento, esse valor foi reduzido para apenas 1%, confirmando os resultados de estudos que relatam a baixa armazenabilidade das sementes de café e sua limitada capacidade de manutenção da qualidade fisiológica quando submetidas à secagem convencional (Dussert *et al.*, 2012; Corrêa *et al.*, 2022).

Na Tabela 3, são apresentados os valores de protrusão radicular das sementes pré-secadas em peneira, submetidas a liofilização ou não. Nos três primeiros meses de armazenamento, as sementes com 12% de umidade não liofilizadas, apresentaram a maior porcentagem de protrusão radicular. Entretanto, aos seis meses não houve protrusão, constatando que nesse teor de água as sementes não mantêm a qualidade fisiológica durante o armazenamento prolongado, visto que na mesma umidade, as sementes liofilizadas, apesar de apresentarem menores valores de protrusão, mantiveram capacidade de germinação. Também não houve protrusão radicular nas sementes liofilizadas com 35% de umidade ao longo de todo o período de armazenamento.

Tabela 3. Porcentagem de protrusão radicular de sementes de *Coffea arabica* L., liofilizadas após pré-secagem em peneiras e armazenadas por seis meses.

Armazenamento (meses)	Umidades iniciais (%)							
	Com liofilização						Sem liofilização	
	35	30	25	20	15	12	12	5
0	0 aD	6 bD	45 aC	63 aB	55 aB	46 aC	94 aA	59 aB
3	0 aE	24 aD	56 aB	50 aB	51 aB	40 aC	85 aA	59 aB
6	0 aC	23 aB	57 aA	60 aA	27 bB	24 bB	0 bC	48 aA

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e letra maiúscula na linha, agrupam entre si pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade.

Fonte: elaboração própria.

Em relação às sementes pré-secadas até 5% de umidade e não liofilizadas, não houve variação nos percentuais de protrusão radicular, que permaneceram significativamente iguais ao longo do armazenamento. Aos seis meses, as sementes deste tratamento apresentaram

desempenho equivalente ao observado nas sementes liofilizadas com 25% e 20% de umidade, com 57% e 60% de protrusão radicular.

As sementes com 30% de umidade apresentaram percentuais variando de 6% no tempo inicial para 23% aos seis meses. O mesmo acontece para as sementes com 25% de umidade, passando de 45% para 57% no tempo 2. Comportamento semelhante foi observado nas sementes pré-secadas em sílica, para os mesmos teores de água. As umidades iniciais que melhor favoreceram a manutenção da protrusão radicular após a liofilização e ao longo do armazenamento foram 20% e 25%, não havendo diferenças estatísticas entre os três tempos.

De acordo com os resultados, não houve ocorrência de plântulas normais provenientes de sementes secadas em peneiras e liofilizadas para a maioria dos tratamentos nos três períodos avaliados (Tabela 4).

Tabela 4. Porcentagem de plântulas normais de sementes de *Coffea arabica* L. liofilizadas após pré-secagem em peneiras e armazenadas por seis meses.

Armazenamento (meses)	Umidades iniciais (%)							
	Com liofilização						Sem liofilização	
	35	30	25	20	15	12	12	5
0	0 aC	0 aC	2 aC	4 aC	2 aC	0 aC	91 aA	13 aB
3	0 aC	0 aC	1 aC	3 aC	3 aC	1 aC	64 bA	10 aB
6	0 aA	0 aA	0 aA	2 aA	0 aA	0 aA	0 cA	5 bA

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e letra maiúscula na linha, agrupam entre si pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade.

Fonte: elaboração própria.

Embora as sementes tenham apresentado protrusão radicular, o desenvolvimento de plântulas normais foi comprometido. Em todos os tratamentos em que as sementes foram liofilizadas, esta variável foi praticamente nula, sendo que apenas naquelas liofilizadas com umidade de 20%, houve algum percentual de plântulas normais nos três tempos avaliados. O maior percentual foi observado no tempo 0, com 4% de plântulas normais, seguido de 3% e 2%, aos três e seis meses. Bewley *et al.* (2013) descreve que à medida que o processo de deterioração avança, as sementes perdem gradativamente a capacidade de germinar e originar plântulas normais. Em estágios intermediários, a emissão da radícula ainda pode ocorrer, porém os danos acumulados limitam o desenvolvimento subsequente da plântula. Isso ocorre porque danos celulares de menor intensidade podem ser parcialmente reparados durante a embebição, mas esse processo demanda tempo e energia, reduzindo a velocidade e a eficiência da germinação. Quando a deterioração se torna mais severa, a protrusão radicular ainda pode

ocorrer, mas frequentemente é acompanhada pela formação de plântulas anormais. Em situações de deterioração extrema, entretanto, os danos tornam-se irreversíveis, impedindo tanto a emissão da radícula quanto o estabelecimento da plântula (Dadlani e Yadava, 2023). Este comportamento foi observado no presente estudo, tanto nas sementes liofilizadas pré-secadas em peneiras, quanto naquelas pré-secadas em sílica gel nas umidades de 30% e 35%, nas quais a protrusão radicular não foi acompanhada pela formação de plântulas normais.

As sementes com 12% de umidade não liofilizadas apresentaram alta porcentagem de plântulas normais no início do armazenamento, de 91%, e 64% aos três meses, reduzindo para 0% ao final de seis meses. Com 5% de umidade, as sementes apresentaram 13% de plântulas normais imediatamente após secagem, reduzindo a 5% aos seis meses.

3.2 Viabilidade pelo teste de tetrazólio

A viabilidade das sementes pelo teste de tetrazólio (Tabelas 5 e 6) revelou um padrão distinto daquele observado para protrusão radicular e plântulas normais. Para melhor compreensão desse comportamento, a Tabela 5 apresenta os percentuais de viabilidade das sementes pré-secadas em sílica gel, ao longo do armazenamento.

Tabela 5. Porcentagem de viabilidade de sementes de *Coffea arabica* L. liofilizadas após pré-secagem em sílica gel e armazenadas por seis meses.

Armazenamento (meses)	Umidades iniciais (%)							
	Com liofilização						Sem liofilização	
	35	30	25	20	15	12	12	5
0	62 aC	85 aB	87 aB	100 aA	100 aA	92 aB	100 aA	100 aA
3	50 bB	87 aA	80 aA	87 bA	92 aA	100 aA	92 aA	90 aA
6	40 bC	67 bB	72 aB	70 cB	62 bB	87 aA	47 bC	77 bA

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e letra maiúscula na linha, agrupam entre si pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade.

Fonte: elaboração própria.

No tempo 0, cem por cento das sementes apresentaram viabilidade, observado nas sementes liofilizadas com 20% e 15% de umidade, assim como aquelas com 12% e 5% de umidade não submetidas à liofilização. Após três meses de armazenamento, esse resultado foi observado nas sementes liofilizadas com 12% de umidade. No mesmo período, os tratamentos com umidade inicial de 30%, 25%, 20% e 15% mantiveram valores entre 80% e 92%, sem diferenças significativas entre si. Aos seis meses de armazenamento, o tratamento liofilizado

com 12% de umidade continuou se destacando, mantendo 87% de viabilidade, enquanto nas sementes com 30%, 20% e 15% de umidade foi observada redução, com valores variando entre 62% e 72%. Os piores resultados de viabilidade foram observados nas sementes com 35% de umidade inicial para todos os períodos de armazenamento. A viabilidade reduziu de 62% no tempo 0, para 40% no tempo 2.

Entre os tratamentos sem liofilização, as sementes mantidas com 12% de umidade, exibiram máxima viabilidade nos três primeiros meses, porém sofreram acentuada redução aos seis meses, atingindo apenas 47%. Em contraste, as sementes submetidas à liofilização no mesmo teor de água mantiveram 87% de viabilidade ao final do armazenamento, evidenciando o efeito positivo da liofilização na conservação desses embriões. Já as sementes secadas até 5% de umidade sem liofilização apresentaram elevada viabilidade durante todo o período avaliado, mantendo 77% de embriões viáveis após seis meses de armazenamento, apesar do baixo desempenho observado nos testes de protrusão radicular e formação de plântulas normais.

Os resultados de viabilidade das sementes pré-secadas em peneiras e submetidas à liofilização são apresentados na Tabela 6. No tempo 0, as sementes liofilizadas com 15% e 12% de umidade inicial apresentaram 100% de viabilidade, seguidas das umidades de 30%, 25% e 20% com valores de 90%, 92% e 97%, respectivamente, embora todos esses tratamentos não tenham diferido significativamente entre si.

Tabela 6. Porcentagem de viabilidade de sementes de *Coffea arabica* L., liofilizadas após pré-secagem em peneiras, liofilizadas e armazenadas por seis meses.

Armazenamento (meses)	Umidades iniciais (%)							
	Com liofilização						Sem liofilização	
	35	30	25	20	15	12	12	5
0	57 aB	90 aA	92 aA	97 aA	100 aA	100 aA	100 aA	97 aA
3	47 aC	82 aB	85 aB	77 bB	80 bB	92 bA	97 aA	92 aA
6	47 aD	65 bB	67 bB	72 bB	70 bB	85 bA	10 bE	60 bC

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e letra maiúscula na linha, agrupam entre si pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade.

Fonte: elaboração própria.

Em contraste, as sementes com 35% de umidade apresentaram o menor percentual (57%), diferindo dos demais tratamentos. As sementes não liofilizadas com 12% e 5% de umidade também apresentaram alto percentual de viabilidade, com 100% e 97% de embriões viáveis.

Ao longo do armazenamento, as sementes liofilizadas com 12% de umidade mantiveram os maiores percentuais de viabilidade, registrando 100% no início do armazenamento, 92% e 85% aos três e seis meses, respectivamente. Os tratamentos com 30%, 25%, 20% e 15% exibiram comportamento intermediário, com valores entre 77% e 85% no terceiro mês e entre 65% a 72% no sexto mês, enquanto que as sementes com 35% de umidade permaneceram com os menores percentuais de viabilidade durante todo o período, mantendo apenas 47% aos três e seis meses. Entre os tratamentos sem liofilização, as sementes mantidas com 12% de umidade sofreram drástica redução aos seis meses, atingindo apenas 10% de protrusão, o menor valor observado nesse período. Em contrapartida, as sementes liofilizadas no mesmo teor de água mantiveram 85% de viabilidade ao final do armazenamento. Já as sementes secadas até 5% de umidade sem liofilização apresentaram redução gradual ao longo do período avaliado, passando de 97% para 60%.

Os resultados indicam que a liofilização favoreceu a conservação da viabilidade das sementes ao longo do armazenamento, mesmo em tratamentos com baixo desempenho germinativo. Esse comportamento pode estar relacionado à maior sensibilidade do endosperma aos processos de secagem e liofilização. Em sementes de café, o embrião possui poucas reservas, enquanto o endosperma constitui o principal tecido de reserva, sendo formado predominantemente por carboidratos responsáveis pelo fornecimento de energia durante a germinação (Veiga, 2005). Além disso, grande parte dessas reservas encontra-se armazenada nas paredes celulares na forma de hemiceluloses, que se acumulam em quantidade tão elevada que o conteúdo celular vivo passa a ocupar apenas uma pequena porção da célula (Bewley *et al.*, 2013). Dessa forma, danos causados pela secagem ou pela liofilização podem comprometer a funcionalidade do endosperma e a mobilização das reservas necessárias ao crescimento do embrião, mesmo quando este permanece viável. Tal condição pode explicar os elevados percentuais de viabilidade observados em alguns tratamentos, associados à baixa protrusão radicular e à reduzida formação de plântulas normais, indicando que a sobrevivência do embrião nem sempre é suficiente para garantir o desenvolvimento adequado da plântula.

3.3 Condutividade elétrica

A Tabela 7 apresenta os valores de condutividade elétrica das sementes liofilizadas ou não. Como a condutividade elétrica está diretamente relacionada à quantidade de eletrólitos lixiviados durante a embebição, valores mais elevados indicam maior desorganização das membranas e, conseqüentemente, menor vigor fisiológico (Vieira e Krzyzanowski, 1999). No

tempo 0, as sementes liofilizadas com 25%, 20%, 15% e 12% de umidade inicial, além das sementes mantidas a 12% de umidade sem liofilização apresentaram os menores valores de condutividade elétrica, não diferindo significativamente entre si.

Tabela 7. Condutividade elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$) de sementes de *Coffea arabica* L. liofilizadas após pré-secagem em sílica gel, liofilizadas e armazenadas por seis meses.

Arm. (meses)	Umidades iniciais (%)							
	Com liofilização						Sem liofilização	
	35	30	25	20	15	12	12	5
0	65,15 cC	48,80 bB	31,15 aA	33,76 aA	34,25 aA	34,36 aA	29,79 aA	48,85 aB
3	49,57 bC	40,98 bB	28,17 aA	40,45 aB	51,68 bC	30,82 aA	30,13 aA	44,48 aB
6	34,94 aA	32,85 aA	31,61 aA	31,19 aA	59,02 bC	54,79 bC	42,96 bB	67,73 bD

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e letra maiúscula na linha, agrupam entre si pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade. Arm. = armazenamento.

Fonte: elaboração própria.

Em contraste, os maiores valores foram observados nas sementes liofilizadas com 35% e 30% de umidade inicial ($65,15 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ e $48,80 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$) e nas sementes não liofilizadas com 5% de umidade ($48,85 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$). Apesar de corresponderem a condições hídricas opostas, esses tratamentos indicam maior desorganização dos sistemas de membranas. Nas sementes com 30% e 35% de umidade, o elevado teor de água antes da liofilização provavelmente favoreceu a ocorrência de danos associados ao congelamento durante à liofilização, uma vez que sementes de café mais hidratadas apresentam maior suscetibilidade à formação de cristais de gelo e às lesões celulares decorrentes desse processo (Figueiredo *et al.*, 2021). Por outro lado, nas sementes secadas até 5% de umidade, os resultados sugerem que a dessecação excessiva promoveu alterações estruturais, aumentando a lixiviação de eletrólitos durante a embebição, comportamento também observado por Fávaris *et al.* (2022).

Após três meses de armazenamento, as sementes com 25% e 12% de umidade apresentaram os menores valores de condutividade, enquanto os tratamentos com teores de água de 35% e 15%, registraram os maiores. Aos seis meses, os menores valores foram observados nas sementes com 35%, 30%, 25% e 20% de umidade, que não diferiram entre si, enquanto os tratamentos com 15% e 12% atingiram $59,02 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ e $54,79 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$, respectivamente.

Considerando os resultados ao longo do armazenamento, verificou-se redução significativa da condutividade nas sementes com 35% de umidade, cujos valores passaram de $65,15 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ para $34,94 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$. Em contrapartida, as sementes com 15% e 12% de umidade apresentaram aumento significativo dessa variável aos seis meses. Os tratamentos com

30%, 25% e 20% mantiveram comportamento relativamente estável durante todo o período. Entre os tratamentos sem liofilização, as sementes mantidas com 12% de umidade apresentaram baixa condutividade elétrica até os três meses, porém registraram aumento para $42,96 \mu\text{S.cm}^{-1}.\text{g}^{-1}$ aos seis meses. Já as sementes secadas até 5% de umidade apresentaram o maior valor ao final do armazenamento ($67,73 \mu\text{S.cm}^{-1}.\text{g}^{-1}$), diferindo dos demais tratamentos avaliados nesse período, confirmando os danos causados às sementes de café, quando secadas até tão baixo teor de água.

Embora as sementes liofilizadas após pré-secagem até 12% de umidade tenham mantido elevada viabilidade após seis meses de armazenamento, de 87% (Tabela 5), também apresentaram elevada lixiviação de eletrólitos no mesmo período. De modo geral, a literatura relata aumento da condutividade elétrica durante o armazenamento em decorrência do avanço da deterioração. Entretanto, esse comportamento não foi observado em todos os tratamentos do presente estudo, uma vez que sementes com maiores teores de água iniciais apresentaram redução dessa variável ao longo do armazenamento.

Os resultados de condutividade elétrica das sementes liofilizadas após pré-secagem em peneira e armazenadas, estão apresentados na Tabela 8. No tempo 0, os maiores valores foram observados nas sementes liofilizadas com 35% de umidade inicial ($74,80 \mu\text{S.cm}^{-1}.\text{g}^{-1}$), seguidas pelas sementes dos tratamentos com 30%, 25% e 12% de umidade, as quais apresentaram $46,89 \mu\text{S.cm}^{-1}.\text{g}^{-1}$, $44,17 \mu\text{S.cm}^{-1}.\text{g}^{-1}$ e $40,29 \mu\text{S.cm}^{-1}.\text{g}^{-1}$, respectivamente.

Tabela 8: Condutividade elétrica ($\mu\text{S.cm}^{-1}.\text{g}^{-1}$) de sementes de *Coffea arabica* L. liofilizadas após pré-secagem em peneiras, liofilizadas e armazenadas por seis meses.

Arm. (meses)	Umidades iniciais (%)							
	Com liofilização						Sem liofilização	
	35	30	25	20	15	12	12	5
0	74,80 bD	46,89 bC	44,17 bC	35,40 aB	33,83 aB	40,29 bC	23,89 aA	33,77 aB
3	46,94 aB	38,91 aB	51,17 bC	42,94 bB	31,93 aA	64,05 cD	30,33 aA	62,96 bD
6	43,93 aB	37,31 aB	31,32 aA	30,68 aA	35,59 aB	32,01 aA	27,35 aA	36,44 aB

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e letra maiúscula na linha, agrupam entre si pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade. Arm. = armazenamento.

Fonte: elaboração própria.

O menor valor foi observado nas sementes com 12% de umidade sem liofilização, com $23,89 \mu\text{S.cm}^{-1}.\text{g}^{-1}$, significativamente igual aos valores observados aos três e seis meses de armazenamento. Para as sementes liofilizadas, menor condutividade elétrica ocorreu nas sementes dos tratamentos com 20% e 15% de umidade que registraram $35,40 \mu\text{S.cm}^{-1}.\text{g}^{-1}$ e

33,83 $\mu\text{S.cm}^{-1}.\text{g}^{-1}$, respectivamente. No tempo 1, os valores mais elevados foram observados nas sementes com 12% de umidade e nas sementes não liofilizadas com 5% de umidade, de 64,05 $\mu\text{S.cm}^{-1}.\text{g}^{-1}$ e 62,96 $\mu\text{S.cm}^{-1}.\text{g}^{-1}$ de condutividade elétrica. Enquanto os menores valores continuaram nas sementes liofilizadas com 15% de umidade e nas sementes mantidas com 12%. Aos seis meses de armazenamento, os menores valores foram observados nas sementes liofilizadas com umidade inicial de 25%, 20% e 12%, além das sementes mantidas com 12% de umidade sem liofilização, cujas médias variaram de 27,35 a 32,01 $\mu\text{S.cm}^{-1}.\text{g}^{-1}$, sem diferenças significativas entre si. Em contraste, as sementes liofilizadas com 35% de umidade mantiveram os maiores valores nesse período, alcançando 43,93 $\mu\text{S.cm}^{-1}.\text{g}^{-1}$, respectivamente.

Considerando os resultados ao longo do armazenamento, verificou-se redução significativa da condutividade elétrica nas sementes liofilizadas com 35%, 30%, 25%, 20% e 12% de umidade. A maior redução ocorreu no tratamento com 35% de umidade, cujos valores passaram de 74,80 para 43,93 $\mu\text{S.cm}^{-1}.\text{g}^{-1}$ entre o início e o final do armazenamento. Em contrapartida, as sementes com 15% e 20% de umidade mantiveram valores significativamente estáveis durante todo o período. Entre os tratamentos sem liofilização, as sementes com 12% de umidade apresentaram aumento da condutividade aos três meses, seguido de redução aos seis meses, apesar de não apresentarem diferenças significativas. As sementes com 5% de umidade também apresentaram aumento e redução significativos da condutividade aos três e seis meses de armazenamento.

A redução da condutividade elétrica observada nos tratamentos ao longo do armazenamento ocorreu tanto nas sementes pré-secadas em peneiras quanto naquelas pré-secadas em sílica gel. Entretanto, esse comportamento não foi acompanhado por melhoria da viabilidade, da protrusão radicular ou da formação de plântulas normais. Dessa forma, os resultados indicam que a diminuição da lixiviação de eletrólitos não esteve associada ao aumento da qualidade fisiológica das sementes, evidenciando que a interpretação da condutividade elétrica deve ser realizada em conjunto com outros testes fisiológicos (Vieira e Krzyzanowski, 1999; Segato e Cintra, 2021).

De modo geral, as sementes liofilizadas após pré-secagem até 12%, 15% e 20% de umidade apresentaram os melhores desempenhos ao longo do armazenamento, caracterizados pela manutenção de elevados percentuais de viabilidade e maiores valores de protrusão radicular. Em contraste, as sementes com 30% e 35% de umidade apresentaram redução acentuada da qualidade fisiológica, refletida nos menores percentuais de protrusão radicular, na ausência ou baixa formação de plântulas normais e nos maiores valores de condutividade elétrica. Esse comportamento sugere que teores elevados de água aumentaram a suscetibilidade

das sementes aos danos decorrentes do congelamento durante o processo de liofilização, enquanto teores intermediários proporcionaram condições mais favoráveis à conservação dos tecidos embrionários e à manutenção da capacidade germinativa durante o armazenamento.

4 CONCLUSÃO

Apesar de comprometer a formação de plântulas normais, sementes de *Coffea arabica* L. pré-secadas em sílica gel e liofilizadas nos teores de 12, 15, 20 e 25% de umidade suportam armazenamento por 6 meses, com valores de protrusão radicular entre 49% e 62% e valores de viabilidade entre 62% e 87% ao final do período.

Sementes de *C. arabica* com umidades de 30 e 35% não suportam armazenamento após liofilização.

A perda de qualidade das sementes, devido à liofilização, é acompanhada por danos em membranas celulares, sendo que as sementes liofilizadas com mais alta umidade (30 e 35% bu) apresentam maiores valores de condutividade elétrica.

REFERÊNCIAS

- BRASIL, Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA). **Regras para Análise de Sementes (RAS)**. Brasília - DF: MAPA, 2025.
- BEWLEY, J.D.; BRADFORD, K.J.; HILHORST, H.W.M.; NONOGAKI, H. Seeds: physiology of development, germination and dormancy. **New York: Springer**, 408 p., 2013.
- CARVALHO, M. H. DE, *et al.* Drying of arabica coffee and its effect on the gene expression and activity of enzymes linked to seed physiological quality. **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 45, p. 1–12, 20 set. 2023.
- CARVALHO, N. M. DE; NAKAGAWA J. Sementes: ciência, tecnologia e produção. 5. Ed., **Jaboticabal: FUNEP**, 2012, 590 p.
- CLEMENTE, A. C. S. *et al.* Preparo das sementes de café para a avaliação da viabilidade pelo teste de tetrazólio. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v. 33, n.1, p. 38-44, 2011.
- COELHO, S. V. B., *et al.* Ultrastructural damage in coffee seeds exposed to drying and to subzero (°C) temperatures. **Coffee Science**, v. 15, n. 1, p. 1–6, 2020.
- CORRÊA, J. P.; LANDGRAF, P. R. C.; REZENDE, T. T. Armazenamento da semente de café. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 14, p. e28111435945, 18 out. 2022.
- DADLANI, M.; YADAVA, D. K. Seed Science and Technology. **Springer Nature**, 2023, 430 p.
- DUSSERT, S., *et al.* Biologie de la conservation des semences de caféiers: Aspects fondamentaux et conséquences pratiques. Une revue. **Cahiers Agricultures**, v. 21, n. 2–3, p. 106–114, 2012.
- FÁVARIS, N. A. B. Protein profile in arabica coffee seeds in electrophoresis gel: importance of freeze-drying. **Journal of Seed Science**, v. 44, p. 1-13, 2022. <http://dx.doi.org/10.1590/2317-1545v44258570>
- FIGUEIREDO, M. A. *et al.* Physiological, biochemical, and ultrastructural aspects of *Coffea arabica* L. seeds under different cryopreservation protocols. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 45, 2021. <http://dx.doi.org/10.1590/1413-7054202145027020>
- KRZYŻANOWSKI, F. C., FRANÇA-NETO, J. de B., GOMES-JUNIOR, F. G., & NAKAGAWA, J. Testes de vigor baseados em desempenho de plântulas. In **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: ABRATES, cap. 2, 2020, p. 79 – 140.
- MARCOS FILHO, J. Fisiología de Semillas de Plantas Cultivadas / Júlio Marcos-Filho; traducción: Daniel Ricardo Sosa Gomez. – 2 ed. – Londrina: PR: **ABRATES**, 2016, 663 p.: il.
- PENIDO, A. C. *et al.* Cold coffee seeds storage with different water content. **Coffee Science**, v. 16, p. 1–9, 2021.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2023. URL: <https://www.R-project.org/>

SEGATO, S. V.; CINTRA, K. P. Secagem natural de grãos de duas variedades de café arábica: Reflexos na condutividade elétrica. **Nucleos**, v. 18, n. 1, abr. 2021. <https://doi.org/10.3738/1982.2278.3819>

SINÍCIO, R. Equação de longevidade para sementes de café (*Coffea arabica* L.). **Reveng - Engenharia na Agricultura**, v. 19, n. 4, p. 287–297, 2011.

VEIGA, A. D. **Armazenabilidade de sementes de cafeeiro em diferentes estádios de maturação e submetidas a diferentes métodos de secagem**. 2005. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia), Escola de Ciências Agrárias - Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG, 2005.

VIEIRA, R. D.; KRZYZANOWSKI, F. C. Teste de condutividade elétrica. In: KRZYZANOWSKI, F. C.; VIEIRA, R. D.; FRANÇA-NETO, J. B.; MARCOS FILHO, J. **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: ABRATES, cap. 4, 2020, p. 1-26.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Resumo das análises de variância das características avaliadas durante o armazenamento de sementes de *Coffea arabica* L. pré-secadas em sílica gel e submetidas a liofilização.

	Sem trans.	x0 ^{.5}	Sem trans.	x0 ^{.5}	Sem trans.	x0 ^{.5}	Sem trans.	x0 ^{.5}
FV	PR	PR	PN	PN	VIAB	VIAB	CE	CE
Umidade	**	**	**	**	**	**	-	-
Tempo	-	-	**	**	**	**	-	-
Umidade x Tempo	**	**	**	**	**	**	-	-
CV	13,42	15,64	54,91	49,69	5,44	2,85	-	-

PR: protrusão radicular; PN: plântulas normais; VIAB: viabilidade; CE: condutividade elétrica.

** menor que 0,01, altamente significativo. - Não houve diferença significativa.

Fonte: elaboração própria.

APÊNDICE B - Resumo das análises de variância das características avaliadas durante o armazenamento de sementes de *Coffea arabica* L. pré-secadas em peneiras e submetidas a liofilização.

	Sem trans.	x0 ^{.5}	Sem trans.	x0 ^{.5}	Sem trans.	x0 ^{.5}	Sem trans.	x0 ^{.5}
FV	PR	PR	PN	PN	VIAB	VIAB	CE	CE
Umidade	**	**	**	**	**	**	-	-
Tempo	-	-	**	**	**	**	-	-
Umidade x Tempo	**	**	-	-	-	-	-	-
CV	17,08	8,64	160,51	157,55	4,99	2,67	-	-

PR: protrusão radicular; PN: plântulas normais; VIAB: viabilidade; CE: condutividade elétrica.

** menor que 0,01, altamente significativo. - Não houve diferença significativa.

Fonte: elaboração própria.

TERCEIRA PARTE

1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito da pré-secagem em diferentes métodos (sílica gel e peneiras), da liofilização e do armazenamento sobre a qualidade fisiológica de sementes de café arábica (*Coffea arabica* L.). Os resultados demonstraram que a liofilização, quando aplicada após pré-secagem controlada, representa uma alternativa viável para a conservação de sementes de café, desde que observados os teores de água adequados.

Considerando os dois métodos de pré-secagem, os teores de água mais adequados para submeter as sementes de *C. arabica* L. à liofilização foram 12, 15 e 20% bu, com destaque para 12 e 15%, especialmente quando a pré-secagem foi realizada em sílica gel. Nessas condições, as sementes apresentaram maior tolerância ao processo, com melhor manutenção da protrusão radicular e elevada viabilidade após a liofilização. O teor de 25% apresentou comportamento intermediário, podendo ser considerado uma condição possível, embora com desempenho inferior aos teores mencionados, em algumas avaliações. Por outro lado, os teores de umidade de 30 e 35% não são recomendados para a pré-secagem antes da liofilização, pois as sementes apresentaram baixa protrusão radicular, ausência de plântulas normais e menor viabilidade após o processo, indicando reduzida tolerância a esses teores de água. Apesar de ter a formação de plântulas normais comprometida, quando pré-secadas em sílica gel e liofilizadas nos teores de 12, 15, 20 e 25% de umidade, as sementes suportaram armazenamento por 6 meses, com valores de protrusão radicular entre 49% e 62% e valores de viabilidade entre 62% e 87% ao final do período.

Entre as limitações do estudo, destaca-se o fato da inexistência de estudos e protocolos previamente estabelecidos para a liofilização de sementes de café, o que tornou necessário o desenvolvimento e a adaptação da metodologia ao longo da pesquisa. Os resultados obtidos ampliam o conhecimento sobre a tolerância à dessecação e o potencial da liofilização para a conservação dessas sementes e indicam a necessidade de novos estudos voltados à otimização das condições de pré-secagem das sementes. Também são recomendados estudos que investiguem a possibilidade de congelamento das sementes antes da liofilização, bem como períodos mais prolongados e diferentes condições de armazenamento, buscando compreender os fatores que permitam preservar não apenas a viabilidade dos embriões, mas também a capacidade de formação de plântulas normais vigorosas.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ (ABIC). **Indicadores da Indústria de Café**. Disponível em: <https://www.abic.com.br/estatisticas/indicadores-da-industria/>. Acesso em: 12 ago. 2025.
- BARTOLOMEU, A. M. I. Liofilização: ciência ou arte? **Saber y Hacer**, v. 1, n. 1, p. 93–102, 2014. Disponível em: <https://revistas.usil.edu.pe/index.php/syh/article/view/31>. Acesso em: 12 ago. 2026.
- BOTELHO, C. E. *et al.* Cultivar de café MGS Paraíso 2: potencial de produtividade e qualidade na região do Sul de Minas Gerais. **EPAMIG Circular Técnica**, v. 338, p. 1–3, abr. 2021.
- BRANDÃO JUNIOR, D. S. *et al.* Tolerância à dessecação de sementes de cafeeiro (*Coffea arabica* L.). **Revista Brasileira de Sementes**, vol. 24, n. 2, p. 17-23, 2002.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA). Sumário executivo: café – julho 2025. In.: **Regras para Análise de Sementes (RAS)**. Brasília, DF: MAPA, 2025.
- CARVALHO, M. H. DE. **Aspectos fisiológicos e moleculares de sementes de *Coffea arabica* submetidas à secagem**. 2017. 74 p. Tese (Doutorado em Biotecnologia Vegetal), Escola de Ciências Agrárias - Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG, 2017.
- CARVALHO, N. M. DE; NAKAGAWA J. Sementes: ciência, tecnologia e produção. 5. Ed., **Jaboticabal: FUNEP**, 2012, 590 p.
- CHUMACERO, Julio S. *et al.* Conservación de camu camu (*Myrciaria dubia* [Kunth] McVaugh) por liofilización. **Información tecnológica**, v. 33, n. 5, p. 11–18, out. 2022.
- COELHO, S. V. B. *et al.* Alterações fisiológicas e bioquímicas em sementes de café secas em sílica gel e soluções salinas saturadas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 6, p. 483–491, jun. 2015.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de café. Safra 2024 - terceiro levantamento**. v.11, n. 3, 59 p., set. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-cafe/3o-levantamento-de-cafe-safra-2024>. Acesso em: 12 ago. 2026.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de café. Safra 2024, segundo levantamento**. v. 12, n. 2, 56 p., mai. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-cafe/2o-levantamento-de-cafe-safra-2025/2o-levantamento-de-cafe-safra-2025>. Acesso em: 12 ago. 2026.
- CORRÊA, J. P.; LANDGRAF, P. R. C.; REZENDE, T. T. Armazenamento da semente de café. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 14, p. e28111435945, 2022. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i14.35945>

COSTA, C. J. Armazenamento e conservação de sementes de espécies do Cerrado. Planaltina – DF: **Embrapa Cerrados**, n. 265, 30 p. 2009.

DADLANI, M.; YADAVA, D. K. Seed Science and Technology. **Springer Nature**, 430 p., 2023. ISBN 978-981-19-5888-5

DEDECCA D. M. Anatomia e desenvolvimento ontogenético de *Coffea arabica* L. var. *Typica* Cramer. **Bragantia: Boletim Técnico do Instituto Agrônomo do Estado de São Paulo**. v. 16, n. 23, dez. 1957.

DUSSERT, S. *et al.* Biologie de la conservation des semences de caféiers: Aspects fondamentaux et conséquences pratiques. Une revue. **Cahiers Agricultures**, v. 21, n. 2–3, p. 106–114, 2012.

EL-BACHÁ, A.; KIM, R. **Estudo do processo de secagem da polpa de açaí por liofilização e atomização**. 2014. 63 p. Trabalho de Conclusão de Curso II. Escola Politécnica - Universidade de São Paulo. São Paulo - SP, 18 ago. 2014.

ELLIS, Richard H. The longevity of seeds. **HortScience**, v. 26, n. 9, set. 1991.

FISSORE, D.; PISANO, R.; BARRESI, A. A. Applying quality-by-design to develop a coffee freeze-drying process. **Journal of Food Engineering**, v. 123, p. 179–187, 2014.

FREITAS, R. A. Armazenamento de Sementes de Hortaliças. In: X Curso sobre Tecnologia de Produção de Sementes de Hortaliças, 10., 2010, Brasília - DF. Palestras... **Embrapa Hortaliças**. jul. 2010.

GONÇALVES, O. M. DE A. R. **Estudo comparativo de processos de desidratação por liofilização e secagem convencional**. 2015. 142 p. Relatório de estágio (Mestrado em Tecnologia Química), Escola Superior de Tecnologia de Tomar - Instituto Politécnico de Tomar Tomar, 2015.

GUERREIRO FILHO, O. *et al.* Origem e classificação botânica do cafeeiro. In: **Cultivares de café: origem, características e recomendações**. Brasília, DF: Embrapa Café, p. 27–32, 2008.

HUANG, Y. *et al.* Desiccation and storage studies on three cultivars of Arabica coffee. **Seed Science and Technology**, v. 42, n. 1, p. 60–67, 1 abr. 2014.

JUCKERS, A. *et al.* Effect of the freezing step on primary drying experiments and simulation of lyophilization processes. **Processes**, v. 11, n. 5, 1 maio 2023.

LIMA, H. G. G. DE M. **Liofilização de alimentos com forma esférica: experimentação, modelagem e simulação**. 2021. 193 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Centro de Ciências e Tecnologia - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB. 28 dez. 2021.

MARCOS FILHO, J. Fisiología de Semillas de Plantas Cultivadas / Júlio Marcos-Filho; traducción: Daniel Ricardo Sosa Gomez. – 2 ed. – Londrina: PR: **ABRATES**, 2016, 663 p.: il.

MARQUES, E. C.; COSTA, S. R. R. DA. Estudo da liofilização pela engenharia de produto no processamento industrial de alimentos. **Acta Tecnológica**, v. 10, n. 1, p. 44–52, 2015.

MATIAS G. C. *et al.* Effect of storage conditions on the physical properties of coffee beans with different qualities. **Eureka: Life Sciences**, n. 5, 2023. <https://doi.org/10.21303/2504-5695.2023.003008>

MATIELLO, J. B. *et al.* Cultura de café no Brasil: manual de recomendações. 2015. ed. São Paulo: **Futurama Editora**, 2016.

MENDONÇA, A. P. L. DE. **Imagem digital para rápida avaliação do potencial de germinação de sementes de café**. 2023. 42 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal), Escola de Ciências Agrárias - Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG, 2023.

NASIRO, Kalifa. Arabica Coffee: Genetic Diversity, Conservation Challenges, and Breeding Approaches. **International Journal of Food Science and Biotechnology**. v. 9, n. 4, p. 80-106, 2024.

NOWAK, D.; JAKUBCZYK, E. The freeze-drying of foods - The characteristic of the process course and the effect of its parameters on the physical properties of food materials. **Foods**, v. 9, n. 10, 18 out. 2020.

NWANKWO, C. S. *et al.* Recent developments in the hybridization of the freeze-drying technique in food dehydration: A review on chemical and sensory qualities. **Foods**, v. 12, n. 18, 1 set. 2023.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO TRABALHO (OIT). Cadeia Produtiva do Café - Avanços e desafios rumo à promoção do trabalho decente: análise situacional. Genebra: **Organização Internacional do Trabalho**, 2024.

OLIVEIRA, A. C. B. DE *et al.* Cultivares de café resistentes à ferrugem: alternativa viável para a cafeicultura das Matas de Minas. **Embrapa Café**. Brasília, DF, 2021. Disponível em: <www.embrapa.br/fale-conosco/sac>

OLIVEIRA, J. A.; ROSA, S. D. V. F. DA; CARVALHO, E. R. Secagem de sementes. In: **Processamento pós-colheita de sementes: abordagem agrônômica visando aprimorar a qualidade**. 1. ed. Lavras, MG: Editora UFLA, v. 1, 2021, p. 67–93.

OLIVER, M. J.; TUBA, Z.; MISHLER, B. D. The evolution of vegetative desiccation tolerance in land plants. **Plant Ecology**, [S. l], v. 151, n. 1, p. 85-100, nov. 2000.

PHILLIPS, J. R.; OLIVER, M. J.; BARTELS, D. Molecular genetics of desiccation and tolerant systems. In: **Black M, Pritchard H, eds. Desiccation and survival in plants: drying without dying**. Wallingford, UK: CABI PUBLISHING, 2002, p. 319–341.

PEREIRA, D. R. *et al.* Morphoagronomic and sensory performance of coffee cultivars in initial stage of development in Cerrado Mineiro. **Coffee Science**, v. 14, n. 2, p. 193–205, 2019.

PIMENTA, C. J. **Qualidade de café**. 3. ed. Lavras: EDITORA UFLA, 2003, 304 p.

RENA, A. B.; MAESTRI, M. Fisiologia do cafeeiro. In: RENA, A. B. *et al.* **Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: Potafos, 1986, p. 13-85.

SALOMÃO, A. N.; GIMENES, M. A.; BRASILEIRO, A. C. M. Armazenamento e conservação de sementes convencionais e transgênicas. **Embrapa Circular Técnica 95**, Brasília, DF, nov. 2021.

SANO, N. *et al.* Staying alive: Molecular aspects of seed longevity. **Plant and Cell Physiology**, v. 57, n. 4, p. 660-674, 2016. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcv186>.

VEIGA, A. D. **Armazenabilidade de sementes de cafeeiro em diferentes estádios de maturação e submetidas a diferentes métodos de secagem**. 2005. 71 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia), Escola de Ciências Agrárias - Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG, 2005.