



BROUCHELOT ROLPH KESSEL JEAN

**SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA DE MANGA:
OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO E DA QUALIDADE
NUTRICIONAL DO PÓ**

**LAVRAS – MG
2026**

BROUCHELOT ROLPH KESSEL JEAN

**SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA DE MANGA: OTIMIZACAO DO
PROCESSO E DA QUALIDADE NUTRICIONAL DO PÓ**

Dissertação apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em processamento de produtos agrícolas, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Jefferson Luiz Gomes Correa
Orientador

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).**

Jean, Brouchelot Rolph Kessel.

Secagem em camada de espuma de manga: otimização do processo e da qualidade
nutricional do pó / Brouchelot Rolph Kessel Jean. - 2026.

62 p. : il.

Orientador: Jefferson Luiz Gomes Correa

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2026.
Bibliografia.

1. Manga. 2. Pó de frutas. 3. Agentes espumantes. 4. Etanol. 5. Valorização
agroindustrial. I. Gomes Correa, Jefferson Luiz. II. Universidade Federal de Lavras.
III. Título.

BROUCHELOT ROLPH KESSEL JEAN

**SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA DE MANGA: OTIMIZACAO DO
PROCESSO E DA QUALIDADE NUTRICIONAL DO PÓ**

**MANGO FOAM-MAT DRYING: PROCESS OPTIMIZATION AND
NUTRITIONAL QUALITY OF THE POWDER**

Dissertação apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em processamento de produtos agrícolas, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 03 de julho 2026

Dra. Paula Giarolla Silveira Banca Um	UFJF
Dr. Jefferson Luiz Gomez Correa Banca Dois	UFLA
Dr. Irineu Petri Junior	UFLA

Prof. Dr. Jefferson Luiz Gomes Correa
Orientador

LAVRAS – MG
2026

AGRADECIMENTOS

Agradeço, acima de tudo, a Deus, por Sua graça e presença ao longo de toda esta trajetória acadêmica. Sem o Seu amparo, muitos dos desafios enfrentados teriam sido muito mais difíceis de superar. Expresso minha profunda gratidão à minha família pelo amor, apoio incondicional e incentivo constante, que foram essenciais para o meu crescimento pessoal e profissional.

Deixo também o meu sincero agradecimento à minha noiva, Schneiders K. Dorvil, pela paciência, compreensão, presença constante e valiosa ajuda ao longo desta etapa. Seu companheirismo inabalável foi fundamental para a realização deste trabalho e para a conclusão deste ciclo acadêmico.

Agradeço à Universidade Federal de Lavras (UFLA), ao Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA/UFLA) pelo excelente ambiente acadêmico, pelos conhecimentos transmitidos e pelas oportunidades oferecidas durante a minha formação. Estendo meus agradecimentos à FAPEMIG, à CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro concedido para a realização deste mestrado.

Agradeço, de forma especial, ao meu orientador, Jefferson Luiz Gomes Corrêa, pela orientação, paciência, disponibilidade e pelo lado humano demonstrado ao longo desta pesquisa, mesmo nos momentos mais desafiadores. Sua mentoria fez do meu mestrado uma das experiências mais enriquecedoras da minha vida, proporcionando um ambiente de trabalho acolhedor, respeitoso e agradável.

Agradeço também à professora Débora pelo auxílio com a língua portuguesa e pelos ensinamentos compartilhados. Da mesma forma, agradeço aos meus amigos e colegas Santiago Velásquez Rubio, Edna Jeraldly Suarez Cardozo, Alejandra Salazar Cañas, Brumaire Jerry, Evens Clairvil, Lucas Caiafa, Matheus Robin e Matheus Felipe pela convivência, incentivo e apoio ao longo desta jornada.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. A todos vocês, o meu mais sincero agradecimento.

RESUMO

A manga (*Mangifera indica* L.) da variedade Tommy Atkins é uma fruta tropical de elevada importância nutricional e econômica, destacando-se pelo seu conteúdo de β -caroteno, vitamina C e compostos fenólicos. No entanto, sua alta perecibilidade resulta em perdas pós-colheita significativas, tornando necessária a adoção de tecnologias que permitam sua conservação e agregação de valor. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo produzir pó de manga estável por meio da secagem em camada de espuma (SCE), avaliando o efeito de diferentes agentes espumantes e da adição de etanol sobre a cinética de secagem e as propriedades físico-químicas do produto. Inicialmente, as formulações das espumas foram otimizadas por meio de um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), utilizando albumina e *whey protein* como agentes espumantes e goma xantana como estabilizante. As condições ótimas obtidas foram 8,02% de *whey protein* sem adição de goma xantana e 7,13% de albumina associada a 0,54% de goma xantana, resultando em espumas com baixa densidade e elevada estabilidade. A secagem foi realizada em secador convectivo tipo túnel nas temperaturas de 50 °C e 70 °C, com e sem aplicação de etanol. Os resultados demonstraram que o aumento da temperatura e a adição de etanol aceleraram significativamente a remoção de água, reduzindo o tempo de secagem em até 40% para a formulação contendo *whey protein* a 70 °C. Os pós obtidos foram caracterizados quanto ao teor e atividade de água, solubilidade e parâmetros de cor. Os tratamentos com etanol apresentaram menor teor de umidade residual e melhor desempenho de secagem, contribuindo para a obtenção de pós com características adequadas para armazenamento e aplicação industrial. A formulação contendo *whey protein* associada ao etanol apresentou os resultados mais promissores em termos de eficiência do processo. Conclui-se que a combinação da secagem em camada de espuma com a aplicação de etanol constitui uma estratégia eficiente para a produção de pó de manga com propriedades físico adequadas, contribuindo para a valorização agroindustrial da fruta e para a redução das perdas pós-colheita.

Palavras-chave: manga; pó de frutas; agentes espumantes; etanol; propriedades físicas; valorização agroindustrial.

ABSTRACT

Tommy Atkins mango (*Mangifera indica* L.) is a tropical fruit of high nutritional and economic importance, distinguished by its content of β -carotene, vitamin C, and phenolic compounds. However, its high perishability results in significant postharvest losses, making it necessary to adopt technologies that enable its preservation and value addition. In this context, the present study aimed to produce stable mango powder through foam-mat drying (FMD), evaluating the effects of different foaming agents and ethanol addition on drying kinetics and the physicochemical properties of the final product. Initially, the formulations were optimized using a Central Composite Rotational Design (CCRD), employing albumin and whey protein as foaming agents and xanthan gum as a stabilizer. The optimal conditions obtained were 8.02% whey protein without xanthan gum addition and 7.13% albumin associated with 0.54% xanthan gum, resulting in foams with low density and high stability. Drying was carried out in a convective tunnel dryer at temperatures of 50 °C and 70 °C, with and without ethanol application. The results demonstrated that increasing temperature and adding ethanol significantly accelerated water removal, reducing drying time by up to 43% for the whey protein containing formulation at 70 °C. The powders obtained were characterized in terms of moisture content, water activity, solubility, hygroscopicity, and color parameters. The ethanol-treated samples exhibited lower residual moisture content and improved drying performance, contributing to the production of powders with characteristics suitable for storage and industrial applications. The formulation containing whey protein combined with ethanol showed the most promising results in terms of process efficiency. It was concluded that the combination of foam-mat drying and ethanol application constitutes an efficient strategy for producing mango powder with suitable physical properties, contributing to the agro-industrial valorization of the fruit and to the reduction of postharvest losses.

Keywords: mango; fruit powder; foaming agents; ethanol; physical properties; agro-industrial valorization.

INDICADORES DE IMPACTO

O presente trabalho apresenta impacto principalmente tecnológico, econômico, ambiental e potencialmente social, associado ao desenvolvimento e à otimização de uma tecnologia para a conservação e valorização da manga Tommy Atkins. Os resultados demonstraram que a secagem em camada de espuma, associada ao uso de diferentes agentes espumantes e ao pré-tratamento com etanol, constitui uma alternativa tecnológica promissora para a transformação da polpa de manga em pó estável. A otimização das formulações resultou em condições de 8,02% de whey protein sem adição de goma xantana e 7,13% de albumina associada a 0,54% de goma xantana, enquanto a utilização de etanol e o aumento da temperatura de 50 para 70 °C favoreceram a remoção de água e reduziram o tempo de secagem em até 40% na formulação com whey protein a 70 °C. Esses resultados representam impacto tecnológico concreto no âmbito experimental, ao demonstrar condições capazes de aumentar a eficiência do processo e produzir pós com características físicas adequadas para armazenamento e potencial utilização pela indústria de alimentos. O impacto econômico é potencial e está relacionado à agregação de valor à manga, à possibilidade de ampliar sua vida útil, reduzir perdas pós-colheita e facilitar o armazenamento, transporte e utilização da matéria-prima em produtos como bebidas, sobremesas e produtos de panificação. O impacto ambiental também é potencial, considerando a possibilidade de reduzir perdas de frutas e otimizar o aproveitamento de matérias-primas agrícolas. O território potencialmente impactado compreende a cadeia produtiva e agroindustrial da manga, incluindo produtores rurais, unidades de processamento, agroindústrias e consumidores, especialmente em regiões produtoras de frutas tropicais. Não foram realizadas, no âmbito desta dissertação, ações extensionistas formais com participação direta da sociedade externa à UFLA; portanto, os impactos sociais e extensionistas são considerados potenciais. O trabalho está relacionado principalmente às áreas temáticas de Tecnologia e Produção, Meio Ambiente e Trabalho da Política Nacional de Extensão e apresenta alinhamento com os ODS 2: Fome Zero e Agricultura Sustentável; ODS 8: Trabalho Decente e Crescimento Econômico; ODS 9: Indústria, Inovação e Infraestrutura e ODS 12: Consumo e Produção Responsáveis, ao contribuir para a inovação tecnológica, a valorização de produtos agrícolas, a redução de perdas pós-colheita e o desenvolvimento de alternativas para o processamento sustentável de frutas.

IMPACT INDICATORS

The present study presents mainly technological, economic, environmental, and potentially social impacts associated with the development and optimization of a technology for the conservation and valorization of ‘Tommy Atkins’ mango. The results demonstrated that foam-mat drying, combined with the use of different foaming agents and ethanol pretreatment, constitutes a promising technological alternative for transforming mango pulp into a stable powder. The optimization of the formulations resulted in conditions of 8.02% whey protein without the addition of xanthan gum and 7.13% albumin combined with 0.54% xanthan gum, while the use of ethanol and the increase in temperature from 50 to 70 °C favored water removal and reduced drying time by up to 40% in the formulation with whey protein at 70 °C. These results represent a concrete technological impact at the experimental level by demonstrating conditions capable of increasing process efficiency and producing powders with physical characteristics suitable for storage and potential use by the food industry. The economic impact is potential and is related to adding value to mango, the possibility of extending its shelf life, reducing postharvest losses, and facilitating the storage, transportation, and use of the raw material in products such as beverages, desserts, and bakery products. The environmental impact is also potential, considering the possibility of reducing fruit losses and optimizing the use of agricultural raw materials. The potentially impacted territory encompasses the mango production and agro-industrial chain, including rural producers, processing units, agro-industries, and consumers, particularly in tropical fruit-producing regions. No formal extension activities involving direct participation of society outside UFLA were carried out within the scope of this dissertation; therefore, the social and extension impacts are considered potential. The study is mainly related to the thematic areas of Technology and Production, Environment, and Work of the Brazilian National Extension Policy and is aligned with SDG 2 – Zero Hunger and Sustainable Agriculture, SDG 8, Decent Work and Economic Growth, SDG 9 – Industry, Innovation and Infrastructure, and SDG 12 – Responsible Consumption and Production, by contributing to technological innovation, the valorization of agricultural products, the reduction of postharvest losses, and the development of alternatives for sustainable fruit processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Culturas dominantes	8
Figura 2- Fluxograma geral do processo de secagem em camada de espuma.	14
Figura 3- Estrutura e dinâmica da espuma	16
Figura 4- Esquema das etapas de fabricação e avaliação do pó de manga.....	26
Figura 5- Superfície de resposta referente à otimização da espuma com whey protein e goma xantana em relação a densidade.	27
Figura 6- Superfície de resposta referente à otimização da espuma com albumina e goma xantana em relação a densidade.	29
Figura 7- Superfície de resposta referente à otimização da espuma com whey protein e goma xantana em relação à estabilidade	30
Figura 8- Superfície de resposta referente à otimização da espuma com albumina e goma xantana em relação à estabilidade	31
Figura 9- Cinética de secagem a 50 °C ajustada ao modelo de Midilli para espumas de albumina e whey protein com e sem etanol.	34
Figura 10- Cinética de secagem a 70 °C ajustada ao modelo de Midilli para espumas de albumina e whey protein com e sem etanol	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção nacional de mangas em Tonelada.....	5
Tabela 2 - Exportações de mangas por estado produtor.	7
Tabela 3- Massa de agente espumante e de estabilizante em espuma de purê de manga.	21
Tabela 4- Descrição dos tratamentos utilizados nos ensaios de secagem.	23
Tabela 5 - Coeficientes dos modelos quadráticos ajustados para densidade e estabilidade das espumas.....	32
Tabela 6 - Condições ótimas obtidas para a espuma com albumina e com whey protein.	33
Tabela 7 - Coeficientes dos modelos de secagem.	36
Tabela 8 - Características Físicas dos Pós com albumina em duas temperaturas	38
Tabela 9 - Características Físicas dos Pós com whey protein em duas temperaturas	38
Tabela 10 - Parâmetros colorimétricos com albumina em duas temperaturas.	39
Tabela 11 - Parâmetros colorimétricos com o whey protein em duas temperaturas.	39

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO	3
2.1 Objetivo Geral	3
2.2 Objetivos Específicos	3
3. REFERÊNCIAL TEÓRICO	4
3.1. Manga	4
3.2. Produção de manga no Brasil	4
3.3. Exportações de mangas pelo Brasil	6
3.4. Situação da cultura da manga no Haiti	7
3.4.1. Perdas pós-colheita devido à rejeição pelo mercado	8
3.4.2. Conservação pós-colheita de manga.....	9
3.5. Secagem de alimentos	10
3.6. Técnicas de secagem	11
3.6.1. Secagem convectiva	11
3.6.1.1. Secagem por camada espuma (SCE)	11
3.6.2. Secagem osmótica	13
3.6.3. Liofilização	13
3.7. Pré-tratamento com etanol.....	15
3.8. Formação da espuma e dinâmica da secagem	15
3.9. Agentes espumantes e estabilizantes	16
3.9.1. Albumina	17
3.9.2. Whey protein	17
3.9.3. Isolado proteico de soja (SPI).....	18
3.9.4. Albumina espumante de guar (GFA).....	18
3.9.5. Estabilizantes polissacarídicos	18
3.10. Características físico-químicas do pó obtido.....	18
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
4.1. Matéria-prima	20
4.2. Preparo da matéria	20
4.3. Preparação da espuma	20
4.4. Definição e otimização das formulações	20

4.5. Análise da densidade	21
4.6. Estabilidade	22
4.7. Secagem em camada de espuma (SCE) de manga com e sem etanol	22
4.8. Análises do pó	23
4.8.1. Atividade de água (a_w).....	24
4.8.2. Teor de Umidade	24
4.8.3. Análise da cor	24
4.8.4. Solubilidade	24
4.9. Análise estatística	24
4.10. Etapas do processo de trabalho com um fluxograma	25
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
5.1. Otimização das espumas.....	27
5.2. Cinética e modelagem matemática da secagem a 50 °C da albumina e whey protein com e sem etanol	33
5.3. Cinética e modelagem matemática da secagem a 70 °C da albumina e whey protein com e sem etanol	35
5.4. Propriedades físicas dos pós	38
5.5. Parâmetros colorimétricos dos pós	39
6. CONCLUSÃO.....	41
7. REFERÊNCIAS	42

1. INTRODUÇÃO

As frutas são reconhecidas como elementos essenciais de uma alimentação equilibrada. Seu consumo regular e adequado desempenha um papel determinante na prevenção de diversas patologias. Assim, a promoção de uma produção aumentada, garantindo tanto sua disponibilidade quanto sua acessibilidade econômica e física, bem como o estímulo ao seu consumo, constitui atualmente uma prioridade mundial (Mandal & Thokchom, 2017).

Entre as frutas tropicais mais apreciadas, a manga (*Mangifera indica* L.) ocupa uma posição de destaque. Ela está em quinto lugar entre as frutas mais produzidas e comercializadas no mundo, atrás da banana, da uva, da laranja e da maçã (Drabo et al., 2022). Este fruto apresenta um interesse nutricional considerável devido à sua riqueza em β -caroteno, um poderoso antioxidante e precursor da vitamina A, bem como em vitamina C, compostos fenólicos, minerais e fibras alimentares (Chaux-Gutiérrez et al., 2017; Kumar et al., 2022). Graças a essa composição, a manga é apreciada não apenas por suas qualidades sensoriais, mas também por seu valor econômico e seus benefícios à saúde. De acordo com Evans et al. (2017) e Kiloos et al. (2022), a manga está entre as frutas mais consumidas no mundo, tanto *in natura* quanto na forma processada. Ela se presta, de fato, a diversas formas de consumo: suco, néctar, purê, entre outras (Ricci et al., 2025).

No Brasil, a manga é uma das principais frutas cultivadas e exportadas, ocupando uma posição estratégica na economia agrícola. O país está entre os maiores produtores mundiais. Em 2005, a produção era estimada em cerca de 850 mil toneladas em uma área de aproximadamente 73 mil hectares, enquanto a produção nacional ultrapassou 1,2 milhão de toneladas em 2023. A região do Vale do São Francisco, no Nordeste semiárido, concentra mais de 90% das exportações brasileiras de manga (Anuário de Frutas Brasileiras, 2025). Essa relevância econômica e o potencial exportador da cultura também se refletem em outras nações das Américas, como no Haiti, onde a manga representa o segundo produto agrícola de exportação mais importante, atrás apenas do café (Brunache, 2024). No cenário haitiano, o comércio de variedades como a 'Madame Francisque' desempenha um papel crucial tanto para a economia nacional quanto para a segurança alimentar das populações rurais durante o período de safra (Jayaram, 2018).

Como fruto climatérico, a manga apresenta vida útil de apenas 5 a 9 dias em temperatura ambiente, o que dificulta sua comercialização, especialmente durante o pico de produção, quando o excesso de oferta aumenta as perdas. Além disso, o processamento industrial gera até 60% de resíduos orgânicos (casca e caroço), ocasionando perdas econômicas e impactos ambientais (Rechsteiner et al., 2025). Essas limitações globais evidenciam a necessidade de desenvolver estratégias de valorização e de adotar métodos eficazes de conservação pós-colheita, a fim de prolongar a vida útil do fruto e otimizar o aproveitamento da matéria-prima.

A secagem é um dos métodos de conservação mais antigos e amplamente utilizados. Ao reduzir o teor de água dos alimentos, permite prolongar sua vida útil, limitando reações químicas e enzimáticas, além de inibir o desenvolvimento microbiano. Entre outras vantagens, destacam-se a redução do volume e do peso dos produtos, facilitando o transporte, a disponibilidade fora da estação, bem como a diminuição dos custos relacionados ao manuseio (Sultana et al., 2024).

A secagem em camada de espuma (SCE) é considerada um dos métodos mais econômicos e consiste na transformação de um produto líquido em uma espuma estável antes de sua secagem ao ar (Sansomchai, 2023). Nesse contexto, a transformação da manga em pó surge como uma solução tecnológica promissora. Graças ao seu baixo teor de água e à sua estabilidade, o pó de manga oferece diversas aplicações na indústria alimentícia, ao mesmo tempo em que reduz as perdas pós-colheita (Kumar et al., 2022). Além disso, apresenta vantagens econômicas e logísticas, como melhor conservação, redução dos custos de transporte e flexibilidade para formulações inovadoras em novos mercados (Sansomchai et al., 2022).

Apesar dos avanços nas pesquisas sobre a secagem de manga em camada de espuma, poucos estudos avaliam simultaneamente a influência dos agentes espumantes, como a albumina e o *whey protein*, bem como das condições de secagem, sobre as propriedades físicas do pó de manga, especialmente para a variedade 'Tommy Atkins'. Ademais, a aplicação de aditivos voláteis, como o etanol, surge como uma estratégia promissora para acelerar a cinética de secagem e reduzir a demanda térmica do processo.

2. OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Investigar a aplicação da técnica de secagem em camada de espuma (SCE), utilizando diferentes agentes espumantes e etanol, na obtenção de pó de manga estável, visando à redução do tempo de secagem e à melhoria das propriedades físico-químicas do produto.

2.2 Objetivos Específicos

- Identificar as melhores condições operacionais, por meio de um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), para a formação de espumas estáveis e de baixa densidade, adequadas à aplicação na secagem em camada de espuma (SCE);
- Comparar o uso da albumina e de whey protein como agentes espumantes, quanto aos parâmetros de densidade e estabilidade das espumas;
- Comparar a influência da secagem convectiva em túnel, com e sem o uso de etanol, em duas temperaturas, sobre as características físicas do pó (atividade de água, teor de água, solubilidade e cor), bem como sobre o tempo de secagem.

3. REFERÊNCIAL TEÓRICO

3.1. Manga

A manga (*Mangifera indica* L.) é uma das frutas tropicais mais populares. É fonte de fibras, compostos fenólicos e vitaminas, como a vitamina C e a pró-vitamina A (β -caroteno), além de minerais como cálcio, fósforo e ferro (Do Carmo et al., 2022). A manga apresenta elevada aceitação pelos consumidores devido às suas características sensoriais e ao seu conteúdo nutricional, destacando-se a presença de carotenoides e outros compostos bioativos de interesse funcional (Vanoli et al., 2024).

A cultivar Tommy Atkins é a mais consumida no mundo, sendo considerada a principal cultivar comercial (Ferreira et al., 2020). A maior resistência mecânica e térmica desse fruto durante o transporte, o tempo prolongado de armazenamento e a boa tolerância da variedade à antracnose e a processos tecnológicos, como a indução floral e o estresse hídrico, fazem com que essa cultivar seja preferida pelos produtores rurais (Burton-Freeman; Sandhu; Edirisinghe, 2017).

Apesar do alto valor nutricional, a manga apresenta elevada perecibilidade. Sua deterioração pode ocorrer em razão da ação de microrganismos, das reações enzimáticas e dos processos oxidativos. Embora o congelamento seja utilizado como método de conservação, os elevados custos energéticos e a ausência de estruturas apropriadas em determinadas regiões rurais restringem a aplicação dessa técnica (Amit et al., 2017). Nesse contexto, torna-se importante o desenvolvimento de outras formas de conservação. As técnicas de desidratação surgem como uma alternativa eficiente, pois permitem a obtenção de produtos com propriedades físico-químicas e sensoriais próximas às observadas na fruta in natura (Abrahão; Corrêa, 2021).

3.2. Produção de manga no Brasil

O Brasil é um dos maiores produtores de manga do mundo. Com uma produção de 1,8 milhão de toneladas em 2023, ocupa a sexta posição no ranking mundial, atrás da Índia (26 milhões de toneladas), Indonésia (4,1 milhões de toneladas), China (3,8 milhões de toneladas), Paquistão (2,8 milhões de toneladas) e México (2,5 milhões de toneladas) (Rosendo, 2024). O desempenho desse setor se explica por condições agroclimáticas favoráveis, associadas à vasta extensão de terras cultiváveis, o que

favorece o planejamento dos ciclos de produção e garante um fornecimento contínuo ao longo de todo o ano.

Segundo Rosendo (2024), além de se destacar pelo volume de produção, a região Nordeste também se sobressai em termos de produtividade. A média regional alcança 30 toneladas por hectare, podendo chegar a 50 toneladas por hectare em áreas de cultivo mais intensivo, enquanto a média nacional gira em torno de 20 toneladas por hectare.

As principais variedades de manga produzidas no Brasil são: Tommy Atkins, muito valorizada para exportação devido à sua resistência e boa conservação, sendo a variedade mais comercializada no país; Palmer, apreciada por sua doçura e baixo teor de fibras, cuja popularidade tem crescido ao longo dos anos; Haden, variedade tradicional conhecida por seu sabor marcante; e Keitt e Kent, valorizadas em mercados de alto padrão devido ao sabor e à textura diferenciados.

A produção de mangas no Brasil possui grande importância econômica, gerando divisas para o país e criando e mantendo milhares de empregos. Ao longo da última década, o país passou por uma transformação significativa em sua cadeia produtiva da manga. Em menos de dez anos, o Brasil dobrou sua área plantada, ao mesmo tempo em que investiu fortemente em tecnologias agrícolas inovadoras. Esses esforços permitiram aumentar a densidade dos pomares, otimizando a produtividade por hectare. Os dados de produção nacional, detalhados por estado, estão apresentados na Tabela 1 (Abrafrutas, 2024). Eles evidenciam as disparidades regionais e os principais polos de produção.

Tabela 1 - Produção nacional de mangas em Tonelada.

Estado	2020	2021	2022	2023
Bahia	539089	633151	666824	704173
Pernambuco	534611	444750	511148	60475
São Paulo	216463	164326	197322	212225
Minas Gerais	91203	101931	93850	94310
Ceará	48173	42477	46377	42596
Rio Grande do Norte	44029	43848	43641	41611
Sergipe	18113	21234	14297	13968
Espírito Santo	13489	12465	11961	11761
Total	1546933	1505372	1622757	1758118

Fonte: Dados retrabalhados da ABRAFRUTAS (2024)

Segundo Oliveira et al. (2014), o vale submédio do rio São Francisco, localizado na zona semiárida do Nordeste brasileiro, é responsável por mais de 93% das

exportações nacionais de mangas, principalmente da variedade Tommy Atkins, que continua sendo a mais cultivada nessa região.

Embora a manga tenha grande importância econômica para o vale do rio São Francisco e para o Brasil, o manejo da fertilização potássica nessa cultura ainda é objeto de debate na literatura científica. Comercialmente, essa prática geralmente não é ajustada de acordo com o cultivar, apesar das diferenças nas exigências nutricionais observadas, especialmente nas variedades Keitt (Almeida et al., 2015), Palmer (Cavalcante et al., 2016) e Tommy Atkins (Carneiro et al., 2017).

3.3. Exportações de mangas pelo Brasil

As mangas ocupam um lugar estratégico nas exportações agroalimentares do Brasil, reforçando a posição do país entre os líderes mundiais desse setor. Reconhecidas pela sua qualidade excepcional, diversidade e sabor único, as mangas brasileiras conquistam amplamente os mercados internacionais.

Segundo as estatísticas publicadas pela ABRAFRUTAS em 2024, cerca de 16% da produção nacional de mangas é destinada à exportação, enquanto 84% são consumidas no mercado interno. A região Nordeste domina amplamente as exportações, representando aproximadamente 96% do volume total, graças à qualidade superior dos frutos e ao cumprimento das normas fitossanitárias. Os estados da Bahia e de Pernambuco se destacam como os principais exportadores, com participações respectivas de 47,36% e 45,42%.

A União Europeia representa o principal destino das mangas brasileiras, com uma parte significativa direcionada aos Países Baixos (45,3% em 2023), especialmente devido à importância estratégica do porto de Roterdã. Os Estados Unidos ocupam a segunda posição entre os importadores, com 18,35% dos volumes, seguidos pela Espanha (17,93%), pelo Reino Unido (6,06%) e por Portugal (3,95%) (Rosendo, 2024).

O dinamismo das exportações brasileiras de mangas baseia-se em condições climáticas particularmente favoráveis. A região, especialmente o vale do São Francisco, beneficia-se de uma intensa incidência solar, de abundantes recursos hídricos e de sistemas de irrigação eficientes. Esses atributos naturais, aliados a investimentos contínuos em tecnologias de produção, infraestrutura de transporte e ao rigoroso cumprimento das normas internacionais, garantem a alta qualidade dos frutos destinados à exportação.

O mercado mundial da manga apresenta um crescimento constante, impulsionado pelo interesse crescente por alimentos saudáveis e exóticos. Nesse contexto, o Brasil possui um forte potencial para ampliar sua participação no mercado, explorando novos destinos comerciais e otimizando sua cadeia produtiva. (Cesar, 2025).

Os dados apresentados na Tabela 2 ilustram-se os volumes de exportação por estado produtor.

Tabela 2 - Exportações de mangas por estado produtor.

Estado	2020	2021	2022	2023
Bahia	114009	125190	106597	1226011
Pernambuco	98176	120547	104233	120861
São Paulo	10532	9887	7992	8646
Rio Grande do Norte	9144	8193	8195	6771
Ceará	3323	3081	2076	2103
Paraná	1142	2449	736	482
Goiás	4127	276	32	-
Rio Grande do Sul	2255	1155	211	260
Total	243226	272560	231364	266095

Fonte: Dados retrabalhados da ABRAFRUTAS (2024)

3.4. Situação da cultura da manga no Haiti

A manga desempenha papel importante na agricultura e na economia do Haiti, sendo considerada o segundo principal produto agrícola de exportação do país (Brunache, 2024). A variedade Madame Francisque destaca-se como a principal destinada ao mercado norte-americano, contribuindo significativamente para a geração de renda nas áreas rurais haitianas.

Apesar da importância econômica da cultura, a cadeia produtiva da manga enfrenta diversos desafios relacionados às perdas pós-colheita, aos danos mecânicos durante o transporte e às limitações da infraestrutura de conservação (Le et al., 2022). Além disso, fatores como armazenamento inadequado e transporte tradicional favorecem a deterioração da qualidade dos frutos (Miranda et al., 2023).

A produção de manga também possui grande relevância social para as comunidades rurais do Haiti, especialmente nas regiões do norte do país, onde essa atividade agrícola representa uma importante fonte de trabalho e subsistência (Jayaram, 2018). Na Figura 1 apresentam-se as regiões de concentração das culturas dominantes no Haiti.

Figura 1- Culturas dominantes



Fonte: MARNDR, FAO, ESTATÍSTICA 2019

3.4.1. Perdas pós-colheita devido à rejeição pelo mercado

Estudos recentes evidenciam que as perdas pós-colheita da manga ocorrem em diferentes etapas da cadeia de distribuição, incluindo armazenamento, transporte, comercialização e exposição nos pontos de venda (Le et al., 2022). Danos mecânicos durante o transporte, vibrações e condições inadequadas de manuseio contribuem significativamente para a deterioração da qualidade dos frutos e para o aumento das perdas econômicas (Al-Dairi et al., 2022).

Além disso, a rejeição comercial causada pela perda da qualidade visual e sensorial faz com que uma parcela considerável da produção de manga não alcance o consumidor final, comprometendo a competitividade e a rentabilidade da cadeia produtiva (Tarekegn; Kelem, 2022).

Diversos estudos recentes confirmam a magnitude das perdas pós-colheita durante a comercialização da manga. Segundo Le et al. (2022), grande parte das perdas ocorre nas etapas de distribuição, armazenamento e venda ao consumidor, principalmente devido às condições inadequadas de conservação e manuseio dos frutos. De forma semelhante, Al-Dairi et al. (2022) destacam que danos mecânicos provocados durante o transporte e a exposição nos pontos de venda comprometem significativamente a qualidade comercial da manga. Além disso, Tarekegn e Kelem (2022) observaram que as perdas são mais expressivas nos estabelecimentos comerciais

e mercados varejistas, onde a deterioração física e sensorial dos frutos reduz sua aceitação pelo consumidor.

Nesse contexto, destaca-se que o Brasil ocupa posição de destaque entre os principais produtores e exportadores de manga no cenário mundial. Uma parcela significativa das exportações brasileiras é destinada aos mercados da Europa e da América do Norte, onde os padrões de qualidade são particularmente rigorosos. Tais exigências contribuem para a geração de perdas expressivas ao longo das etapas de produção e comercialização.

Adicionalmente, o mercado varejista brasileiro também estabelece critérios rigorosos de qualidade. Em conjunto com as exigências do mercado internacional, tais critérios resultam na exclusão de uma parcela significativa da produção de manga, mesmo quando os frutos ainda se encontram próprios para o consumo. Estima-se que cerca de 30% a 40% das mangas colhidas no Brasil sejam perdidas após a colheita, principalmente em decorrência dos elevados padrões de qualidade exigidos pelos mercados externos e de práticas inadequadas de manejo pós-colheita (Cesar, 2025).

Dessa forma, a análise das perdas materiais e econômicas nas diferentes etapas da cadeia de comercialização torna-se fundamental para a formulação de políticas públicas e estratégias privadas voltadas à melhoria da eficiência do sistema de comercialização, bem como para o fortalecimento da competitividade da cadeia produtiva da manga.

3.4.2. Conservação pós-colheita de manga

A conservação pós-colheita da manga depende de diversos fatores relacionados às etapas de colheita, transporte, armazenamento e comercialização, os quais influenciam diretamente a qualidade e a vida útil dos frutos (Le et al., 2022). Entre os principais fatores que afetam a qualidade pós-colheita destacam-se os danos mecânicos durante o transporte, as condições inadequadas de armazenamento e o manuseio incorreto dos frutos (Al-Dairi et al., 2022).

Além disso, fatores bióticos e abióticos, como patógenos, alterações fisiológicas e condições inadequadas de conservação, podem reduzir significativamente a qualidade pós-colheita da manga (Miranda et al., 2023). Dessa forma, a adoção de práticas adequadas de colheita, armazenamento e comercialização é essencial para reduzir as perdas pós-colheita e aumentar a disponibilidade de frutos com melhor qualidade para o mercado consumidor (Tarekegn; Kelem, 2022).

A secagem surge, portanto, como uma alternativa eficaz para prolongar a vida útil deste produto, sendo uma das técnicas mais antigas e amplamente utilizadas para a conservação de frutas. Entre os métodos disponíveis, a secagem convectiva por ar quente destaca-se pela sua ampla aplicação na indústria agroalimentar, devido à sua simplicidade, baixo custo e facilidade de operação em larga escala. Esse processo baseia-se na transferência de calor por convecção entre o ar quente e a superfície do alimento, promovendo a evaporação da água superficial e a subsequente migração da umidade interna (Yu et al., 2026). No entanto, apesar dessas vantagens, a secagem convectiva apresenta limitações, como longos tempos de processamento a altas temperaturas, o que a torna energeticamente intensiva e pode provocar a degradação de vitaminas, antioxidantes e outros compostos bioativos, além de causar alterações nas propriedades sensoriais, como cor, sabor e textura (Chaux-Gutiérrez et al., 2017; Yu et al., 2026).

3.5. Secagem de alimentos

A secagem é um processo de conservação de alimentos que remove a água de um material por evaporação, resultando em um produto seco e estável (Nowacka et al., 2023; Wang et al., 2023). Frutas e vegetais contêm elevados níveis de umidade, o que os torna altamente suscetíveis à deterioração microbiana e à degradação da qualidade (Miletić & Nićetin, 2023). A desidratação melhora a estabilidade dos alimentos ao reduzir a atividade de água (a_w), inibindo o crescimento microbiano e prolongando significativamente a vida útil. Além disso, a secagem reduz o peso e o volume dos produtos, facilitando o armazenamento, a embalagem e o transporte, além de promover alterações nas características de sabor e aroma (Yao et al., 2020; Gao et al., 2023).

A secagem envolve simultaneamente um processo de transferência de calor, responsável pela evaporação da água, e um processo de transferência de massa, correspondente à migração da umidade do interior do material para sua superfície (Khan et al., 2022; Li et al., 2023). Essa técnica é geralmente classificada em três tipos principais: convectiva, condutiva e radiativa (Nowacka et al., 2023). Entre elas, a secagem convectiva é a mais amplamente utilizada na indústria agroalimentar devido à sua eficiência e ao uso do ar quente como fluido de transferência de calor (Jimoh et al., 2023).

No entanto, a baixa condutividade térmica dos alimentos limita a transferência de calor para o interior do produto. Temperaturas elevadas e tempos de secagem prolongados podem alterar a cor, o sabor e a capacidade de reidratação dos produtos

(Kroehnke et al., 2021). A eficiência da secagem depende fortemente do tempo de processamento e da quantidade de água a ser removida. A redução da temperatura pode melhorar a qualidade do produto, mas frequentemente aumenta o tempo e o custo do processo (Khubber et al., 2020).

Para otimizar o processo, diferentes pré-tratamentos e métodos de secagem de baixa energia tem sido desenvolvidos, incluindo a desidratação osmótica como pré-tratamento de frutas (Corrêa et al., 2017; Mendonça et al., 2017; Fernandes et al., 2019; Yao et al., 2020).

3.6. Técnicas de secagem

A secagem permite estabilizar um produto nos níveis físico-químico e microbiológico ao reduzir sua atividade de água através de uma dupla transferência de massa e calor (Bimbenet.; Duquenoy.; Trystram.; 2002).

3.6.1. Secagem convectiva

A secagem convectiva é uma das técnicas mais empregadas na conservação de alimentos devido à sua simplicidade operacional, baixo custo e ampla aplicação industrial. O processo baseia-se na transferência de calor do ar aquecido para o produto, promovendo a evaporação da água e sua remoção por transferência de massa (Bimbenet; Duquenoy; Trystram, 2002; Mujumdar, 2006).

A eficiência da secagem depende principalmente das condições do ar de secagem e das propriedades do alimento. O aumento da temperatura acelera a remoção de umidade, porém a exposição prolongada ao calor pode causar degradação de compostos bioativos, alterações de cor e redução da qualidade sensorial dos produtos (Chandramohan, 2020; Khatri et al., 2024).

Como alternativa para minimizar essas limitações, a secagem em camada de espuma (*foam-mat drying*) promove maior área superficial de evaporação e melhora a transferência de calor e massa, contribuindo para a redução do tempo de secagem e melhor preservação da qualidade do produto final (Khatri et al., 2024; Kalambe; Guhe, 2025).

3.6.1.1. Secagem por camada espuma (SCE)

A secagem em camada de espuma (*foam-mat drying*) é uma técnica de desidratação desenvolvida inicialmente por Morgan et al. (1959) e posteriormente

patenteada em 1961, com o objetivo de transformar alimentos líquidos ou semilíquidos em pós estáveis por meio da formação de uma espuma antes da etapa de secagem. O processo consiste na incorporação de agentes espumantes e, em alguns casos, estabilizantes, que promovem a formação de uma estrutura porosa com elevada área superficial, facilitando a remoção da água durante a secagem (Morgan; Supplee; Campbell, 1959; Kadam; Balasubramanian, 2011).

Durante a SCE, a estrutura aerada da espuma aumenta a superfície de contato entre o produto e o ar de secagem, reduzindo a resistência à transferência de calor e massa. Consequentemente, ocorre uma aceleração da evaporação da água e redução do tempo de processamento em comparação com a secagem convencional de líquidos ou purês alimentícios. Além disso, a estrutura porosa formada após a secagem favorece a rápida reidratação do pó obtido (Kadam; Balasubramanian, 2011; Kumar et al., 2022). A eficiência da SCE depende principalmente das características da espuma, incluindo estabilidade, densidade, expansão, tamanho das bolhas de ar e composição da matriz alimentar. Agentes espumantes como proteínas do leite, albumina e *whey protein* são frequentemente utilizados devido à sua capacidade de reduzir a tensão superficial e estabilizar a interface ar-líquido. Entretanto, a concentração do agente espumante deve ser otimizada, pois quantidades excessivas podem modificar as propriedades físicas e sensoriais do produto final (Kumar et al., 2022).

Apesar de ser uma técnica tradicional, a SCE tem recebido crescente interesse devido à sua aplicação em diferentes matrizes alimentares, principalmente frutas tropicais, sucos, polpas e extratos vegetais. Além disso, sua combinação com outras tecnologias, como micro-ondas, ultrassom e secagem híbrida, tem sido estudada para melhorar a eficiência energética e preservar compostos bioativos (Sultana et al., 2024).

3.6.2 Secagem assistida por micro-ondas

A principal vantagem dessa tecnologia é a rápida geração de calor, permitindo reduções significativas no tempo de secagem e maior eficiência energética. O aquecimento interno favorece a criação de gradientes de pressão que auxiliam a migração da umidade para a superfície, acelerando a remoção de água e reduzindo possíveis danos térmicos associados a longos períodos de processamento (Zhang et al., 2017; Khatri et al., 2024).

Entretanto, a aplicação inadequada da potência de micro-ondas pode ocasionar aquecimento não uniforme, formação de regiões superaquecidas e alterações

indesejáveis na qualidade do alimento, como degradação de compostos bioativos, alterações de cor e modificações estruturais. Dessa forma, o controle da potência aplicada, do tempo de exposição e das características do produto é fundamental para garantir um processo eficiente (Zhu et al., 2020).

3.6.2. Secagem osmótica

A desidratação osmótica tem sido alvo de vários estudos como pré-tratamento de alimentos perecíveis como abacaxi, melão, acerola, goiaba, figo entre outros, como abóbora e tomate (Piga et al., 2004; Ferrari et al., 2005; Fernandes; Gallão; Rodrigues, 2008; Lombard et al., 2008; Corrêa et al., 2010, 2014, 2015). Para a obtenção de produtos desidratados estáveis, a desidratação osmótica pode ser utilizada como pré-tratamento associada a outros métodos de secagem, contribuindo para melhorar a eficiência do processo e a qualidade do produto final. Entre os benefícios desse pré-tratamento destacam-se a redução das alterações de cor e do escurecimento, além da preservação de características de qualidade do alimento (ASGHARI et al., 2024).

No processo de desidratação osmótica, a perda de água e de sólidos naturais do alimento e a incorporação de sólidos são responsáveis por modificações nas propriedades viscoelásticas do tecido, devido à plasticidade da estrutura da amostra após o tratamento, sendo que entre as principais alterações decorrentes do processo, está a perda de turgor da célula, alteração na lamela média e na resistência da parede celular, mudanças nas frações de volume de ar e líquido na amostra, variações de tamanho e forma do alimento (Ito et al., 2007).

3.6.3. Liofilização

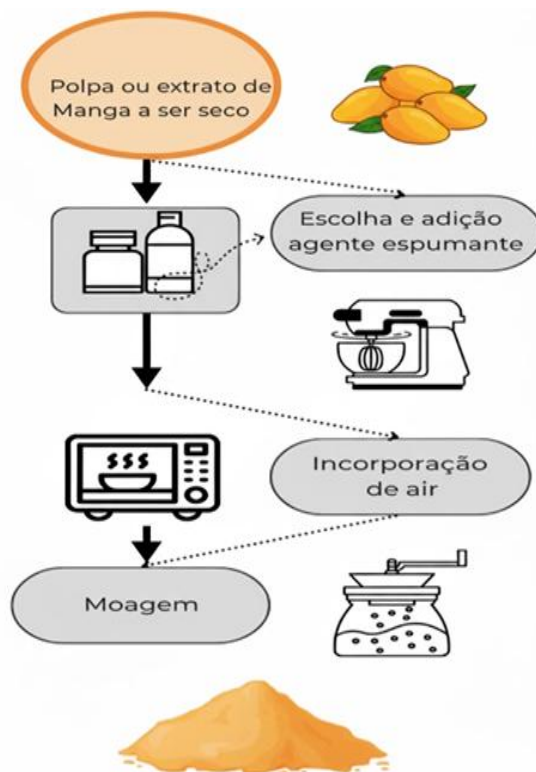
A liofilização é amplamente reconhecida como uma das melhores técnicas para obter alimentos secos de altíssima qualidade. O processo funciona em três etapas fundamentais: o congelamento do produto, a sublimação do gelo sob vácuo e a remoção da água residual por dessorção. Como a água passa do estado sólido direto para o gasoso, o alimento quase não entra em contato com altas temperaturas (Liapis & Bruttini, 1995).

O grande trunfo do método é a capacidade de preservar as características originais do produto, cor, aroma, textura, nutrientes e compostos bioativos permanecem praticamente intactos. Além disso, a remoção do gelo deixa uma estrutura interna porosa que permite ao alimento se reidratar de forma rápida e eficiente, sendo ideal para o mercado de alto valor agregado (Ratti, 2001).

O grande desafio da liofilização está na viabilidade econômica. O alto consumo de energia, o tempo prolongado de processamento e o custo elevado dos equipamentos limitam seu uso em larga escala. Por isso, a tecnologia costuma ser reservada para produtos específicos onde o ganho de qualidade final compensa o investimento (Ratti, 2001; Coşkun et al., 2024).

Na Figura 2 ilustra-se as principais etapas do processo padrão de secagem em camada de espuma (SCE). Primeiramente, o produto alimentício é cuidadosamente higienizado e transformado em polpa ou extrato. Em seguida, são adicionados um ou mais agentes espumantes, responsáveis por promover a formação de uma espuma estável. Na etapa seguinte, o ar é incorporado à mistura por meio de agitação mecânica, resultando na formação da espuma. Essa espuma é então espalhada uniformemente sobre bandejas de secagem e submetida a um processo de desidratação controlada, cujas condições (temperatura, tempo e fluxo de ar) são ajustadas de acordo com o tipo de produto estudado. Por fim, a espuma seca é moída e peneirada para a obtenção do pó final, com textura homogênea e baixo teor de úmida.

Figura 2- Fluxograma geral do processo de secagem em camada de espuma.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Fatores operacionais, como a temperatura e o tempo de secagem, a concentração dos agentes espumantes e a espessura da camada de espuma, influenciam diretamente a

qualidade final do pó obtido pelo processo de secagem em camada de espuma (SCE). Esses parâmetros representam variáveis-chave do processo, cuja otimização é essencial para garantir um produto de alta qualidade (Reis, De Moraes & Masson, 2021; Hardy & Jdeani, 2021).

3.7. Pré-tratamento com etanol

O etanol vem sendo utilizado como pré-tratamento em processos de Secagem em Camada de Espuma (SCE) devido à sua capacidade de modificar as propriedades de transferência de calor e massa durante a secagem. Estudos realizados por Araújo et al. (2020) demonstraram que o pré-tratamento com etanol influencia significativamente as propriedades físico-químicas e antioxidantes de polpas de pitaiá submetidas à secagem em camada de espuma, além de favorecer a eficiência do processo de secagem.

Além disso, o uso do etanol pode contribuir para a redução do tempo de secagem devido à sua elevada volatilidade e baixo ponto de ebulição, facilitando a remoção da água do material durante o processo convectivo. Segundo Alexandre et al. (2025), modificações nas condições de secagem em camada de espuma influenciam diretamente a cinética de secagem e as características finais dos produtos em pó, destacando a importância da otimização dos parâmetros do processo.

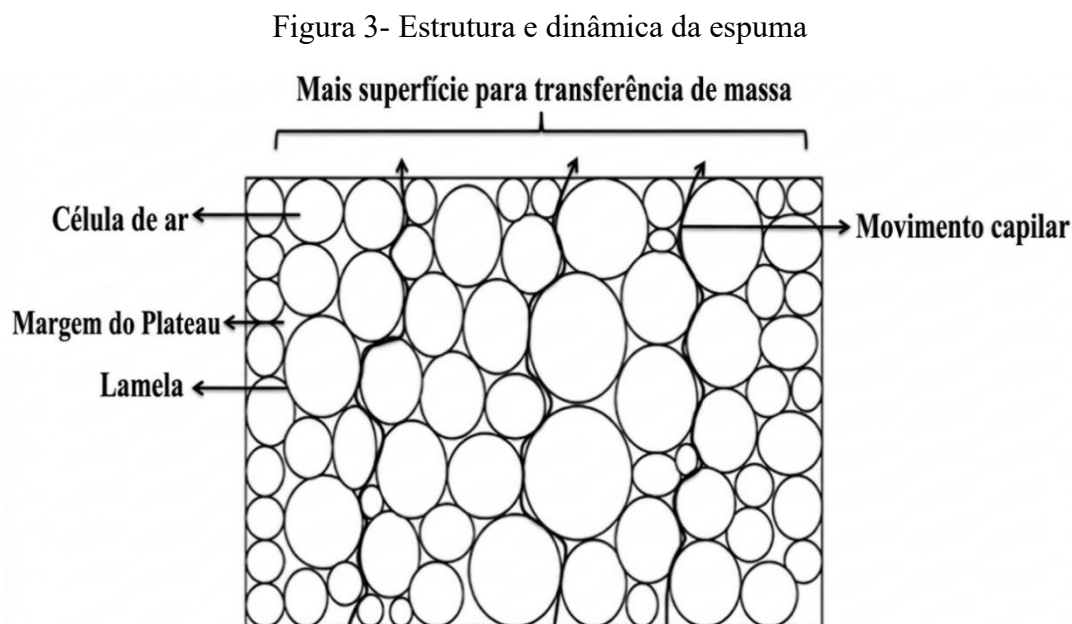
O emprego de tecnologias associadas ao pré-tratamento e à desidratação também tem sido amplamente investigado em produtos à base de manga. Carmo et al. (2022, 2024, 2025) relatam que diferentes estratégias de desidratação e enriquecimento osmótico podem melhorar as características físico-químicas, propriedades termodinâmicas e estabilidade dos produtos desidratados, contribuindo para a obtenção de produtos de maior qualidade e valor agregado.

3.8. Formação da espuma e dinâmica da secagem

A secagem em camada de espuma (SCE) é um processo complexo de transferência simultânea de calor e massa. Inicialmente, considerando um produto espumado submetido à secagem convectiva, o calor é transferido do ar de secagem para o produto principalmente através da superfície da espuma e, em menor grau, pelas laterais da bandeja. Simultaneamente, ocorre a transferência de massa na forma de evaporação da água na superfície da espuma, acompanhada pelos mecanismos de difusão e movimentação da umidade a partir do interior do material (Kumar et al., 2023).

Em uma visão ampliada da estrutura da espuma, podem ser identificadas duas fases líquida, construída pelo produto e pelos aditivos incorporados, e a fase gasosa, formada pelo ar introduzido durante o processo de agitação.

Entre as bolhas de ar existe uma estrutura denominada lamela, que consiste em uma fina película da fase líquida responsável pela separação das bolhas e pela estabilidade da espuma. A figura 3 apresenta uma representação esquemática da estrutura da espuma (Qadri; Srivastava; Yousuf, 2020).



Fonte: Adaptado de Shimoyama et al. (2008)

As principais formas de movimentação da água dentro da espuma são por difusão e movimento capilar. Como a evaporação e, consequentemente, a secagem ocorre sempre na superfície da espuma, a migração por movimento capilar é um movimento importante para o processo (Kumar et al., 2023).

3.9. Agentes espumantes e estabilizantes

Os principais agentes espumantes e estabilizantes utilizados na produção de espumas a serem desidratadas são albumina da clara de ovo, concentrado de proteína de soro de leite, proteína do leite, proteína de soja, gelatina, goma guar, goma xantana e monoglicerídeo de glicerol (Sultana et al., 2024). Contudo também há relatos da aplicabilidade de outros, como: caboximetilcelulose (Milani; Kashemi; Kashemi, 2024),

proteína de ervilha (Phuong et al., 2024), gelatina de peixe (Vasudevan et al., 2020) e albumina espumante de guar (Shimoyama et al., 2008).

Sendo a estabilidade das espumas um requisito importante para o funcionamento do processo, esta classe de aditivos se torna fundamental, reduzindo a tensão superficial das bolhas, como pode ser visto na figura 3, e impedindo a coalescência das mesmas. Nos casos dos agentes estabilizantes, estes atuam solidificando a camada lamelar fina reduzindo assim o fluxo da fase líquida dessa região essa propriedade impede que as bolhas fiquem finas em determinadas regiões e coalesçam auxiliando dessa forma a estabilidade. Foi relatado também que o excesso de agentes estabilizantes, por outro lado, pode impedir a incorporação de ar tornando o líquido muito viscoso (Kumar et al., 2023).

Já os agentes espumantes, em grande maioria proteínas, precisam ter a capacidade de produzir espumas, mesmo em baixas concentrações e atuando em diferentes faixas de pH. São responsáveis por reduzir a tensão superficial entre diferentes fases, dificultando a ocorrência de coalescência e auxiliando na formação da espuma por possuírem em suas moléculas uma parte hidrofóbica que se manterá na extremidade da lamela (próxima a fase gasosa) e a parte hidrofílica, que se situará na lamela juntamente com a fase líquida da espuma (Cardoso, Lobo, Teodoro, 2024; Qadri, Srivastava, Yousuf, 2020). Outro papel importante dos aditivos mencionados foi com relação a retenção de compostos aromáticos (Cardoso; Lobo; Teodoro, 2024).

3.9.1. Albumina

A albumina é o agente espumante mais utilizado devido ao seu excelente poder de expansão e à elevada estabilidade das espumas formadas. Esse agente produz espumas leves e homogêneas, favorecendo a secagem em camada de espuma. Entretanto, apresenta sensibilidade ao calor e possui origem animal, o que pode limitar sua aplicação em determinados produtos (Belal et al., 2022).

3.9.2. Whey protein

O *whey protein* apresenta boa capacidade espumante e forma espumas porosas e estáveis, favorecendo a eficiência do processo de secagem. Além disso, contribui para a melhoria da solubilidade e do valor nutricional dos pós obtidos. Contudo, sua utilização pode exigir tempos de batimento mais prolongados para a obtenção de espumas adequadamente estáveis (Thuwapanichayanan et al., 2008).

3.9.3. Isolado proteico de soja (SPI)

O isolado proteico de soja (SPI) constitui uma alternativa vegetal com boa capacidade de formação de espuma. Sua utilização pode favorecer a retenção de compostos bioativos, aumentar a porosidade e melhorar a atividade antioxidante dos pós produzidos. No entanto, a estabilidade das espumas obtidas pode ser inferior à observada para a albumina de ovo (Asokapandian et al., 2016; Eman Farid et al., 2022).

3.9.4. Albumina espumante de guar (GFA)

A albumina espumante de guar (GFA) é uma proteína de origem vegetal que apresenta elevado poder espumante, produzindo espumas altamente estáveis, com bolhas pequenas e uniformemente distribuídas. Dessa forma, constitui uma alternativa potencialmente hipoalergênica às proteínas de origem animal (Shimoyama et al., 2008).

3.9.5. Estabilizantes polissacarídicos

Estabilizantes polissacarídicos, como a carboximetilcelulose (CMC), a goma xantana e a goma arábica, são frequentemente adicionados às formulações para aumentar a viscosidade da fase líquida, reduzir a drenagem e melhorar a estabilidade da espuma. Entre esses aditivos, a CMC tem demonstrado elevada eficiência quando utilizada em associação com a albumina de ovo e o SPI, promovendo melhorias significativas na estabilidade das espumas (Belal et al., 2022; Asokapandian et al., 2016).

3.10. Características físico-químicas do pó obtido

A qualidade do pó obtido após a secagem constitui um aspecto fundamental na avaliação da eficiência do processo. Diversas propriedades podem ser analisadas, incluindo tamanho de partícula, porosidade, densidade, molhabilidade, solubilidade, retenção de compostos bioativos, cor, teor de água, capacidade de reidratação e tendência à aglomeração (Sultana et al., 2024).

Na secagem em camada de espuma (SCE), a qualidade do pó produzido está diretamente relacionada à estabilidade da espuma formada. Estudos relatam maior retenção de compostos bioativos, como antocianinas e vitamina C, além da melhoria de atributos sensoriais, especialmente cor e sabor (Khatri et al., 2024).

Uma revisão conduzida por Reis, De Moraes e Masson (2021) destacou o potencial da técnica de foam-mat drying para a produção de pós com elevada retenção de compostos bioativos. Associada ao baixo custo operacional, essa técnica apresenta grande potencial para aplicações na indústria alimentícia.

Segundo Sultana et al. (2024), a incorporação de ar durante a formação da espuma é responsável pela estrutura porosa e pela baixa densidade dos pós produzidos, juntamente com fatores como a estabilidade da espuma e a temperatura de secagem. Os autores também destacam que a elevada porosidade favorece a solubilidade do produto, embora possa reduzir sua estabilidade durante o armazenamento devido à maior interação com a umidade do ambiente

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Matéria-prima

Os frutos de manga (*Mangifera indica* L., variedade Tommy Atkins) utilizados neste estudo foram adquiridos no comércio local de Lavras, Minas Gerais. Os frutos apresentavam teor médio de sólidos solúveis de 13,5 °Brix, determinado com o auxílio de um refratômetro digital (modelo HI96801, Hanna Instruments Inc., Romênia), apresentavam casca de coloração predominantemente amarela e encontravam-se em estágio avançado de maturação.

4.2. Preparo da matéria

No momento da recepção, os frutos foram cuidadosamente lavados com água de torneira para remover sujidades e impurezas superficiais. Em seguida, foram descascados manualmente e tiveram os caroços removidos.

A polpa de manga foi obtida utilizando uma centrífuga de alimentos (modelo Juicer 700, Britânia, Curitiba, Brasil) com potência de 400 W, operando na segunda velocidade, de modo a garantir a homogeneidade do produto. Posteriormente, através da filtração da polpa com uma peneira de 20 mesh, obteve-se um concentrado da polpa, chamado aqui purê.

As amostras a serem utilizadas foram elaboradas com 100 g de purê utilizando uma balança analítica (modelo AUY220, Shimadzu, Japão). O material foi então acondicionado em sacos de polietileno de alta densidade e armazenado em freezer a -18 °C até sua utilização.

4.3. Preparação da espuma

O purê congelado foi descongelado à temperatura ambiente por 24 h e transferido para uma tigela para a preparação da espuma.

4.4. Definição e otimização das formulações

Para a definição e a otimização das formulações da espuma, foi realizada um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) de ordem 2 com os níveis +1 e -1, dois pontos axiais apresentando os níveis - α e + α (Neste caso $\alpha = 1,41$) e cinco pontos centrais, no nível zero, com duas variáveis independentes segundo (Rodrigues e Iemma, 2005) totalizando 13 ensaios.

Foram avaliados os efeitos de duas variáveis independentes: fração mássica da agente espumante (X1; % m/m) fração mássica do estabilizante (X2; % m/m) e obtido o ponto estacionário para cada agente espumante.

As formulações de *whey protein* e albumina (Tabela 4) foram submetidas à agitação em uma batedeira doméstica (B-50-B, Mondial, Araucária, Brasil). O primeiro minuto de batimento foi realizado em velocidade média, visando à dissolução e dispersão dos agentes formadores de espuma. Os 9 min subsequentes foram realizados em velocidade alta, a fim de favorecer a incorporação de ar e a formação de uma espuma estável e homogênea.

Tabela 3- Massa de agente espumante e de estabilizante em espuma de purê de manga.

Ensaio	Whey protein (g)	Goma Xantana (g)	Ensaio	Albumina (g)	Goma Xantana (g)
1A	9(1,00)	0,64(1,00)	1B	8,68(1,00)	0,65(1,00)
2A	9(1,00)	0,11(-1,00)	2B	8,68(1,00)	0,20(-1,00)
3A	4(-1,00)	0,64(1,00)	3B	2,32(1,00)	0,65(-1,00)
4A	4(-1,00)	0,11(-1,00)	4B	2,32(-1,00)	0,20(-1,00)
5A	10(1,41)	0,38(0,00)	5B	10,00(1,41)	0,43(0,00)
6A	3(-1,41)	0,38(0,00)	6B	1,00(-1,41)	0,43(0,00)
7A	6,5(0,00)	0,75(1,41)	7B	5,50(0,00)	0,75(1,41)
8A	6,5(0,00)	0,00(-1,41)	8B	5,50(0,00)	0,10(-1,41)
9A	6,5(0,00)	0,38(0,00)	9B	5,50(0,00)	0,43(0,00)
10A	6,5(0,00)	0,38(0,00)	10B	5,50(0,00)	0,43(0,00)
11A	6,5(0,00)	0,38(0,00)	11B	5,50(0,00)	0,43(0,00)
12A	6,5(0,00)	0,38(0,00)	12B	5,50(0,00)	0,43(0,00)
13	6,5(0,00)	0,38(0,00)	13	5,50(0,00)	0,43(0,00)

Números entre parênteses referem-se a variáveis codificadas.

Fonte: Do autor (2026).

4.5. Análise da densidade

A densidade da espuma foi determinada com auxílio de uma proveta graduada de 50 mL, de acordo com a metodologia utilizada por Macedo et al. (2021). O valor da densidade (ρ) foi calculado pela razão entre a massa da espuma (M) e o volume ocupado pela espuma (V) na proveta, conforme apresentado na Equação 1.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1)$$

4.6. Estabilidade

A estabilidade da espuma foi determinada de acordo com a metodologia utilizada por Macedo et al. (2021), com modificações. Em triplicata, as espumas foram cuidadosamente transferidas para um funil acoplado a uma proveta graduada de 50 mL, de modo a preencher completamente seu volume, e posteriormente mantidas a 70 °C por 2 h. Na Equação 2 apresenta-se o cálculo da estabilidade, em que V_o corresponde ao volume inicial da espuma (mL) e V_d ao volume drenado (mL).

$$Estabilidade(\%) = \frac{(V_o - V_d)}{V_o} \times 100 \quad (2)$$

4.7. Secagem em camada de espuma (SCE) de manga com e sem etanol

As formulações de espuma foram produzidas individualmente e, para cada ensaio, 35,00 g de espuma foram transferidos para moldes de alumínio previamente tarados. As amostras foram distribuídas em recipientes circulares de 17 cm de diâmetro, com altura de camada de 0,5 cm, enquanto aquelas formuladas à base de albumina foram dispostas em recipientes circulares de mesmo diâmetro, porém com altura de camada de 1,0 cm. Essa diferença de altura é explicada pela maior densidade da formulação contendo albumina e goma xantana em comparação com a formulação à base de *whey protein*.

As amostras foram então submetidas à secagem em túnel de ar convectivo (Eco Engenharia Educacional, modelo MD018), nas temperaturas de 50 °C e 70 °C, com velocidade do ar de 2 m·s⁻¹. Nos experimentos em que houve adição de etanol às amostras, o mesmo foi calculado segundo a metodologia a seguir:

Foi aplicado etanol (95%) com o auxílio de um borrifador sobre a superfície da amostra, conforme a metodologia de Macedo et al. (2021), na proporção de 0,05 mL·cm⁻², com base na área do prato.

A aplicação do etanol sobre a superfície da espuma pode influenciar o processo de secagem devido à sua elevada volatilidade e menor temperatura de ebulição (78,3 °C) em comparação à água. Durante a secagem, o etanol tende a evaporar rapidamente, podendo favorecer a transferência de massa e facilitar a remoção da umidade da matriz. Esse efeito pode ser particularmente relevante nas condições de menor temperatura, nas quais a força motriz para a evaporação da água é reduzida.

Para cada temperatura, a secagem foi realizada em triplicata, totalizando 24 pós destinados às análises posteriores.

Tabela 4- Descrição dos tratamentos utilizados nos ensaios de secagem.

Codigo	Agente	Pretratamento	Temperatura
	Espumante	com e sem etanol	
ACE50	Albumina	3	50°C
ACE70	Albumina	3	70°C
ASE50	Albumina	3	50°C
ASE70	Albumina	3	70°C
WCE50	Whey protein	3	50°C
WCE70	Whey protein	3	70°C
WSE50	Whey protein	3	50°C
WSE70	Whey protein	3	70°C

Os ensaios foram conduzidos sob condições ambientais entre 22 °C e 33 °C e umidade relativa do ar ambiente inferior a 40%. A massa das amostras foi medida a cada 10 min durante as duas primeiras 2 h e, posteriormente, a cada 20 min até a obtenção de massa constante. Os dados obtidos foram utilizados para determinar a cinética de secagem e avaliar o efeito da adição de etanol sobre o tempo de secagem.

Na análise da cinética de secagem, a razão de umidade (RU) foi estimada por meio da equação 3, em que X_t , X_0 e X_e correspondem, respectivamente, aos teores de umidade no tempo t , inicial e de equilíbrio, expressos em base seca.

$$RU = \frac{(X_t - X_e)}{(X_0 - X_e)} \quad (3)$$

4.8. Análises do pó

Após cada secagem, os pós obtidos foram acondicionados em embalagens laminadas e armazenados à -18 °C até a realização das análises. As análises finais foram realizadas utilizando os pós produzidos em cada condição de secagem descrita anteriormente.

4.8.1. Atividade de água (a_w)

A atividade de água (a_w) foi medida com o auxílio de um medidor de atividade de água (Aqualab, modelo 3TE, Meter Group, Washington, EUA), conforme a metodologia utilizada por Vimercati et al. (2022).

4.8.2. Teor de Umidade

O teor de umidade foi determinado pelo método gravimétrico em estufa a 70 °C, sob vácuo inferior a 100 mmHg (13,3 kPa), de acordo com a metodologia da Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 2010).

4.8.3. Análise da cor

Os parâmetros de cor foram determinados utilizando um colorímetro, por meio da medição dos valores L^* (luminosidade), a^* (variação da cor do verde ao vermelho) e b^* (variação da cor do azul ao amarelo), conforme descrito por Milani, Hashemi e Hashemi (2024).

4.8.4. Solubilidade

A solubilidade foi determinada conforme a metodologia de Cano-Chauca et al. (2005), com algumas modificações. Para isso, foram pesados 0,5 g de cada amostra em tubos de ensaio de 15 mL, aos quais foram adicionados 13,5 mL de água destilada. As soluções foram agitadas em vortex por 2 min a 2800 rpm, a fim de promover a completa mistura da amostra com a água destilada, e posteriormente centrifugadas por 10 min a 3000 rpm. Em seguida, 13,5 mL do sobrenadante serão pipetados, transferidos para placas de Petri e colocados em estufa a 105 °C por 5 h.

4.9. Análise estatística

Os dados serão processados por meio de análise de variância (ANOVA). As diferenças entre os tratamentos serão avaliadas pelo teste de Tukey, adotando-se um nível de significância de 5%. Além disso, as comparações específicas entre cada tratamento e a amostra controle (não seca) serão realizadas por meio do teste de Dunnett, com intervalo de confiança de 95%. A análise dos resultados será conduzida utilizando o software Statistica 14.1.0.8 (Statistica Analysis, 2024).

4.10. Etapas do processo de trabalho com um fluxograma

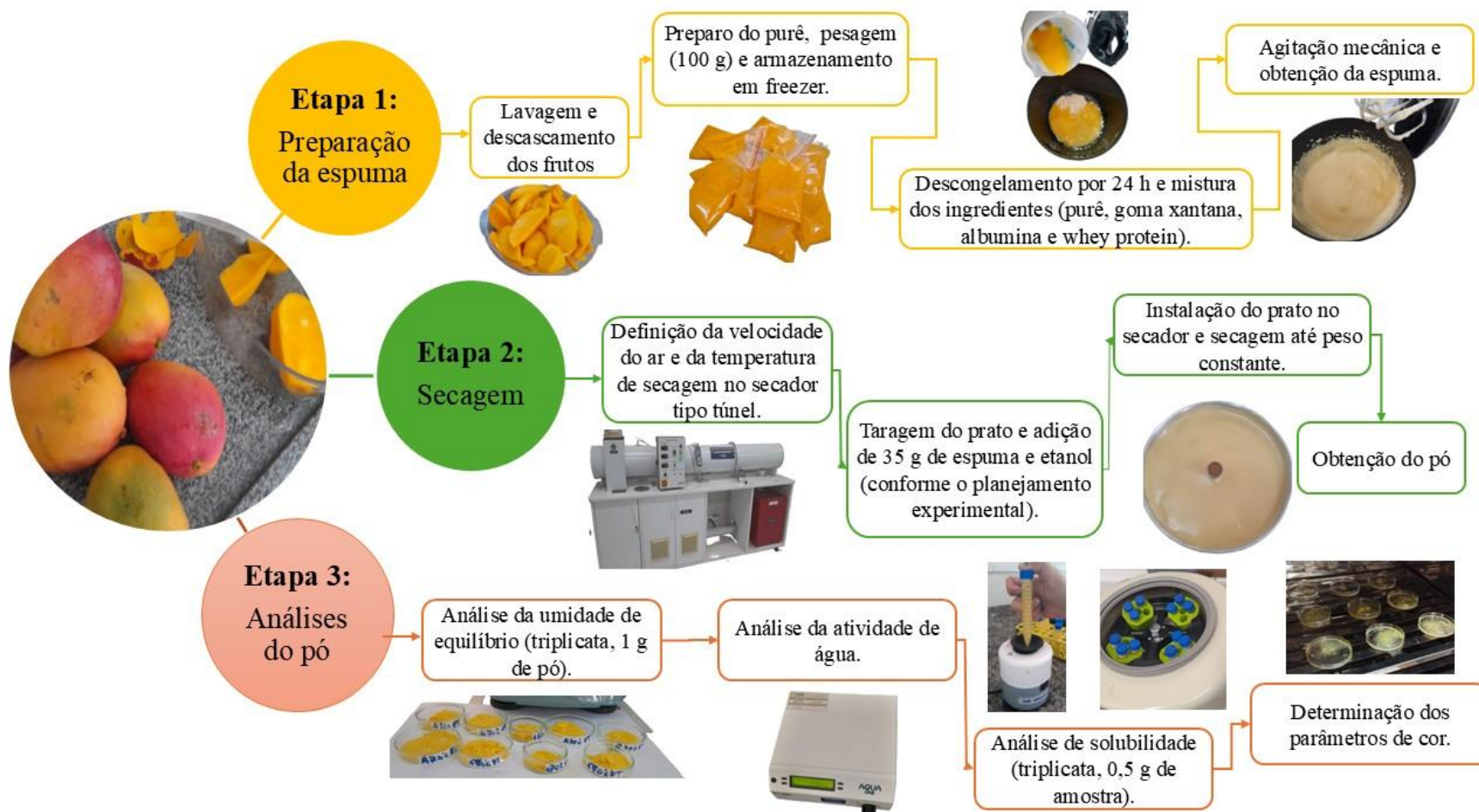
Aqui está o texto ajustado em três parágrafos, conectando explicitamente a narrativa aos elementos e símbolos do fluxograma Figura 4 para deixar claro que o texto é uma descrição direta da imagem:

Para facilitar a visualização do processo experimental apresentado na Figura 4, a metodologia foi estruturada em três fases principais: a preparação da espuma, a secagem e a caracterização do pó. Na primeira etapa, os frutos selecionados foram lavados, descascados e transformados em um purê homogêneo, fracionado em porções de 100 g e congelado em freezer. Conforme ilustrado no esquema, após o descongelamento controlado por 24 horas, adicionaram-se à matriz o agente estabilizante (goma xantana) e os agentes espumantes (albumina e/ou *whey protein*). A mistura foi então submetida à agitação mecânica intensa para a incorporação de ar, resultando na obtenção de uma espuma firme e estável.

A segunda fase, destacada em verde no fluxo, refere-se à Secagem em Camada de Espuma (SCE) realizada em secador convectivo do tipo túnel. Após a definição e estabilização da velocidade do ar e da temperatura de secagem, realizou-se a taragem do prato metálico e a adição de uma camada de 35 g de espuma, seguida da aplicação eventual de etanol conforme o planejamento experimental. O prato foi então instalado no secador até que a amostra atingisse peso constante, momento em que o material desidratado foi retirado do equipamento para a obtenção final do pó de manga.

Por fim, a terceira fase, representada na parte inferior do diagrama, corresponde às análises físicas para caracterização do pó obtido. Seguindo a sequência analítica do fluxograma, determinou-se inicialmente a umidade de equilíbrio em triplicata (utilizando alíquotas de 1 g de pó), seguida pela medição da atividade de água (a_w). Na sequência, avaliou-se a solubilidade em água, também em triplicata (com 0,5 g de amostra), finalizando o processo experimental com a determinação instrumental dos parâmetros de cor.

Figura 4- Esquema das etapas de fabricação e avaliação do pó de manga.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

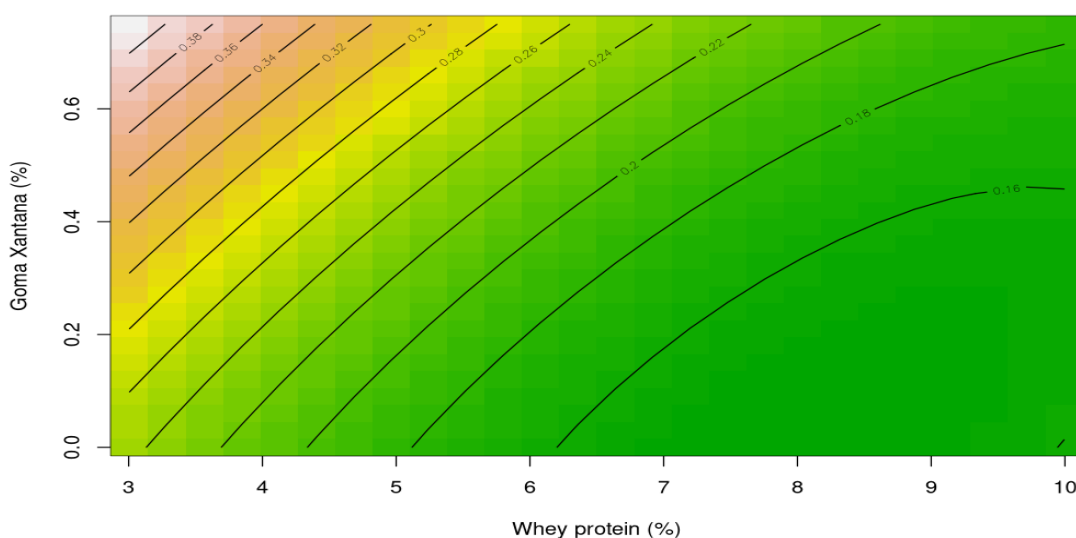
5.1. Otimização das espumas

Os Delineamentos Compostos Centrais Rotacionais (DCCR) foram utilizados para identificar as condições operacionais ideais para a formação de espumas estáveis e de baixa densidade, adequadas à aplicação na Secagem em Camada de Espuma (SCE). Esses planejamentos experimentais permitiram avaliar simultaneamente os efeitos da concentração do agente espumante, da goma xantana e do tempo de batimento sobre a densidade final das espumas.

A partir da modelagem estatística, foram determinados os pontos estacionários para cada sistema proteico (albumina e whey protein)

A determinação desses pontos estacionários possibilita a avaliação comparativa do desempenho espumante dos sistemas proteicos estudados sob condições otimizadas. Inicialmente, foi realizada a otimização da espuma utilizando whey protein e goma xantana. As superfícies de resposta obtidas para a densidade da espuma em função das concentrações dessas variáveis são apresentadas nas Figuras 5 e 6.

Figura 5- Superfície de resposta referente à otimização da espuma com whey protein e goma xantana em relação a densidade.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A Figura 5 representa a superfície de resposta obtida para a densidade da espuma em função das concentrações de whey protein e goma xantana. Observa-se que concentrações intermediárias a elevadas de whey protein, combinadas com baixa adição

de goma xantana, conduzem aos menores valores de densidade (zonas verdes). Essa diminuição progressiva da densidade com o aumento da concentração de *whey protein* está associada a uma melhor incorporação e estabilização do ar na espuma, fenômeno já descrito por Martínez-Padilla et al. (2015).

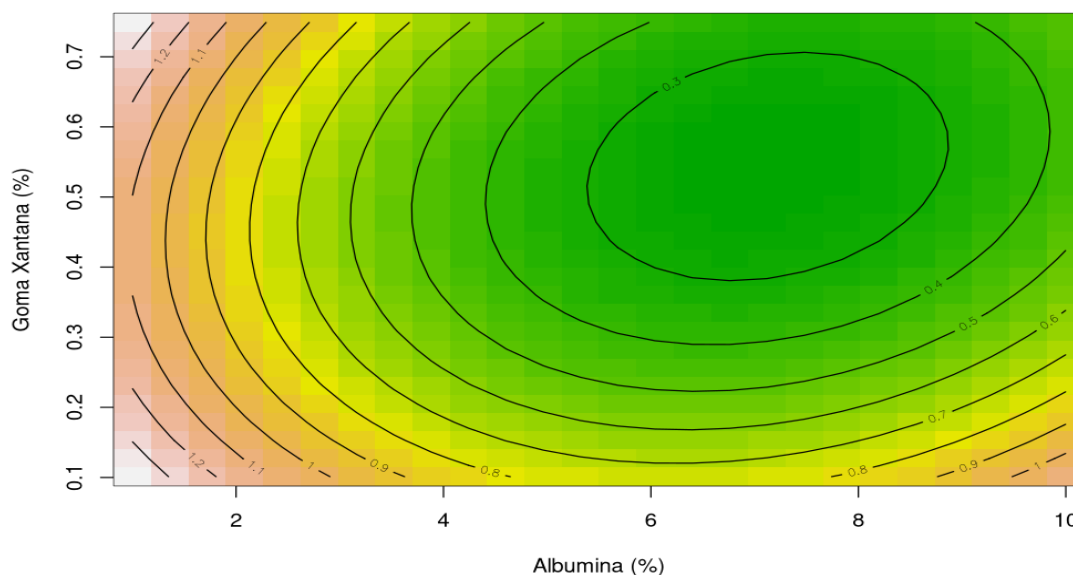
Essas espumas de baixa densidade, caracterizadas por maior incorporação de ar e elevada porosidade, são ideais para a secagem em camada de espuma (SCE), pois favorecem a transferência de massa e contribuem para a redução do tempo de secagem. Em contrapartida, concentrações elevadas de goma xantana combinadas com baixos teores de proteína resultam em maiores valores de densidade (zonas laranja e rosa). Embora a goma xantana aumente a viscosidade e favoreça a estabilidade da espuma, seu uso em excesso pode ser prejudicial. Esse efeito é atribuído ao aumento excessivo da viscosidade, que dificulta a incorporação de ar e resulta na formação de espumas mais densas e menos aeradas, corroborando as observações de Susanti et al. (2021).

Na Figura 5 revela-se uma região ótima para concentrações de *whey protein* entre 7% e 10% e concentrações de goma xantana inferiores a 0,3%. Esses resultados estão em concordância com Parseh et al. (2022), que, utilizando a metodologia de superfície de resposta (RSM), determinaram como condição ótima uma formulação contendo 8% de *whey protein* concentrado e 0,10% de goma xantana. Os autores observaram que o aumento da concentração de *whey protein* favoreceu a incorporação de ar e o aumento do overrun, enquanto concentrações mais elevadas de goma xantana aumentaram a densidade da espuma e reduziram sua expansão, corroborando a região ótima obtida no presente estudo. O ponto estacionário determinado pelo modelo correspondeu a 8,02% de *whey protein* e 0% de goma xantana. Essas condições foram selecionadas para a produção das espumas destinadas aos ensaios de secagem em túnel de ar convectivo, por proporcionarem a obtenção de espumas com menor densidade e características favoráveis ao processo de secagem.

Na Figura 6 ilustra-se a superfície de resposta para a densidade da espuma formulada com albumina e goma xantana. De maneira análoga ao sistema contendo *whey protein*, a interação entre o agente espumante e o estabilizante governa as propriedades estruturais da matriz alveolar. Embora a albumina atue como um excelente tensioativo capaz de promover a expansão volumétrica e estabilizar grandes volumes de ar, sua funcionalidade é influenciada pela concentração de goma xantana. Em baixas concentrações, esse hidrocoloide contribui para a estabilidade da espuma; entretanto, seu excesso aumenta a viscosidade do meio, dificultando a incorporação de ar e

elevando a densidade da espuma, comportamento também observado por Girelli et al. (2023) e Tran et al. (2023).

Figura 6- Superfície de resposta referente à otimização da espuma com albumina e goma xantana em relação a densidade.



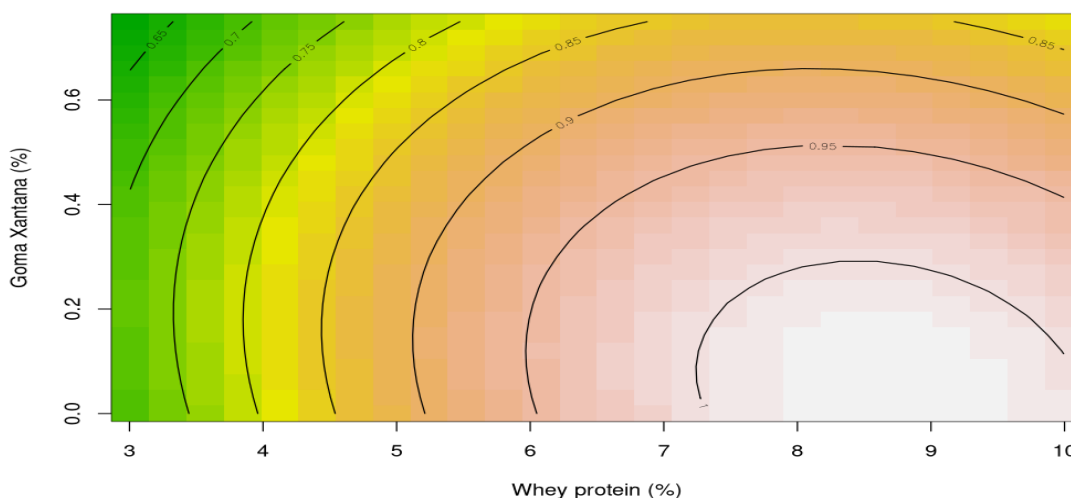
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

O perfil da superfície de resposta indica que as menores densidades foram obtidas em concentrações intermediárias de albumina associadas a baixos ou moderados teores de goma xantana. Resultados semelhantes foram relatados por Girelli et al. (2023), que observaram redução da densidade e melhora das propriedades espumantes com o uso combinado de albumina e estabilizantes.

O ponto estacionário definido pelo modelo foi de 7,13% de albumina e 0,54% de goma xantana. Essas proporções favoreceram a obtenção de espumas com menor densidade e maior estabilidade estrutural, características importantes para a transferência de massa durante a secagem em camada de espuma. Resultados semelhantes foram reportados por Muthukumaran et al. (2008), que destacaram a influência dos agentes espumantes e estabilizantes na formação de espumas estáveis e adequadas ao processo de desidratação.

Além da densidade, a estabilidade da espuma constitui um parâmetro determinante para o sucesso da secagem em camada de espuma. A figura 7 a seguir mostra o efeito das concentrações de *whey protein* e goma xantana sobre essa propriedade de estabilidade da espuma.

Figura 7- Superfície de resposta referente à otimização da espuma com *whey protein* e goma xantana em relação à estabilidade

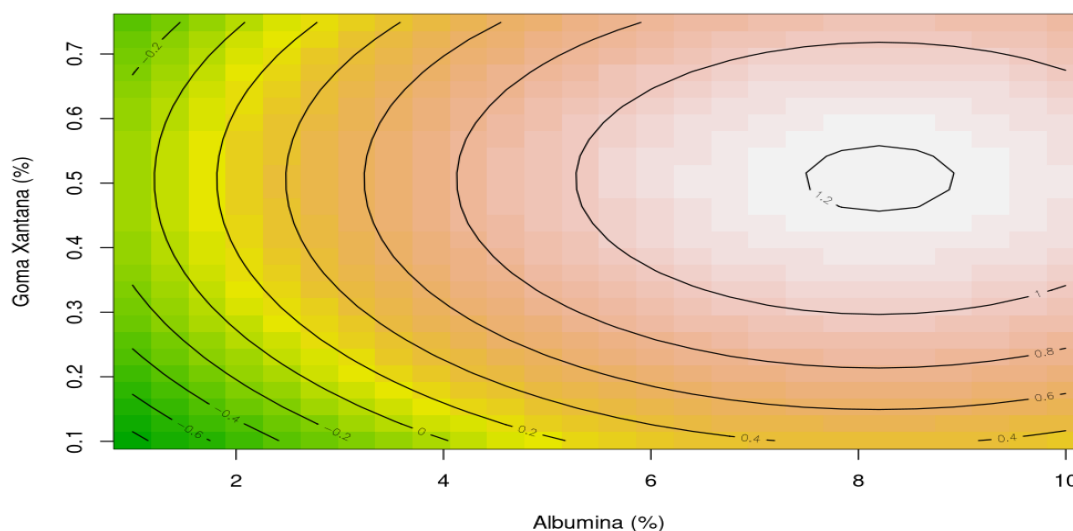


Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A superfície de resposta da estabilidade da espuma mostrou que concentrações elevadas de *whey protein* associadas a baixos teores de goma xantana favoreceram a obtenção de espumas mais estáveis. O ponto estacionário do modelo foi localizado em 8,69% de whey e 0,04% de goma xantana, correspondendo à região de maior estabilidade predita. A *whey protein* contribuem para a formação de filmes interfaciais resistentes ao redor das bolhas de ar, aumentando a estabilidade da espuma (Martínez-Padilla et al., 2015). Além disso, a goma xantana atua como agente estabilizante devido ao aumento da viscosidade da fase contínua, reduzindo o drenamento líquido e favorecendo a manutenção da estrutura da espuma (Susanti et al., 2021). Entretanto, os resultados deste estudo indicam que a maior estabilidade foi obtida em baixos teores de goma xantana, evidenciando a importância do equilíbrio entre os componentes da formulação.

Após a avaliação da estabilidade das espumas formuladas com *whey protein* e goma xantana, analisou-se o comportamento do sistema contendo albumina e goma xantana. A figura seguinte apresenta a superfície de resposta da estabilidade da espuma em função das concentrações desses dois componentes.

Figura 8- Superfície de resposta referente à otimização da espuma com albumina e goma xantana em relação à estabilidade



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A superfície de resposta mostrou que concentrações elevadas de albumina associadas a teores moderados de goma xantana favoreceram a obtenção de espumas mais estáveis. Esse comportamento está relacionado à capacidade da albumina de formar filmes interfaciais resistentes ao redor das bolhas de ar, enquanto a goma xantana contribui para a redução da drenagem líquida e para o aumento da estabilidade da espuma. O ponto estacionário do modelo foi localizado em 8,20% de albumina e 0,50% de goma xantana, correspondendo à região de maior estabilidade predita. Esses resultados estão de acordo com estudos que relatam o papel da albumina como agente espumante e da goma xantana como agente estabilizante em processos de secagem em camada de espuma.

No presente estudo, os resultados obtidos por meio do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) foram analisados sob a perspectiva do ponto estacionário. Esta abordagem justifica-se pelo fato de que a otimização matemática gerou coordenadas teóricas que ultrapassam os limites físicos reais do sistema de formulação. Sendo as concentrações de massa negativas fisicamente impossíveis de realizar, a região de busca encontra-se limitada pelo limiar físico zero do componente. Diante desta restrição de formulação, o ponto estacionário local determinado dentro do domínio explorado assume o papel de ponto crítico de controle do processo, tornando assim

impossível o deslocamento do planejamento (análise de crista) para as coordenadas teóricas ótimas extrapoladas (Montgomery, 2012).

Na Tabela 7 é apresentado os quatro modelos obtidos a partir dos DCCRs. Os dados experimentais foram ajustados por meio de modelos quadráticos de segunda ordem, conforme apresentado na equação 4, em que y representa a resposta avaliada (densidade ou estabilidade da espuma), β_0 corresponde ao termo constante, β_1 e β_2 representam os efeitos lineares das variáveis independentes, β_{12} descreve o efeito de interação entre os fatores estudados e β_{11} e β_{22} representam os efeitos quadráticos responsáveis pela curvatura das superfícies de resposta.

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 \quad (4)$$

Tabela 5 - Coeficientes dos modelos quadráticos ajustados para densidade e estabilidade das espumas.

Variável Resposta	Agente espumante	β_0	β_1	β_2	β_{12}	β_{11}	β_{22}	R^2
Densidade	Whey protein	0,1889	-0,0558	0,0343	-0,0184	0,0233	0,0078	0,9423
Estabilidade	Whey protein	0,9510	0,0893	-0,0463	-0,0119	-0,0588	-0,0225	0,9464
Densidade	Albumina	0,3120	-0,2077	-0,1107	-0,0728	0,2400	0,1428	0,9202
Estabilidade	Albumina	1,0000	0,4255	0,1780	0,0025	-0,2506	-0,2506	0,8958

Os modelos ajustados apresentaram coeficientes de determinação (R^2) entre 0,8958 e 0,9464, indicando boa capacidade de representação dos dados experimentais. Para as formulações contendo whey protein, verificou-se que o aumento da concentração do agente espumante favoreceu a incorporação de ar, resultando em espumas menos densas e mais estáveis. Por outro lado, o aumento da concentração de goma xantana tendeu a elevar a densidade da espuma e a reduzir sua estabilidade na faixa experimental estudada. A presença dos termos quadráticos indica que as respostas não variaram de forma linear, evidenciando a existência de regiões estacionárias para ambas as propriedades avaliadas.

No sistema formulado com albumina, observou-se que tanto a concentração do agente espumante quanto a da goma xantana influenciaram significativamente as propriedades da espuma. O aumento da albumina favoreceu a formação de espumas mais leves e estáveis, enquanto a goma xantana contribuiu para a manutenção da

estrutura da espuma. Entretanto, os efeitos quadráticos observados indicam que concentrações excessivas desses componentes podem comprometer o desempenho da espuma, justificando a presença de pontos estacionários nas superfícies de resposta. Esses resultados evidenciam a importância do equilíbrio entre os componentes da formulação para a obtenção de espumas com baixa densidade e elevada estabilidade.

Com base nos resultados obtidos para a densidade e a estabilidade, as condições apresentadas na Tabela 6 foram selecionadas para a produção das espumas destinadas aos ensaios de secagem. Durante a formulação, observou-se que as concentrações escolhidas permitiam obter espumas apresentando uma boa incorporação de ar, uma estrutura homogênea e uma estabilidade suficiente para manter sua integridade ao longo de todo o período de avaliação. A formulação contendo whey protein, há uma forte capacidade espumante que permitiu obter espumas leves mesmo na ausência de goma xantana, o que se traduziu em uma baixa densidade e uma estabilidade satisfatória. Em contrapartida, na formulação à base de albumina, a adição de goma xantana revelou-se importante para reforçar a estrutura da espuma e reduzir a drenagem líquida, contribuindo assim para a manutenção de sua estabilidade sem comprometer de maneira significativa a incorporação de ar. Assim, as condições selecionadas representam um compromisso entre uma baixa densidade e uma elevada estabilidade, duas características essenciais para maximizar as transferências de calor e de massa durante o processo de secagem em camada de espuma.

Tabela 6 - Condições ótimas obtidas para a espuma com albumina e com whey protein.

	Agente espumante (g·mL ⁻¹)	Goma Xantana (g·mL ⁻¹)	Tempo de batimento (min)	Densidade ótima	Estabilidade ótima (g·mL ⁻¹)
Albumina	7,13	0,54	10:00	0,28	8,20%
Whey Protein	0,28	0,0	10:00	0,14	8,69%

5.2. Cinética e modelagem matemática da secagem a 50 °C da albumina e whey protein com e sem etanol

Na temperatura de 50 °C, a secagem em camada de espuma (SCE) da polpa de manga mostra que a utilização de etanol modifica a dinâmica de transferência de massa para os dois agentes espumantes avaliados. Para a espuma formulada com whey protein sem aplicação de etanol, observa-se uma redução rápida da razão de umidade (RU) nos primeiros estágios da secagem, seguida por uma diminuição progressiva até a obtenção

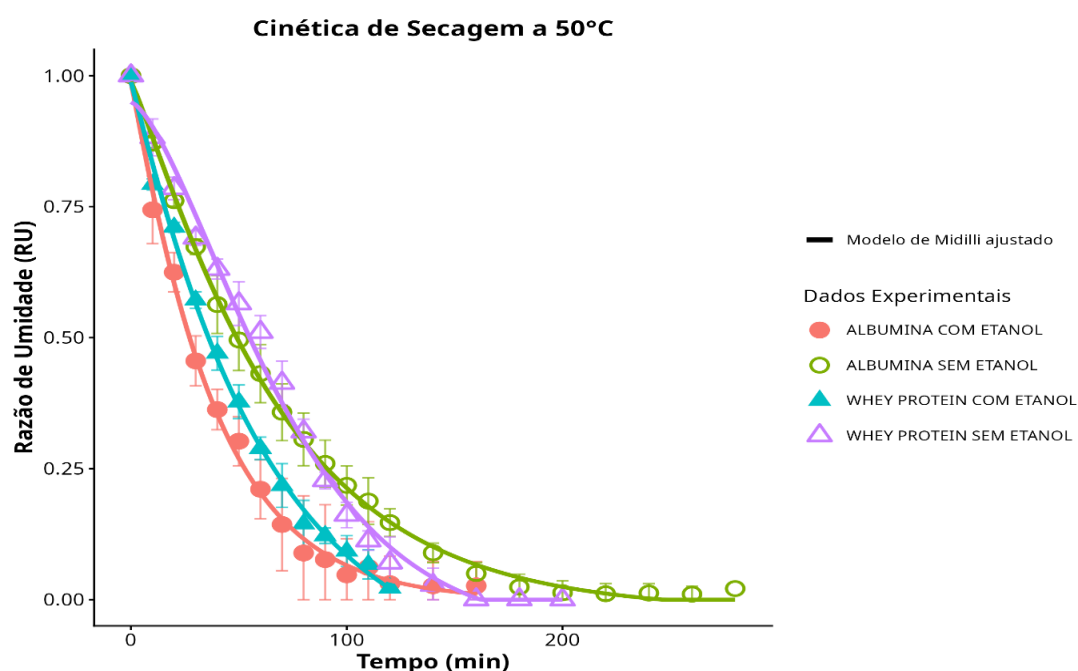
do equilíbrio termodinâmico após 200 minutos. Esse comportamento é característico da secagem em camada de espuma para produtos alimentícios ricos em açúcares e compostos solúveis (Kumar et al., 2022).

A adição de etanol a essa formulação de whey protein a 50 °C melhora a cinética e reduz o tempo necessário para atingir valores de RU próximos de zero em 160 minutos, representando uma redução de 20% no tempo de secagem em comparação à condição sem etanol.

Para a espuma formulada com albumina sem etanol, o processo a 50 °C é o mais longo do estudo, necessitando de um tempo total de secagem de 280 minutos. Em contrapartida, quando o etanol é incorporado à espuma de albumina a 50 °C, a velocidade de evaporação é aumentada ao longo do processo.

Quanto ao ajuste dos modelos matemáticos para as condições a 50 °C, o modelo de Midilli apresenta, de modo geral, uma boa concordância visual com os dados experimentais. Mais especificamente, para a formulação de albumina com etanol a 50 °C, este modelo se mostra o mais preciso para descrever a curva final de desidratação.

Figura 9- Cinética de secagem a 50 °C ajustada ao modelo de Midilli para espumas de albumina e whey protein com e sem etanol.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

5.3. Cinética e modelagem matemática da secagem a 70 °C da albumina e whey protein com e sem etanol

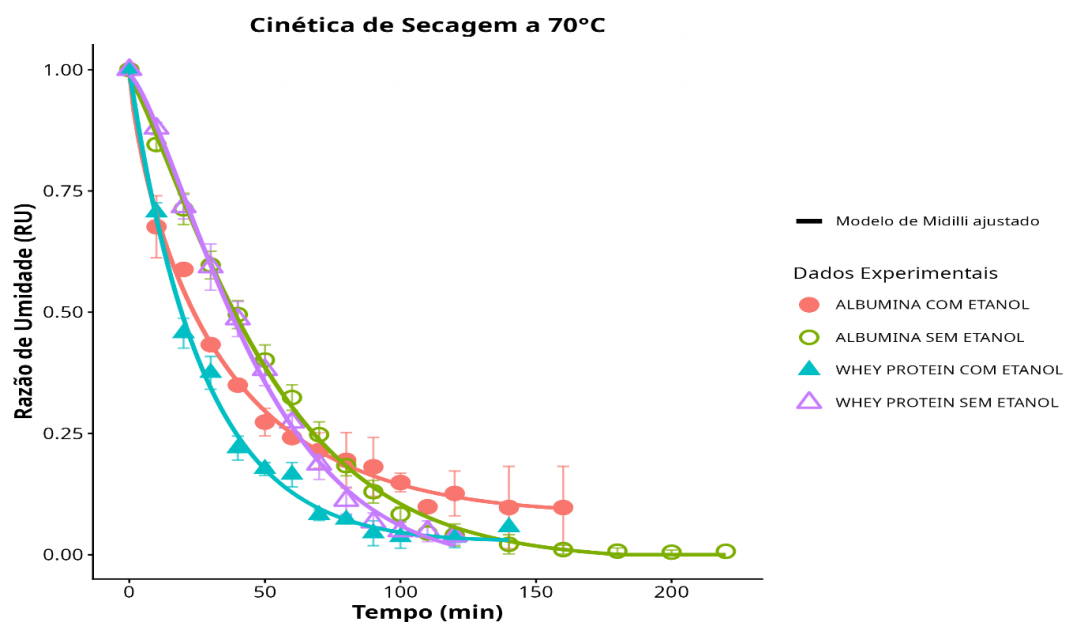
Na temperatura de 70 °C, a elevação térmica favorece o aumento da pressão de vapor da água e da difusividade efetiva da umidade, intensificando a transferência de massa e acelerando a remoção de água. Para a espuma de *whey protein* sem etanol, o aumento da temperatura de 50 para 70 °C reduz o tempo total de secagem de 200 para 120 minutos, representando uma diminuição de 40%. Resultados semelhantes de aumento da difusividade efetiva e redução do tempo de secagem com a elevação da temperatura foram relatados por Paula et al. (2020) e Baptestini et al. (2021) para espumas à base de whey protein. Para a espuma de whey protein com etanol, a temperatura de 70 °C também permite atingir uma RU próxima de zero em 120 minutos, representando uma redução de 25% em relação à condição a 50 °C com etanol (160 min), em conformidade com as observações de Paula et al. (2020) e Baptestini et al. (2021).

Para a espuma de albumina sem etanol, a passagem de 50 para 70 °C reduz o tempo de secagem de 280 para 200 minutos (redução de 28,6%), o que está de acordo com o estudo de Mançano et al. (2026). Esse comportamento é explicado pela alta estabilidade estrutural da albumina, que influencia diretamente os mecanismos de transferência (Kalambe e Guhe, 2025).

Em contrapartida, para a espuma de albumina com etanol a 70 °C, observa-se um comportamento atípico, afastando-se das tendências habituais (Silva Filho et al., 2016; Chaux-Gutiérrez et al., 2017): a razão de umidade estabiliza-se prematuramente em torno de 0,10. Esse fenômeno é explicado pela rápida evaporação do etanol associada à desnaturação térmica das proteínas da albumina, favorecendo a formação de uma camada superficial rígida e menos permeável à difusão de água, retendo a umidade no interior do produto (Kumar et al., 2019).

No âmbito da modelagem matemática a 70 °C, os modelos de Page e Midilli descrevem, com excelente capacidade preditiva, o conjunto da cinética de secagem (Baptestini et al., 2025; Saijuntha et al., 2024).

Figura 10- Cinética de secagem a 70 °C ajustada ao modelo de Midilli para espumas de albumina e whey protein com e sem etanol



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Na tabela 7 é apresentado os valores de R^2 , erro quadrado médio e os parâmetros (k, n, a, b) obtidos para cada modelo ajustado.

Tabela 7 - Coeficientes dos modelos de secagem.

Codigo	Modelo	k	n	a	b	R^2	EQM
ACE50	Newton	0,03	-	-	-	0,96	0
ACE50	Page	0,02	1,04	-	-	0,97	0
ACE50	Henderson e Pabis	0,03	-	1	-	0,96	0
ACE50	Midilli	0,02	1,06	0,99	0	0,97	0
ACE70	Newton	0,02	-	-	-	0,94	0
ACE70	Page	0,07	0,71	-	-	0,98	0
ACE70	Henderson e Pabis	0,02	-	0,91	-	0,95	0
ACE70	Midilli	0,06	0,79	1	0	0,98	0
ASE50	Newton	0,02	-	-	-	0,99	0

Codigo	Modelo	k	n	a	b	R²	EQM
ASE50	Page	0,01	1,13	-	-	0,99	0
ASE50	Henderson e Pabis	0,02	-	1,03	-	0,99	0
ASE50	Midilli	0,01	1,12	0,99	0	0,99	0
ASE70	Newton	0,02	-	-	-	0,98	0
ASE70	Page	0,01	1,23	-	-	0,99	0
ASE70	Henderson e Pabis	0,02	-	1,04	-	0,99	0
ASE70	Midilli	0,01	1,24	0,98	0	1	0
WCE50	Newton	0,02	-	-	-	0,98	0
WCE50	Page	0,01	1,16	-	-	0,99	0
WCE50	Henderson e Pabis	0,02	-	1,02	-	0,98	0
WCE50	Midilli	0,01	1,06	0,99	0	0,99	0
WCE70	Newton	0,03	-	-	-	0,99	0
WCE50	Page	0,04	0,94	-	-	0,99	0
WCE50	Henderson e Pabis	0,03	-	0,99	-	0,99	0
WCE50	Midilli	0,04	0,98	1	0	0,99	0
WSE50	Newton	0,01	-	-	-	0,95	0,01
WSE50	Page	0	1,44	-	-	0,98	0
WSE50	Henderson e Pabis	0,02	-	1,07	-	0,96	0
WSE50	Midilli	0	1,49	0,95	0	0,99	0
WSE70	Newton	0,02	-	-	-	0,97	0
WSE70	Page	0	1,38	-	-	0,99	0
WSE70	Henderson e Pabis	0,02	-	1,07	-	0,97	0
WSE70	Midilli	0	1,37	0,99	0	0,99	0

5.4. Propriedades físicas dos pós

Na Tabelas 8 e 9 analisa-se as propriedades físicas dos pós de manga, observa-se a influência da temperatura de secagem, do agente espumante e da aplicação de etanol sobre a umidade, a solubilidade e a atividade de água (aw).

Tabela 8 - Características Físicas dos Pós com albumina em duas temperaturas

Parâmetros	Alb. ¹ – 50°C sem etanol	Alb. ¹ – 50°C com etanol	Alb. ¹ – 70°C sem etanol	Alb. ¹ – 70°C com etanol
Umidade (%)	0,28 ± 0,03	0,22 ± 0,27	0,11 ± 0,02	0,12 ± 0,01
Solubilidade (%)	24,53 ± 4,84	36,00 ± 17,73	32,33 ± 6,77	57,13 ± 24,71
Atividade de água (Aw)	0,33 ± 0,04	0,34 ± 0,05	0,29 ± 0,06	0,25 ± 0,01

¹* Tratamento da condição ótima com albumina.

Tabela 9 - Características Físicas dos Pós com whey protein em duas temperaturas

Parâmetros	Whey ² – 50°C sem etanol	Whey ² – 50°C com etanol	Whey ² – 70°C com etanol	Whey ² –70°C sem etanol
Umidade (%)	0,32 ± 0,03	0,16 ± 0,04	2,32 ± 0,38	1,82 ± 0,12
Solubilidade (%)	22,67 ± 14,21	23,13 ± 6,93	26,3 ± 4,3	20,1 ± 2,3
Atividade de água (Aw)	0,39 ± 0,04	0,38 ± 0,01	0,347 ± 0,030	0,329 ± 0,033

²* Tratamento da condição ótima com *whey protein*.

O teor de umidade variou de 0,11 a 0,32%. O aumento da temperatura favoreceu a remoção de água, com os menores valores observados nos tratamentos com albumina a 70 °C. Os maiores teores foram registrados nas amostras secas a 50 °C sem etanol. A aplicação de etanol também contribuiu para a redução da umidade, principalmente a 50 °C, devido à sua elevada volatilidade, que pode favorecer as transferências de calor e massa durante a secagem (Macedo et al., 2021).

A solubilidade variou de 22,67 a 57,13%, com o maior valor observado para albumina a 70 °C com etanol. Esse resultado pode estar associado à formação de uma matriz mais porosa, favorecendo a penetração de água e a reidratação do pó.

A atividade de água (aw) variou de 0,25 a 0,39, sendo o menor valor observado para albumina a 70 °C com etanol e o maior para *whey protein* a 50 °C sem etanol.

Todos os tratamentos apresentaram a_w inferior a 0,40, condição favorável à estabilidade e à conservação do produto durante o armazenamento (Caparino et al., 2012; Chaux-Gutiérrez et al., 2017).

De modo geral, o tratamento com albumina a 70 °C e etanol apresentou o desempenho mais favorável, destacando-se pela maior solubilidade (57,13%) e menor atividade de água (0,25%).

5.5. Parâmetros colorimétricos dos pós

Na Tabela 10 e 11 analisa-se os parâmetros de cor mostraram que tanto o tipo de agente espumante quanto as condições de secagem influenciaram a aparência dos pós de manga.

Tabela 10 - Parâmetros colorimétricos com albumina em duas temperaturas.

Parâmetros	Alb. ¹ – 50 °C	Alb. ¹ – 50 °C	Alb. ¹ – 70 °C	Alb. ¹ – 70 °C
	sem etanol	com etanol	sem etanol	com etanol
L*	49,14 ± 14,81	52,54 ± 12,73	43,21 ± 5,22	53,81 ± 4,09
a*	7,11 ± 1,41	7,66 ± 0,91	7,30 ± 0,84	7,38 ± 0,83
b*	40,41 ± 8,18	41,41 ± 4,55	36,42 ± 3,38	37,80 ± 2,08
c*	40,97 ± 8,21	37,68 ± 12,93	37,16 ± 3,42	38,51 ± 2,15
h°	79,97 ± 0,30	79,47 ± 0,10	78,06 ± 1,69	78,81 ± 1,05

^{1*} Tratamento da condição ótima com albumina.

Tabela 11 - Parâmetros colorimétricos com o whey protein em duas temperaturas.

Parâmetros	Whey ² – 50 °C	Whey ² – 50 °C	Whey ² – 70 °C	Whey ² – 70 °C
	sem etanol	com etanol	sem etanol	com etanol
L*	34,48 ± 4,10	39,50 ± 1,08	35,62 ± 0,00	26,97 ± 0,72
a*	9,18 ± 0,13	8,97 ± 1,02	2,91 ± 1,40	8,55 ± 0,13
b*	43,57 ± 1,19	46,05 ± 3,49	44,67 ± 1,43	43,24 ± 0,34
c*	44,75 ± 1,63	46,92 ± 3,61	44,78 ± 1,47	44,07 ± 0,36
h°	77,99 ± 0,29	78,84 ± 0,55	85,92 ± 0,67	78,77 ± 0,05

^{2*} Tratamento da condição ótima com *whey protein*.

De modo geral, a albumina produziu pós mais claros, com valores de L* entre 43 e 54. Os parâmetros de cor mostraram que tanto o tipo de agente espumante quanto as condições de secagem influenciaram a aparência dos pós de manga. De modo geral, a

albumina produziu pós mais claros, com valores de L^* entre 43 e 54. Em contraste, o tratamento com whey protein a 70 °C e etanol apresentou a menor luminosidade ($L^* = 27$), indicando um maior escurecimento do produto.

Para o parâmetro a^* , os tratamentos com whey protein apresentaram maior variação entre as condições avaliadas, com destaque para o tratamento a 70 °C sem etanol, que apresentou o menor valor (2,9). Já em relação ao parâmetro b^* , os pós produzidos com whey protein apresentaram, de modo geral, uma coloração amarela mais intensa. A albumina, por sua vez, apresentou o menor valor de b^* no tratamento a 70 °C sem etanol.

A saturação também foi mais elevada nos tratamentos com whey protein, principalmente na condição de 50 °C com etanol. Quanto ao ângulo Hue, o maior valor foi observado no tratamento com whey protein a 70 °C sem etanol (85°), enquanto os menores valores ficaram próximos de 78°.

De forma geral, os resultados mostram que o whey protein favoreceu uma coloração mais intensa nos pós de manga, enquanto a albumina contribuiu para a obtenção de produtos visualmente mais claros. Além disso, o uso de etanol, principalmente nas condições de menor temperatura, parece ter contribuído para uma maior estabilidade da tonalidade, limitando as alterações de cor associadas ao tratamento térmico.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho confirma que a secagem em camada de espuma (SCE) associada ao uso de etanol constitui uma alternativa inteiramente viável e eficiente para produzir pó de manga de alta qualidade físico.

Desde a fase de otimização, ficou claro que a estabilidade e a baixa densidade das espumas repousam diretamente sobre sua formulação: reduzir as concentrações de goma xantana permitiu nomeadamente maximizar os desempenhos tanto da albumina quanto do *whey protein*.

Relativamente à desidratação, elevar a temperatura e aplicar etanol revelou-se um excelente meio para acelerar o processo. Sobre as matrizes estruturadas com a *whey protein*, o fato de passar de 50 para 70 °C permitiu reduzir o tempo de secagem em até 40%. A adição de etanol ofereceu um ganho suplementar, reduzindo ainda esse tempo em 25%.

Ao contrário, a albumina revelou um comportamento particular: se o calor acelerou bem a secagem em um primeiro momento, a combinação crítica de um tratamento a 70 °C com etanol acabou por frear a retirada final da água. Este fenômeno explica-se pela formação precoce de uma crosta na superfície da espuma, o que justifica a eficiência global superior da *whey protein* em comparação à albumina.

Em suma, a associação da técnica Secagem em Camada de Espuma (SCE) e do etanol impõe-se como uma tecnologia promissora para otimizar o tempo de transformação e valorizar os frutos tropicais sob a forma de pós de alto valor agregado.

7. REFERÊNCIAS

ABRAHÃO, F. R.; CORRÊA, J. L. G. Osmotic dehydration: More than water loss and solid gain. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 63, n. 17, p. 2970–2989, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.2003803>.

AL-DAIRI, M.; PATHARE, P. B.; AL-YAHYAI, R.; OPARA, U. L. Mechanical damage of fresh produce in postharvest transportation: current status and future prospects. *Trends in Food Science & Technology*, v. 124, p. 195–207, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.018>.

ALEXANDRE, G. P. D. L. et al. Assessment of infrared radiation in foam-mat drying of jabuticaba (*Plinia* sp.) pulp. *Journal of Food Process Engineering*, Hoboken, v. 48, n. 11, e70270, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpe.70270>.

ALMEIDA, E. I. B. et al. Potassium fertilization in 'Keitt' mango trees under semi-arid conditions. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 46, n. 4, p. 677–687, out./dez. 2015. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20150054>.

AMIT, S. K. et al. A review on mechanisms and commercial aspects of food preservation and processing. *Agriculture & Food Security*, Londres, v. 6, n. 1, p. 51, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40066-017-0130-8>.

ANUÁRIO BRASILEIRO DA FRUTICULTURA 2025. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta, 2025.

AOAC INTERNATIONAL. Official methods of analysis. 18. ed. Gaithersburg: AOAC International, 2010.

ARAÚJO, C. D. S. et al. Influence of pretreatment with ethanol and drying temperature on physicochemical and antioxidant properties of white and red pulp pitayas dried in foam mat. *Drying Technology*, v. 40, n. 3, p. 484–493, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1809446>.

BAPTESTINI, F. M. et al. Mathematical modeling of whey foam mat drying. *Revista Ceres*, v. 68, n. 4, p. 293–300, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737X202168040003>.

BELAL, M.; HOSSAIN, M. A.; MITRA, S.; ZZAMAN, W. Effect of foaming agent concentration and foam stabilizer on the foaming capacity and physical properties of tomato powder at dried at different temperature: foam mat dried tomato powder. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, v. 12, n. 4, e4741, 2023. DOI: <https://doi.org/10.55251/jmbfs.4741>.

BIMBENET, J. J.; DUQUENOY, A.; TRYSTRAM, G. Génie des procédés alimentaires: des bases aux applications. Paris: Dunod, 2017. 688 p.

BRUNACHE, M. The mango value chain in Haiti: constraints and opportunities of a promising industry. *International Journal of Agriculture Innovation, Technology and*

Globalisation, v. 4, n. 1, p. 37–62, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJAITG.2024.142185>.

BURTON-FREEMAN, B. M.; SANDHU, A. K.; EDIRISINGHE, I. Mangos and their bioactive components: adding variety to the fruit plate for health. *Food & Function*, v. 8, n. 9, p. 3010–3032, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1039/C7FO00190H>.

CAPARINO, O. A. et al. Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine ‘Carabao’ var.) powder. *Journal of Food Engineering*, v. 111, n. 1, p. 135–148, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.01.010>.

CARDOSO, C. E. D. F.; LOBO, F. A. T. F.; TEODORO, A. J. Influence of foam mat drying on the nutritional and technological potential of fruits: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 64, n. 17, p. 5896–5910, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2159922>.

CARNEIRO, M. A. et al. Nutritional status and yield of 'Tommy Atkins' mango under potassium management. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, DF, v. 52, n. 11, p. 1021–1029, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2017001100008>.

CAVALCANTE, I. H. L. et al. Potassium doses on fruit production and nutrition of mango (*Mangifera indica* L.) cv. Palmer. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia, Maracaibo*, v. 33, n. 4, p. 418–432, 2016.

CÉSAR, M. C. Produção de bebida fermentada de manga. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2024.

CHANDRAMOHAN, V. P. Convective drying of food materials: an overview with fundamental aspect, recent developments, and summary. *Heat Transfer*, v. 49, n. 3, p. 1281–1313, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/htj.21662>.

CHAUX-GUTIÉRREZ, A. M. et al. The physical and morphological characteristics of mango powder (*Mangifera indica* L. cv Tommy Atkins) produced by foam mat drying. *Food Biophysics*, v. 12, n. 1, p. 69–77, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11483-016-9464-1>.

CHAUX-GUTIÉRREZ, A. M.; SANTOS, A. B.; GRANDA-RESTREPO, D. M.; MAURO, M. A. Foam mat drying of mango: effect of processing parameters on the drying kinetic and product quality. *Drying Technology*, v. 35, n. 5, p. 631–641, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1201486>.

CORRÊA, J. L. G. et al. The influence of ethanol on the convective drying of unripe, ripe, and overripe bananas. *Drying Technology*, v. 30, n. 8, p. 817–826, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.667469>.

CORRÊA, J. L. G. et al. Optimisation of vacuum pulse osmotic dehydration of blanched pumpkin. *International Journal of Food Science and Technology*, v. 49, n. 9, p. 2008–2014, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.12502>.

CORRÊA, J. L. G. et al. Influence of ultrasound application on both the osmotic pretreatment and subsequent convective drying of pineapple (*Ananas comosus*). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, v. 41, p. 284–291, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.04.002>.

CORRÊA, J. L. G.; PEREIRA, L. M.; VIEIRA, G. S.; HUBINGER, M. D. Mass transfer kinetics of pulsed vacuum osmotic dehydration of guavas. *Journal of Food Engineering*, v. 96, n. 4, p. 498–504, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.08.032>.

COŞKUN, N. et al. The Impact of Freeze Drying on Bioactivity and Physical Properties of Food Products. *Applied Sciences*, v. 14, n. 20, p. 9183, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14209183>.

DRABO, C. et al. Diversité variétale des manguiers (*Mangifera indica* L.) et des pratiques culturelles associées à la production au Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, v. 16, n. 2, p. 787–797, 2022. DOI: <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v16i2.22>.

EVANS, E. A.; BALLEEN, F. H.; SIDDIQ, M. Tropical and subtropical fruit processing: economic importance, trade, and global trends. *In*: SIDDIQ, M.; AHMED, J.; LOBO, M. G. (ed.). *Tropical and subtropical fruits: postharvest theory and technology*. Ames: Wiley-Blackwell, 2017. p. 1–22.

FERNANDES, F. A. N. et al. Use of ultrasound for dehydration of mangoes (*Mangifera indica* L.): kinetic modeling of ultrasound-assisted osmotic dehydration and convective air-drying. *Journal of Food Science and Technology*, v. 56, n. 4, p. 1793–1800, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03608-1>.

FERREIRA, K. M. et al. Physiological aspects of mango trees. *Scientia Plena*, v. 16, n. 4, p. 1–10, 2020. DOI: <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2020.040201>.

GAO, J. et al. Novel drying pretreatment technologies and their applications in the food industry. *Food Materials Research*, v. 3, art. 14, 2023. DOI: <https://doi.org/10.48130/FMR-2023-0014>.

GIRELLI, A.; SANT'ANNA, V.; KLEIN, M. P. Drying of butiá pulp by the foam-layer method and characterization of the obtained powder. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 58, e03050, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.PAB2023.V58.03050>.

GUO, Q. et al. Microwave processing techniques and their recent applications in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, v. 67, p. 236–247, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.07.007>.

HARDY, Z.; JIDEANI, V. A. Foam-mat drying technology: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 57, n. 12, p. 2560–2572, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1020359>.

ITO, A. P. et al. Efeito do processo de desidratação osmótica a pulso de vácuo na transferência de massa e nas propriedades reológicas e de cor de fatias de manga.

Ciência e Tecnologia de Alimentos, v. 27, n. 1, p. 54–63, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0101-20612007000100010>.

JAYARAM, K. C. Fruits of colonialism: the production of mangoes as commodities in northern Haiti. *Critique of Anthropology*, v. 38, n. 4, p. 461–482, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1177/0308275X18794704>.

JIMOH, K. A. et al. Recent advances in the drying process of grains. *Food Engineering Reviews*, v. 15, n. 3, p. 548–576, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12393-022-09333-z>.

KADAM, D. M.; BALASUBRAMANIAN, S. Foam mat drying of tomato juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 35, n. 4, p. 488–495, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2010.00492.x>.

KALAMBE, S.; GUHE, S. Foam mat drying of perishable products: a critical review of process parameters, product quality, and sustainable prospects. *Sustainable Food Technology*, Cambridge, v. 4, p. 133–152, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1039/D5FB00203F>.

KHAN, M. I. H. et al. Fundamental understanding of heat and mass transfer processes for physics-informed machine learning-based drying modelling. *Energies*, v. 15, n. 24, p. 9347, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15249347>.

KHATRI, B. et al. Sustainable drying techniques for liquid foods and foam mat drying. *Discover Food*, v. 4, n. 1, art. 166, p. 1–21, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44187-024-00223-3>.

KILOES, A. M. et al. What do consumers want in fresh mangoes? A systematic literature review. *International Journal of Food Science and Technology*, v. 57, n. 3, p. 1473–1492, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.15551>.

KROEHNKE, J. et al. Osmotic dehydration and convective drying of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*): the influence of ultrasound on process kinetics and product quality. *Ultrasonics Sonochemistry*, v. 71, art. 105377, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105377>.

KUMAR, A.; KANDASAMY, P.; CHAKRABORTY, I. Analysis of foaming properties of mango pulp for foam-mat drying: impact of egg albumin concentration and whipping time. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, v. 103, n. 3, p. 717–724, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40030-022-00659-2>.

KUMAR, G.; KUMAR, N.; PRABHAKAR, P. K.; KISHORE, A. Foam mat drying: recent advances on foam dynamics, mechanistic modeling and hybrid drying approach. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 63, n. 26, p. 8275–8291, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2042858>.

KUMAR, N.; ARAKERI, J. H.; BOBJI, M. S. Formation of a hard surface layer during drying of a heated porous media. *Physics of Fluids*, v. 31, n. 12, p. 122105, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5126166>.

LE, T. D. et al. Supply chain management of mango (*Mangifera indica* L.) fruit: a review with a focus on product quality during postharvest. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, v. 5, art. 799431, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.799431>.

LI, P. et al. A review: study on the enhancement mechanism of heat and moisture transfer in deformable porous media. *Processes*, v. 11, n. 9, art. 2699, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr11092699>.

LIAPIS, A. I.; BRUTTINI, R. Freeze drying. *In*: MUJUMDAR, A. S. (ed.). *Handbook of Industrial Drying*. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 1995. p. 305–343.

LOMBARD, G. E. et al. Osmotic dehydration – a pre-treatment for pineapple drying. *Journal of Food Engineering*, v. 85, n. 1, p. 2–10, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.06.033>.

MACEDO, L. L. et al. Process optimization and ethanol use for obtaining white and red dragon fruit powder by foam mat drying. *Journal of Food Science*, v. 86, n. 2, p. 426–433, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15588>.

MANÇANO, L. F. et al. Mathematical Modeling and Physicochemical Characterization of Foam-Mat Drying of Acerola (*Malpighia emarginata*) Pulp. *Foods*, Basel, v. 15, n. 3, p. 492, 2026. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods15030492>.

MARNDR; FAO. *Statistiques Agricoles d'Haïti 2019*. Port-au-Prince: Ministère de l'Agriculture, des Ressources Naturelles et du Développement Rural / Food and Agriculture Organization, 2019.

MARTÍNEZ, K. D. et al. Interfacial and foaming properties of soy protein and their hydrolysates. *Food Hydrocolloids*, v. 23, n. 8, p. 2149–2157, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2009.05.006>.

MARTÍNEZ-PADILLA, L. P. et al. Effects of xanthan gum rheology on the foaming properties of whey protein concentrate. *Journal of Food Engineering*, v. 156, p. 22–30, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.01.020>.

MENDONÇA, K. S. de et al. Influences of convective and vacuum drying on the quality attributes of osmo-dried pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) slices. *Food Chemistry*, v. 224, p. 212–218, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.12.045>.

MILANI, E.; HASHEMI, N.; HASHEMI, M. Physicochemical properties and flow behavior of natural sweetener and colorant from foam-mat dried grape powder. *Journal of Food Process Engineering*, v. 47, n. 2, e14538, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpe.14538>.

MONTGOMERY, D. C. *Design and analysis of experiments*. 8. ed. New York: John Wiley & Sons, 2012.

MUTHUKUMARAN, A.; RATTI, C.; RAGHAVAN, V. G. Foam-mat freeze drying of egg white and mathematical modeling. Part I: optimization of egg white foam stability.

Drying Technology, v. 26, n. 4, p. 508–512, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373930801929377>.

OLIVEIRA, C. P. et al. Mango production and export performance in the São Francisco Valley. *Revista Brasileira de Fruticultura*, Jaboticabal, v. 36, n. 2, p. 500–510, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/0100-2945-385/13>.

PARSEH, S. et al. Optimization of formulation for aerated dessert containing whey protein concentrate and xanthan gum using response surface methodology and investigation on rheological and texture properties. *Journal of Food Process Engineering*, v. 45, n. 5, e14013, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpe.14013>.

PAULA, R. R. et al. Drying kinetics and physicochemical properties of whey dried by foam mat drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 44, n. 11, e14796, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpp.14796>.

PHUONG, N. N. M.; LE, T. T.; VAN CAMP, J.; RAES, K. Dehydration of phenolic-rich extract from rambutan (*Nephelium lappaceum* L.) peel by foam mat drying. *LWT*, v. 198, art. 115973, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115973>.

QADRI, O. S.; SRIVASTAVA, A. K.; YOUSUF, B. Trends in foam mat drying of foods: special emphasis on hybrid foam mat drying technology. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 60, n. 10, p. 1667–1676, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1588221>.

RATTI, C. Freeze-Drying Process Design. In: AHMED, J.; RAHMAN, M. S. (ed.). *Handbook of Food Process Design*. Chichester: Wiley-Blackwell, 2012. p. 620–647. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781444398274.ch22>.

RATTI, C. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. *Journal of Food Engineering*, v. 49, n. 4, p. 311–319, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00228-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00228-4).

REIS, F. R.; DE MORAES, A. C. S.; MASSON, M. L. Impact of foam-mat drying on plant-based foods bioactive compounds. *Plant Foods for Human Nutrition*, v. 76, n. 2, p. 153–160, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11130-021-00899-3>.

REIS, F. R. et al. Effect of processing methods on yacon roots health-promoting compounds and related properties. *Trends in Food Science & Technology*, v. 113, p. 346–354, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.04.015>.

RICCI, J. et al. Assessment of biophysical properties of mango purées from whole-fruit NIRS of different varieties. *LWT*, v. 203, art. 118917, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.118917>.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. *Planejamento de experimentos e otimização de processos: uma estratégia sequencial de planejamentos*. Campinas: Casa do Pão Editora, 2005.

ROSENDO, V. Mango export record. *Canal Rural*, 2024.

SAIJUNTHA, J. et al. Integrating Microwave Heating with Foam-Mat Drying: Drying Kinetics and Optimization for Thick Foamed Mango Pulp. *Trends in Sciences*, Bangkok, v. 21, n. 10, art. 7654, 2024. DOI: <https://doi.org/10.48048/tis.2024.7654>.

SANSOMCHAI, P.; SROYNAK, R.; TIKAPUNYA, T. Powder qualities of foam-mat dried mango. *Trends in Sciences*, v. 20, n. 5, p. 5308, 2023. DOI: <https://doi.org/10.48048/tis.2023.5308>.

SANTOS, N. C. et al. Foaming characteristics and impact of ethanol pretreatment in drying behavior and physical characteristics for avocado pulp powder obtained by foam mat drying. *Journal of Food Science*, v. 87, n. 4, p. 1780–1795, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16123>.

SGHARI, Ali; ZONGO, P. Assana; OSSE, Emmanuel Freddy; AGHAJANZADEH, Sara; RAGHAVAN, Vijaya; KHALLOUFI, Seddik. Review of osmotic dehydration: Promising technologies for enhancing products' attributes, opportunities, and challenges for the food industries. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, v. 23, n. 3, e13346, 2024. DOI: 10.1111/1541-4337.13346

SHIMOYAMA, A. et al. Guar foaming albumin: a low molecular mass protein with high foaming activity and foam stability isolated from guar meal. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 56, n. 19, p. 9200–9205, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf8014888>.

SILVA FILHO, E. D. et al. Drying kinetics in foam layer of mango flesh cv. Haden. *Comunicata Scientiae*, v. 7, n. 3, p. 325–332, 2016. DOI: <https://doi.org/10.14295/cs.v7i3.1248>.

TAREKEGN, K.; KELEM, F. Assessment of mango Post-Harvest losses along value chain in the Gamo zone, southern Ethiopia. *International Journal of Fruit Science*, v. 22, n. 1, p. 170–182, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/15538362.2022.2037012>.

THUWAPANICHAYANAN, R.; PRACHAYAWARAKORN, S.; SOPONRONNARIT, S. Drying characteristics and quality of banana foam mat. *Journal of Food Engineering*, v. 86, n. 4, p. 573–583, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.11.013>.

THUY, N. M. et al. Effect of foaming conditions on foam properties and drying behavior of powder from magenta (*Peristrophe roxburghiana*) leaves extracts. *Horticulturae*, v. 8, n. 6, art. 546, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae8060546>.

THOKCHOM, R.; MANDAL, G. Production preference and importance of passion fruit (*Passiflora edulis*): a review. *Journal of Agricultural Engineering and Food Technology*, v. 4, n. 1, p. 27-30, 2017.

TRAN, N. T. Y. et al. Developing mango powders by foam mat drying technology. *Food Science & Nutrition*, v. 11, n. 7, p. 4084–4092, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/fsn3.3396>.

VANOLI, M. et al. Mango carotenoids prediction. *Agriculture*, v. 14, n. 2, p. 205, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14020205>.

VASUDEVAN, N. et al. Development of foam mat dried soursop powder using Arabic gum and fish gelatin as foaming agent. *Food Research*, v. 4, n. 1, p. 237–243, 2020. DOI: [https://doi.org/10.26656/fr.2017.4\(1\).266](https://doi.org/10.26656/fr.2017.4(1).266).

VELASQUEZ, A. M. et al. Skin discoloration and softening are the primary factors impacting postharvest quality of hot water-treated mango (*Mangifera indica* L.). *Scientia Horticulturae*, v. 316, art. 112005, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112005>.

VIMERCATI, W. C. et al. Encapsulation of coffee silverskin extracts by foam mat drying and comparison with powders obtained by spray drying and freeze-drying. *Journal of Food Science*, v. 87, n. 4, p. 1767–1779, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16091>.

WATERHOUSE, A. L. Determination of total phenolics. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, v. 6, n. 1, p. I1.1.1–I1.1.8, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1002/0471142913.fai0101s06>.

YAN, Y. et al. Research Progress Regarding Heat and Mass Transfer Characteristics of Agricultural Products Under Different Drying Methods, and Associated Applications: A Review. *Foods*, v. 15, n. 14, p. 2530, 2026. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods15142530>.

YANG, X.; FOEGEDING, E. A. The stability and physical properties of egg white and whey protein foams explained based on microstructure and interfacial properties. *Food Hydrocolloids*, v. 25, n. 7, p. 1687–1701, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.02.014>.

YAO, L.; FAN, L.; DUAN, Z. Effect of different pretreatments followed by hot-air and far-infrared drying on the bioactive compounds, physicochemical property and microstructure of mango slices. *Food Chemistry*, v. 305, art. 125477, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125477>.

ZHANG, M.; CHEN, H.; MUJUMDAR, A. S.; TANG, J.; MIAO, S.; WANG, Y. Recent developments in high-quality drying of vegetables, fruits, and aquatic products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 57, n. 6, p. 1239–1255, 2017. DOI: [10.1080/10408398.2014.979280](https://doi.org/10.1080/10408398.2014.979280).