

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

WILIAM COLEN ZAMPRONHA

CINÉTICA DE SECAGEM DOS COGUMELOS SHIMEJI E SHIITAKE

MEDIANEIRA

2025

WILIAM COLEN ZAMPRONHA

CINÉTICA DE SECAGEM DOS COGUMELOS SHIMEJI E SHIITAKE

Drying kinetics of shimeji and shiitake mushrooms

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Alimentos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Profa. Dra. Daiane Cristina Lenhard.

Coorientadora: Profa. Dra. Carolina Castilho Garcia.

MEDIANEIRA

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

WILIAM COLEN ZAMPRONHA

CINÉTICA DE SECAGEM DOS COGUMELOS SHIMEJI E SHIITAKE

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Alimentos da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 07/fevereiro/2025

Daiane Cristina Lenhard
Doutorado em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Carolina Castilho Garcia
Doutorado em Engenharia e Ciência dos Alimentos
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Elciane Regina Zanatta
Doutorado em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Igor Henrique de Mello Rodrigues Ciolin
Mestrado em Engenharia Química
Universidade Federal do Paraná

MEDIANEIRA

2025

AGRADECIMENTOS

À minha família, por ser a base sólida que me sustentou em todos os momentos dessa jornada. A paciência, apoio e incentivo que recebi foram essenciais para que eu pudesse chegar até aqui.

Aos meus amigos, que estiveram ao meu lado, sempre dispostos a me ouvir, me animar e, principalmente, a compartilhar os desafios e conquistas dessa caminhada acadêmica. Vocês tornaram o percurso mais leve e alegre.

Ao João Antônio Soares Miranda, grande amigo com quem tive a alegria de compartilhar não apenas os anos de escola, mas também o período da faculdade. Dividir o dia a dia, as histórias e os desafios com você tornaram essa fase ainda mais significativa e inesquecível.

À minha companheira, minha namorada e parceira de vida, Sandra Luiza Jaschovski, que esteve ao meu lado em todos os momentos, celebrando comigo as vitórias e me apoiando nos dias difíceis. Sua compreensão, amor e palavras de incentivo foram fundamentais para que eu nunca desistisse dos meus sonhos.

À minha orientadora, professora Daiane Cristina Lenhard, e à minha coorientadora, Carolina Castilho Garcia, pela dedicação, paciência, orientação impecável e apoio ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho. A competência, o olhar atento aos detalhes e a disposição de ambas para guiar meu aprendizado foram essenciais para a realização deste projeto. Agradeço também à professora Elciane Regina Zanatta por emprestar as estufas, permitindo a realização deste estudo. Agradeço ainda a todos os professores da UTFPR Medianeira que, com seus conhecimentos, ensinamentos e contribuições, ajudaram a moldar minha formação acadêmica. O apoio de cada um foi fundamental para minha evolução e conclusão dessa etapa.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná e à Central Analítica Multiusuário de Medianeira (CEANMED) pelo aporte de laboratórios e equipamentos.

A todos que, de alguma forma, participaram e contribuíram para a concretização deste trabalho, meu mais sincero muito obrigado!

A imaginação é mais importante que o conhecimento. O conhecimento é limitado, enquanto a imaginação abraça o mundo inteiro.
(Albert Einstein; WINSTON, 1955).

RESUMO

Os cogumelos das espécies *Lentinula edodes* e *Pleurotus spp.*, popularmente conhecidos como shiitake e shimeji, respectivamente, são apreciados por suas propriedades terapêuticas, e podem auxiliar na prevenção de hipertensão, diabetes e até mesmo câncer. Em virtude de sua composição nutricional, que inclui proteínas, fibras alimentares, minerais e vitaminas, além do baixo teor de gorduras e alta umidade, a secagem é uma operação unitária que pode ser utilizada para prolongar a vida de prateleira dos cogumelos, reduzindo o desenvolvimento de microrganismos e facilitando seu armazenamento e transporte. O presente estudo teve como objetivo estudar a cinética de secagem dos cogumelos shimeji e shiitake a 60 °C, ajustando os dados experimentais a diferentes modelos matemáticos. A determinação da umidade revelou valores de $89,41 \pm 0,29\%$ para o shimeji e $89,94 \pm 1,14\%$ para o shiitake, resultados próximos aos reportados na literatura, evidenciando a alta perecibilidade desses cogumelos. Na etapa de secagem, a difusividade efetiva, obtida pela segunda lei de Fick, variou entre $0,0617$ e $2,585 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, apresentando valores compatíveis com estudos anteriores. No entanto, o modelo de Fick mostrou um ajuste limitado aos dados experimentais, possivelmente devido às alterações geométricas e estruturais observadas durante a operação. Em contrapartida, os modelos empíricos, como os de Page e Wang e Singh, apresentaram melhor ajuste estatístico, com altos valores de R^2 ($>0,90$) e baixos valores de erro médio estimado (SE) e raiz do erro quadrático médio ($RMSE$). Os resultados indicaram que o modelo de Page foi o mais adequado para descrever a secagem dos chapéus do shimeji e do shiitake, enquanto o modelo de Wang e Singh obteve o melhor ajuste para os talos médios de ambos os cogumelos. A diferença no comportamento de secagem entre talos e os chapéus pode ser explicada pela relação superfície-volume e pela dinâmica de transferência de massa. O presente estudo destaca a importância da escolha de modelos adequados para a cinética de secagem de alimentos, visando a otimização dos processos, a redução de perdas e a melhoria da qualidade dos produtos secos.

Palavras-chave: Cogumelos comestíveis; modelos matemáticos; massa - transferência.

ABSTRACT

The mushrooms of the species *Lentinula edodes* and *Pleurotus* spp., commonly known as shiitake and shimeji, respectively, are valued for their therapeutic properties and may help prevent hypertension, diabetes, and even cancer. Due to their nutritional composition, which includes proteins, dietary fibers, minerals, and vitamins, along with low fat content and high moisture, drying is a unit operation that can be used to extend the shelf life of mushrooms, reducing microbial growth and facilitating their storage and transportation. This study aimed to investigate the drying kinetics of shimeji and shiitake mushrooms at 60 °C, fitting the experimental data to different mathematical models. Moisture determination revealed values of $89.41 \pm 0.29\%$ for shimeji and $89.94 \pm 1.14\%$ for shiitake, results close to those reported in the literature, highlighting the high perishability of these mushrooms. During the drying process, the effective diffusivity, obtained using Fick's second law, ranged from 0.0617 to $2.585 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, showing values consistent with previous studies. However, Fick's model exhibited limited fit to the experimental data, possibly due to geometric and structural changes observed during the operation. On the other hand, empirical models, such as those of Page and Wang & Singh, provided better statistical fits, with high R^2 values (>0.90) and low estimated standard error (SE) and root mean square error (RMSE) values. The results indicated that the Page model was the most suitable for describing the drying of shimeji and shiitake caps, while the Wang & Singh model showed a better fit for the middle stems of both mushrooms. The difference in drying behavior between stems and caps can be explained by the surface-to-volume ratio and mass transfer dynamics. This study highlights the importance of selecting appropriate models for food drying kinetics, aiming to optimize processes, reduce losses, and improve the quality of dried products.

Keywords: Edible mushrooms; Mathematical models; Mass-transfer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Umidade do alimento durante a secagem.....	21
Figura 2 - Padronização das matérias primas	22
Figura 3 - Chapéus do cogumelo shiitake <i>in natura</i> e após secagem a 60°C por 24 h	28
Figura 4 - Talos do cogumelo shiitake <i>in natura</i> e após secagem a 60 °C por 24 h..	28
Figura 5 - Talos do cogumelo shimeji <i>in natura</i> e após secagem a 60 °C por 24 h...	29
Figura 6 - Chapéus do cogumelo shimeji <i>in natura</i> e após secagem a 60 °C por 24 h	29
Figura 7 - Curva de secagem dos chapéus grandes do shimeji a 60 °C, utilizando o modelo de Page	32
Figura 8 - Curva de secagem dos chapéus médios do shimeji a 60 °C, utilizando o modelo de Page	33
Figura 9 - Curva de secagem dos talos grandes do shimeji a 60 °C, utilizando o modelo de Page	33
Figura 10 - Curva de secagem dos talos médios do shimeji a 60 °C, utilizando o modelo de Wang e Singh	34
Figura 11 - Curva de secagem dos chapéus do shiitake a 60 °C, utilizando o modelo de Wang e Singh	34
Figura 12 - Curva de secagem dos talos do shiitake a 60 °C, utilizando o modelo de Wang e Singh.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição Química dos Cogumelos	16
Tabela 2 - Modelos empíricos/semiempíricos utilizados para descrever o processo de secagem	20
Tabela 3 - Umidade dos cogumelos (%)	25
Tabela 4 - Valores da difusividade efetiva da água durante a secagem a 60 °C dos cogumelos, coeficiente de determinação, erro médio relativo e erro quadrático médio relativo	26
Tabela 5 - Parâmetros estatísticos e parâmetros dos modelos que melhor representaram os dados experimentais da secagem dos chapéus grandes do cogumelo shimeji	30
Tabela 6 - Parâmetros estatísticos e parâmetros dos modelos que melhor representaram os dados experimentais da secagem dos chapéus médios do cogumelo shimeji	30
Tabela 7 - Parâmetros estatísticos e parâmetros dos modelos que melhor representaram os dados experimentais da secagem dos talos grandes do cogumelo shimeji	30
Tabela 8 - Parâmetros estatísticos e parâmetros dos modelos que melhor representaram os dados experimentais da secagem dos talos médios do cogumelo shimeji	31
Tabela 9 - Parâmetros estatísticos e parâmetros dos modelos que melhor representaram os dados experimentais da secagem dos chapéus do cogumelo shiitake	31
Tabela 10 - Parâmetros estatísticos e parâmetros dos modelos que melhor representaram os dados experimentais da secagem dos talos do cogumelo shiitake	31

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	12
2.1	Objetivo Geral	12
2.2	Objetivos Específicos	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1	Fungos	13
3.2	Cogumelos Comestíveis	14
3.3	Secagem.....	16
3.4	Cinética de Secagem.....	19
4	MATERIAL E MÉTODOS	22
4.1	Matéria-prima e Padronização dos Cogumelos <i>In Natura</i>	22
4.2	Cinética e Modelagem da Secagem	23
4.3	Análises Estatísticas.....	24
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
6	CONCLUSÃO	36
	REFERÊNCIAS.....	37

1 INTRODUÇÃO

Definidos pelo renomado cientista Shu-Ting Chang como “macrofungos com corpos de frutificação característicos, grandes o suficiente para serem visíveis a olho nu e coletados com as mãos”, os cogumelos são alimentos que, desde os primórdios da humanidade, têm sido valorizados por suas propriedades nutritivas, medicinais e culinárias. Algumas espécies, como *Agaricus bisporus*, o famoso champignon de Paris, são consideradas especiarias nobres (Furlani; Godoy, 2007).

Suas propriedades nutritivas são de grande relevância, pois os cogumelos são ricos em proteínas, fibras, vitaminas e minerais, além de apresentarem baixo teor de gordura. Além disso, suas propriedades medicinais também se destacam, contribuindo para a prevenção de doenças como hipertensão, diabetes e câncer (Helm; Coradin; Kestring, 2009).

Helm, Coradin e Kestring (2009) constataram que, no Brasil, o consumo e cultivo de cogumelos vêm se popularizando desde a metade do século XX, devido à chegada de imigrantes japoneses e chineses, que já os utilizavam tradicionalmente em sua alimentação e medicina. Um estudo conduzido na região Sul do Brasil em 2021 indicou que os cogumelos comestíveis mais populares entre a população são o shiitake, shimeji, champignon de Paris, portobello e hiratake (Antunes *et al.*, 2021).

O shiitake é o segundo mais consumido no Brasil, tendo esse consumo iniciado por volta de 1990. Devido à sua alta concentração de proteínas, é conhecido em algumas regiões como “carne vegetal” e contém nove aminoácidos essenciais. Sendo fungos, sua reprodução ocorre por meio de esporos, que, em condições favoráveis, desenvolvem-se em indivíduos independentes. Além disso, seu cultivo não requer um alto investimento inicial. Urban (2017) destaca *Agaricus bisporus* (champignon de Paris) e *Lentinula edodes* (shiitake) como duas das espécies de cogumelos mais amplamente cultivadas no Brasil.

O *Pleurotus spp.* é conhecido comercialmente como shimeji preto e shimeji branco e, assim como o shiitake, apresenta alto valor nutricional e baixo teor calórico. Além disso, possui propriedades medicinais, incluindo atividade hipoglicemiante, antitrombótica e antimicrobiana (Helm; Coradin e Kestring, 2009).

Uma pesquisa realizada por Gomes *et al.* (2023), com base nos dados do Inquérito Nacional de Alimentação (INA) coletados entre julho de 2017 e julho de 2018,

estimou que aproximadamente 1,34% da população brasileira consumia esses alimentos.

Por ser um alimento com alto teor de umidade, o cogumelo se deteriora rapidamente, o que dificulta seu armazenamento *in natura*. Para estender sua vida de prateleira, é necessário submetê-lo a algum tipo de processamento (Kurozawa, 2005). Um dos métodos mais utilizados, e que será abordado ao longo deste trabalho, é a secagem. Durante esse processo, a água ou qualquer outro líquido presente no alimento sólido é removido, reduzindo assim sua umidade (Celestino, 2010).

Três parâmetros principais são utilizados para analisar o processo de secagem: velocidade, temperatura e umidade relativa do ar. Com base nesses dados, estuda-se a cinética de secagem, que corresponde à taxa de remoção da umidade do alimento. Durante o processo, o teor de umidade é determinado periodicamente, tanto em base seca (kg de água/kg de sólido seco) quanto em base úmida (kg de água/kg de sólido úmido). A partir dessas medições, constrói-se um gráfico da umidade em função do tempo de secagem, cuja curva resultante representa o comportamento do alimento ao longo do processo (Celestino, 2010).

A secagem é um processo essencial para a conservação de alimentos, pois reduz o teor de umidade, inibindo o crescimento de microrganismos e prolongando a vida de prateleira do produto (Alves & Nicoletti, 2016). Além disso, esse método facilita o armazenamento, transporte e comercialização dos alimentos, contribuindo para a redução de perdas pós-colheita e agregando valor ao produto final.

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo estudar a cinética de secagem das espécies *Lentinula edodes* (shiitake) e *Pleurotus spp.* (shimeji), analisando os parâmetros envolvidos no processo e ajustando os dados experimentais a diferentes modelos matemáticos. Espera-se que os resultados obtidos possam contribuir para o desenvolvimento de métodos de secagem mais eficientes e para a otimização da conservação desses cogumelos, ampliando seu potencial de comercialização e consumo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Estudar a cinética de secagem de talos e chapéus dos cogumelos shiitake e shimeji de diferentes espessuras, predizendo a operação por meio de modelos matemáticos referenciados na literatura.

2.2 Objetivos Específicos

Realizar a secagem à temperatura de 60 °C de chapéus e talos dos cogumelos shiitake e shimeji para estudar sua cinética de secagem;

Determinar a umidade das amostras para acompanhar a secagem por meio de balanços de massa;

Ajustar os dados experimentais das secagens a diferentes modelos matemáticos referenciados na bibliografia;

Determinar o coeficiente de difusão efetivo das amostras durante o processo de secagem.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Fungos

Os fungos são organismos encontrados nos mais diversos ambientes e climas, são eucariontes, unicelulares ou pluricelulares que, por muito tempo, foram associados ao reino vegetal, pois possuíam características semelhantes às plantas. No entanto, são heterotróficos, absorvendo seu alimento através de enzimas que decompõem as moléculas complexas do substrato em moléculas mais simples, facilitando a digestão. Para classificá-los corretamente, em 1969 Whittaker criou o Reino Fungi. Em 2017, foram estimados de 2,2 a 3,8 milhões de espécies, sendo apenas 120.000 espécies identificadas na literatura (Azevedo; Barata, 2018).

A reprodução dos fungos ocorre de maneira sexuada e assexuada. Na reprodução sexuada, o processo se divide em três etapas principais: plasmogamia, cariogamia e meiose. Na plasmogamia, há a fusão do citoplasma de dois micélios compatíveis, enquanto na cariogamia ocorre a fusão dos núcleos haploides, formando uma célula diploide. Posteriormente, a meiose reduz a ploidia dessas células, originando esporos haploides com maior variabilidade genética. Por outro lado, a reprodução assexuada pode ocorrer por fragmentação do micélio, brotamento ou esporulação, sendo esses mecanismos fundamentais para a dispersão rápida dos fungos no ambiente (Alexopoulos *et al.*, 1996).

O Reino Fungi é dividido em sete Filos: Chytridiomycota, Neocallimastigomycota, Blastocladiomycota, Microsporídia, Glomeromycota, Ascomycota e Basidiomycota (Hibbett *et al.*, 2007).

O Filo Basidiomycota é frequentemente considerado o grupo mais complexo dentro do Reino Fungi, devido à diversidade e complexidade de suas estruturas. Estima-se que esse filo possua cerca de 32.000 espécies (Kirk *et al.*, 2008).

Para germinarem, os fungos precisam encontrar um local que forneça condições adequadas para seu desenvolvimento. Fatores como umidade, temperatura, pH e a quantidade de nutrientes no solo são de suma importância para a germinação destes esporos e influenciam diretamente em sua composição química. (Azevedo; Barata, 2018).

A diversidade biológica dos fungos é inestimável, por isso, figuram entre os organismos mais relevantes do mundo (Mueller; Bills, 2004). O cogumelo, por exemplo, representa apenas uma parte do fungo como um todo. Ele é a estrutura visível a olho nu, responsável pela produção de esporos sexuais. No entanto, a maior parte do fungo encontra-se no micélio, que se desenvolve no substrato onde o organismo cresce, como folhas em decomposição, troncos ou até mesmo insetos. Além das denominações populares como orelhas-de-pau e urupês, o termo mais abrangente "esporoma" também é utilizado na literatura para designar a estrutura macroscópica dos fungos. De forma mais específica, empregam-se os termos "ascoma" para cogumelos do filo Ascomycota e "basidioma" para os do filo Basidiomycota (Santana *et al.*, 2023).

3.2 Cogumelos Comestíveis

Os cogumelos comestíveis podem ser classificados em diversas categorias, com base em diferentes características. Essa classificação abrange cogumelos comestíveis e não comestíveis, venenosos, selvagens ou cultivados, além de variedades medicinais e industrializadas (El-Ramady *et al.*, 2022). Os cogumelos comestíveis são aqueles considerados adequados para o consumo humano, sem riscos à saúde. Atualmente, são registradas 2.786 espécies em todo o mundo, das quais 2.006 são seguras para o consumo (Li *et al.*, 2021). De acordo com a Resolução nº 272 da ANVISA, a definição para cogumelo comestível é:

O produto obtido de espécie(s) de fungo(s) comestível(is), tradicionalmente utilizada(s) como alimento. Pode ser dessecado, inteiro, fragmentado, moído ou em conserva, submetido a processo de secagem e ou defumação e ou cocção e ou salga e ou fermentação ou outro processo tecnológico considerado seguro para a produção de alimentos (ANVISA, 2005).

Os cogumelos comestíveis possuem características sensoriais únicas, que os tornam atraentes, especialmente pelo seu sabor marcante. Eles são reconhecidos por apresentar o quinto sabor, o umami, que pode ser explicado pela presença do glutamato monossódico, composto formado pelos aminoácidos aspartame e glutamato, além dos monofosfatos inosinato e guanilato (Sun *et al.*, 2020).

Entre as espécies mais cultivadas no Brasil, lideram *Agaricus bisporus*, *Pleurotus spp.* e *Lentinula edodes*. Atualmente, as sociedades desenvolvidas enfrentam desafios significativos relacionados à saúde, em grande parte devido aos hábitos de vida adotados por grande parte da população (Aschemann-Witzel; Maroscheck; Hamm, 2013). Esses hábitos incluem o aumento do sedentarismo e uma alimentação deficiente em nutrientes essenciais (Shields; Tremblay, 2008). Um dos principais problemas resultantes desse estilo de vida é o aumento da obesidade, que se configura como uma verdadeira crise de saúde pública. O número de pessoas com sobrepeso e obesidade tem aumentado drasticamente nas últimas décadas, comprometendo a qualidade de vida de milhões de indivíduos (Hanson; Yun, 2018).

Relatos sobre os benefícios à saúde proporcionados pelo consumo de cogumelos também parecem influenciar o comportamento dos consumidores. Uma pesquisa realizada para analisar as atitudes dos consumidores em relação ao consumo de cogumelos champignon de Paris revelou que uma parte dos entrevistados optou por consumir cogumelos em busca de um estilo de vida mais saudável, demonstrando interesse pelas propriedades nutricionais do alimento, especialmente pelas proteínas, como uma alternativa a dietas com restrição de produtos de origem animal (Trevisani, 2018).

Cunha *et al.* (2011) avaliaram a composição centesimal de diversos cogumelos disponíveis para comercialização na cidade de Manaus durante o ano de 2011, enquanto Furlani e Godoy (2007) utilizou de 5 lotes dos cogumelos champignon de Paris, shiitake e shimeji para as devidas análises. Helm, Coradin e Kestring (2009) estudou a composição centesimal e o teor de minerais de cinco espécies de cogumelos, dentre elas o shimeji e o shiitake. Também neste contexto, Bach (2017) avaliou a composição físico-química e nutricional de sete espécies de cogumelos comestíveis comercializados no Brasil.

A Tabela 1 mostra o resultado dos autores para os teores de umidade, proteínas, carboidratos, lipídios e fibras alimentares, expressos em %, dos cogumelos citados.

Tabela 1 - Composição Química dos Cogumelos

	<i>Lentinula edodes</i> (shiitake)	<i>Pleurotus spp.</i> (shimeji)	Autor
Proteínas (%)	18,98	22,22	Furlani; Godoy GODOY, (2007)
	16,42	37,51	Helm; Coradin; Kestring (2009)
	18,87	22,54	Bach (2017)
	11,4	13,79	Cunha <i>et al.</i> (2011)
Lipídeos (%)	4,39	4,30	Furlani; Godoy, (2007)
	1,14	1,32	Helm; Coradin; Kestring (2009)
	1,40	1,40	Bach (2017)
	-	-	Cunha <i>et al.</i> (2011)
Carboidratos (%)	65,58	65,82	Furlani; Godoy, (2007)
	38,08	28,57	Helm; Coradin; Kestring (2009)
	70,91	69,07	Bach (2017)
	66,85	-	Cunha <i>et al.</i> (2011)
Fibras Alimentares (%)	41,92	39,62	Furlani; Godoy, (2007)
	36,46	21,49	Helm; Coradin; Kestring (2009)
	41,89	46,62	Bach (2017)
	12,76	19,17	Cunha <i>et al.</i> (2011)

Fonte: Autoria própria (2025)

Nota-se em algumas análises grande amplitude dos valores obtidos que podem estar atrelados a fatores genéticos, ambientais, características intrínsecas, armazenamento, pós-colheita dentre outros (Helm, Coradin e Kestring, 2009). Furlani e Godoy (2007) analisaram o teor de sólidos totais que variaram entre 8,00% e 9,23%, comprovando o alto teor de umidade.

3.3 Secagem

A água é um dos componentes primordiais presentes nos alimentos, desempenhando uma série de funções cruciais. Ela facilita o transporte de nutrientes e produtos de degradação, atua como reagente e meio para reações químicas e biológicas, estabiliza a conformação de polímeros formados por biomoléculas e contribui para o comportamento dinâmico das macromoléculas, entre outras funções

(Ribeiro; Saravalli, 2004). A disponibilidade de água nos alimentos é fundamental e está relacionada não apenas à sua quantidade, mas também à maneira como está associada aos componentes do produto (Gava; Silva; Frias, 2009).

Nos alimentos, a água existe sob duas formas: água livre e água combinada, sendo a água total a soma dessas duas parcelas (Park; Nogueira, 1992). A água ligada a componentes como carboidratos e lipídios demanda maior quantidade de energia para sua evaporação, quando comparada à água livre. Quanto à água combinada, uma de suas características mais importantes é que ela não é congelável. Outras propriedades incluem baixa pressão de vapor, alta energia de ligação, mobilidade molecular reduzida e propriedades dielétricas diferentes das da água livre (Ditchfield, 2000). Devido à forte ligação ao substrato, a água combinada não está disponível para atuar como solvente em reações químicas, microbiológicas ou enzimáticas nos alimentos (Kohmann, 2013). A água livre presente nos alimentos possui propriedades semelhantes às da água pura, estando disponível para o crescimento de microrganismos e para reações químicas e enzimáticas (Ribeiro; Saravalli, 2004). Essa água está fracamente ligada ao substrato e pode ser removida por secagem, congelamento ou pela adição de eletrólitos como o NaCl, ou não-eletrólitos como a sacarose (Ditchfield, 2000).

A secagem é um processo que torna um material, seja ele sólido, semissólido ou líquido em um produto de umidade baixa. A água do material é transferida para uma fase gasosa não saturada por convecção a uma temperatura menor que a de ebulição. Essa operação é complexa, pois há simultaneamente transferência de calor, massa e de momento em regime transiente. Há um grande interesse da indústria alimentícia no processo de secagem, pois com a diminuição do teor de água livre, estende-se a vida de prateleira do produto para meses ou anos, com menor custo de armazenamento, visto que podem ser armazenados a temperatura ambiente, e implicando em redução de custo em transporte para o produto de maior valor agregado e seguro ao consumidor (Tadini *et al.*, 2016).

Entretanto, a remoção da água altera a estrutura física e a composição nutricional do produto, como por exemplo, resulta em perda de vitaminas, alterações na cor e nas propriedades de reidratação do produto. Por isso, é de suma importância a escolha do método de secagem e o controle de parâmetros como: tempo, temperatura e conteúdo de umidade (Alves; Nicoletti, 2016).

A secagem é dividida em três etapas. Na primeira, a temperatura do alimento e a pressão do vapor de água aumentam até atingir a temperatura de bulbo úmido do ar; no segundo período, chamado de taxa constante, a migração da água do interior do produto até sua camada mais externa é igual à migração da água dessa superfície para o ar de secagem, ou seja, a velocidade (taxa) de secagem é constante. Devido a resistências internas à transferência de massa do produto, essa fase constante é usualmente indetectável nas condições experimentais convencionais de secagem, pois a taxa de evaporação da água da superfície é frequentemente maior que a velocidade de difusão da água do interior para a camada externa. Por fim, quando a concentração de água na superfície diminui, a velocidade de secagem também diminui. Chamada de taxa decrescente de secagem, nessa etapa o movimento principal da água do interior até a superfície do alimento se dá por difusão, sendo usada a segunda lei de Fick, Equação 1, para quantificar o coeficiente de difusão da umidade (Garcia *et al.*, 2022; Garcia *et al.*, 2014; Franco, 2015).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot D_{ef} \cdot \nabla X \quad (1)$$

Em que: X representa a umidade, em base seca (b.s.); t , o tempo; D_{ef} , a difusividade efetiva da água, em m^2/s .

Crank (1975) solucionou a lei de Fick (Equação 1) para alguns sólidos de formas geométricas simples e constantes ao longo do processamento. Para tempos de secagem suficientemente longos, a série converge de forma uniforme, sendo o primeiro termo o principal contribuinte para o valor do coeficiente de difusão. As soluções analíticas de Crank (1975) para placas planas infinitas e para cilindros infinitos são apresentadas nas Equações 2 e 3, respectivamente.

$$\left(\frac{\bar{X}(t) - X^{eq}}{X^0 - X^{eq}} \right) = \frac{8}{\pi^2} \left[e^{\left(\frac{-\pi^2 D_{ef} \cdot t}{z^2} \right)} + \frac{1}{9} e^{\left(\frac{-9\pi^2 D_{ef} \cdot t}{z^2} \right)} + \frac{1}{25} e^{\left(\frac{-25\pi^2 D_{ef} \cdot t}{z^2} \right)} + \dots \right] \quad (2)$$

$$\left(\frac{\bar{X}(t) - X^{eq}}{X^0 - X^{eq}} \right) = 4 \left[\frac{1}{5,783} e^{\left(-5,783 \frac{D_{ef} \cdot t}{r^2} \right)} + \frac{1}{30,472} e^{\left(-30,472 \frac{D_{ef} \cdot t}{r^2} \right)} + \frac{1}{74,887} e^{\left(-74,887 \frac{D_{ef} \cdot t}{r^2} \right)} + \dots \right] \quad (3)$$

Em que: $\bar{X}(t)$ representa o teor de água médio num tempo t , em base seca (kg de água/kg de material seco); X^{eq} representa o teor de água no equilíbrio, em base seca; X^0 representa o teor de água inicial, em base seca; D_{ef} representa a difusividade efetiva da água, em m^2/s ; t representa o tempo, em s; z representa a meia espessura da amostra, em m; r representa o raio da amostra, em m.

3.4 Cinética de Secagem

Diversos estudos têm se dedicado à modelagem matemática da secagem de alimentos. Por exemplo, Morais *et al.* (2013) investigaram a cinética de secagem do feijão-caupi, ajustando diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais para descrever o processo sob várias temperaturas de secagem. Os resultados indicaram que modelos como o de Page e o de Henderson e Pabis modificados apresentaram bom ajuste aos dados experimentais, permitindo uma representação satisfatória do processo de secagem.

De acordo com Vilela e Artur (2008), as informações obtidas das curvas de secagem são essenciais para o desenvolvimento de processos e para o dimensionamento de equipamentos. A partir dessas curvas, é possível estimar o tempo de secagem de uma determinada quantidade de produto e, com o tempo necessário para a produção, calcular o consumo de energia, o que impacta no custo de processamento e, conseqüentemente, no preço final do produto. No dimensionamento de equipamentos, essas informações ajudam a determinar as condições operacionais para a secagem, além de auxiliar na escolha de trocadores de calor, ventiladores e outros componentes.

O dimensionamento, a otimização e a avaliação da viabilidade comercial de sistemas de secagem podem ser realizados por meio de simulações matemáticas, utilizando modelos matemáticos que representem adequadamente a perda de água durante o processo de secagem. Esses processos podem ser previstos através da modelagem matemática (Araújo *et al.*, 2017). Na Tabela 2 estão os modelos empíricos/semiempíricos comumente utilizados para modelagem do processo de secagem.

Tabela 2 - Modelos empíricos/semiempíricos utilizados para descrever o processo de secagem

	Modelo	
$RU = 1 + at + bt^2$	Wang e Singh	(4)
$RU = a \cdot e^{(-k \cdot t)} + (1 - a) \cdot e^{(-k_1 \cdot t)}$	Verma	(5)
$RU = e^{\left[\frac{-a - (a^2 + 4 \cdot b \cdot t)^{0,5}}{2 \cdot b}\right]}$	Thompson	(6)
$RU = e^{(-k \cdot t^n)}$	Page	(7)
$RU = e^{(-k \cdot t)}$	Newton	(8)
$RU = a \cdot e^{(-k \cdot t^n)} + b \cdot t$	Midilli	(9)
$RU = a \cdot e^{(-k \cdot t)} + c$	Logarítmico	(10)
$RU = a \cdot e^{(-k \cdot t)}$	Henderson e Pabis	(11)
$RU = a \cdot e^{(-k \cdot t)} + b \cdot e^{(-k_0 \cdot t)} + c \cdot e^{(-k_1 \cdot t)}$	Henderson e Pabis modificado	(12)
$RU = a \cdot e^{(-k \cdot t)} + (1 - a) \cdot e^{(-k \cdot a \cdot t)}$	Exponencial de Dois Termos	(13)
$RU = a \cdot e^{(-k_0 \cdot t)} + b \cdot e^{(-k_1 \cdot t)}$	Dois Termos	(14)
$RU = a \cdot e^{(-k \cdot t)} + (1 - a) \cdot e^{(-k \cdot b \cdot t)}$	Aproximação da Difusão	(15)

RU é a razão de umidade, adimensional; k , k_0 , k_1 são constantes de secagem, em s^{-1} ; a , b , c , n são coeficientes dos modelos, adimensionais; t é o tempo de secagem, em s.

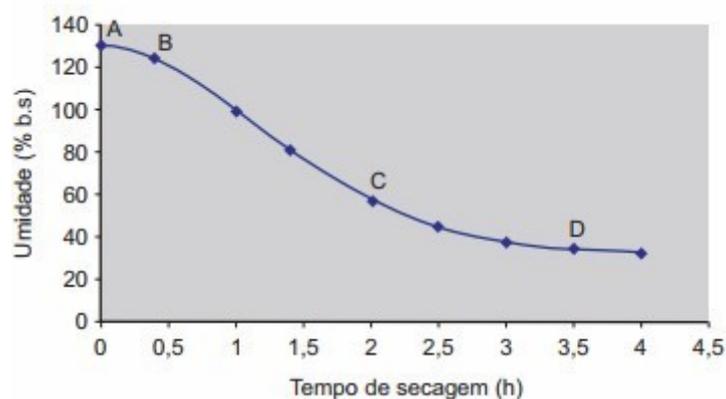
Fonte: Sousa et al. (2011)

A razão de umidade (RU) é dada pela Equação 16.

$$RU = \frac{\bar{X}(t) - X^{eq}}{X^0 - X^{eq}} \quad (16)$$

Em que: RU representa a razão de umidade do produto, adimensional; $\bar{X}(t)$ é teor de água do produto em um tempo t qualquer, em base seca; X^{eq} representa o teor de água de equilíbrio do produto com o ar de secagem, em base seca; X^0 , o teor de água inicial do produto, em base seca.

A cinética de secagem é o estudo empírico da velocidade em que o alimento perde água. Os parâmetros de controle são a temperatura, umidade relativa do ar e a velocidade com que o fluido escoar. A melhor maneira de avaliar os dados obtidos, é através das curvas de secagem, como ilustrada na Figura 1, em que os eixos x e y representam, respectivamente, o tempo de secagem em horas e o teor de umidade (Celestino, 2010).

Figura 1 - Umidade do alimento durante a secagem

Fonte: Celestino (2010).

Na literatura há diversos trabalhos em que os autores estudam a cinética de secagem dos mais diversos tipos de alimentos. Martinazzo *et al.* (2010), observou que modelagem modelo de Page modificado foi o que melhor se ajustou aos dados empíricos obtidos na secagem de folhas capim-limão. Sousa *et al.* (2014), mostrou que a secagem do morango *Fragaria* sp. foi representada pelos modelos de Midilli e Bala. Sousa *et al.* (2023) estudaram o processo de secagem da casca do umbu (*Spondias tuberosa*) e concluíram que, embora o modelo matemático de Lewis tenha mostrado um bom ajuste aos dados experimentais, o modelo de Page apresentou o melhor desempenho na descrição da cinética de secagem da casca do umbu. Moscon *et al.* (2017) estudaram a cinética de secagem de grãos de quinoa ajustando a diferentes modelos matemáticos, sendo que os modelos que apresentaram os melhores coeficientes estatísticos para descrever a secagem dos grãos foram os de Page, Midilli e o Logarítmico. Os autores recomendaram o uso do modelo descrito por Page, por ser de fácil aplicação e eficiente.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Matéria-prima e Padronização dos Cogumelos *In Natura*

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Vegetais na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Medianeira.

Para a realização deste trabalho foram utilizados cogumelos das espécies *Lentinula edodes* e *Pleurotus spp.*, popularmente conhecidos como shiitake e shimeji, respectivamente, adquiridos em comércio local na cidade de Medianeira e Foz do Iguaçu, Paraná.

Os cogumelos foram cortados, separando-se os talos dos chapéus, e padronizados visualmente com base no comprimento, diâmetro e espessura, sendo esta última medida realizada com auxílio de um paquímetro, conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Padronização das matérias primas



A: Chapéus do cogumelo shimeji (médios e grandes); B: Talos médios e grandes de shimeji;
C: Chapéus do cogumelo shiitake; D: Talos do cogumelo shiitake.

Fonte: Aatoria Própria (2025)

Para o shiitake, a espessura média encontrada foi de 14,73 mm, enquanto o shimeji, devido à sua variação natural característica, foi subdividido em dois grupos: médios, com espessura média de 10,18 mm, e grandes, com espessura média 12,81 mm.

4.2 Cinética e Modelagem da Secagem

Para a realização da cinética de secagem, os cogumelos previamente cortados e padronizados foram dispostos em telas metálicas, de modo que o ar pudesse circular uniformemente entre os produtos, conforme ilustrado na Figura 2 B-D. Os experimentos foram conduzidos em estufa com recirculação de ar e controle de temperatura (Ref 303, Biomatic, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil).

Durante o processo de secagem, as amostras foram pesadas a cada 20 minutos nas primeiras 4 horas, a cada 30 minutos nas 2 horas subsequentes e, após as 6 horas iniciais, a cada hora, até que a variação de massa entre as pesagens fosse inferior a 0,01 g. Ao atingir peso constante, as amostras foram pesadas novamente 24 horas após o início da secagem, para garantir que a umidade de equilíbrio entre as amostras e o ar de secagem fosse atingida.

A modelagem da Lei de Fick foi realizada considerando os cogumelos como placa plana (talos e chapéus), conforme Equação 2, e como cilindro infinito (talos), conforme Equação 3. Os modelos empíricos apresentados anteriormente na Tabela 2, foram utilizados para descrever o comportamento dos cogumelos durante a secagem.

A desidratação foi realizada em triplicata para os talos do cogumelo shiitake e em quadruplicata para as demais amostras.

O teor percentual de umidade das amostras frescas e secas foi determinado pelo método gravimétrico do Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2008), utilizando estufa a 105 °C por 24 horas.

4.3 Avaliações Estatísticas

O ajuste dos dados experimentais aos modelos matemáticos foi realizado utilizando o algoritmo de Levenberg-Marquardt para estimar os parâmetros não lineares dos modelos, por meio do método dos quadrados mínimos (Marquardt, 1963).

Para avaliar a qualidade dos ajustes dos dados experimentais aos modelos estudados, foram analisados os seguintes parâmetros estatísticos: coeficiente de determinação (R^2), erro médio estimado (SE), raiz do erro quadrático médio ($RMSE$) e erro médio relativo (P), conforme as Equações 17, 18 e 19, respectivamente.

$$SE = \sqrt{\sum \frac{(x_{exp} - x_{cal})^2}{GLR}} \quad (17)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{cal} - x_{exp})^2}{n}} \quad (18)$$

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|x_{exp} - x_{calc}|}{x_{exp}} \quad (19)$$

Em que: x_{exp} , representa o valor experimental; x_{calc} , o valor previsto pelo modelo; n é o número de observações experimentais; GLR representa os graus de liberdade do modelo (observações menos o número de parâmetros do modelo).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 estão descritas as umidades encontradas para os cogumelos shimeji e shiitake *in natura*, após o processo de secagem a 60 °C por 24 horas bem como os valores de umidade crítica, obtidos após as amostras atingirem o equilíbrio dinâmico com o ar de secagem.

Tabela 3 - Umidade dos cogumelos (%)

Espécie	<i>In natura</i>	Chapéus secos	Talos secos	Equilíbrio Talos	Equilíbrio Chapéus
Shimeji	89,41 ± 0,29	6,04 ± 0,68	3,73 ± 0,40	3,73 ± 0,01 x 10 ⁻⁵⁰	6,04 ± 6,98 x 10 ⁻¹⁶
Shiitake	89,94 ± 1,14	4,44 ± 0,39	5,12 ± 0,22	5,12 ± 4,90 x 10 ⁻¹⁶	4,44 ± 0,01 x 10 ⁻⁵⁰

Resultados apresentados como média ± desvio padrão.

Fonte: Aatoria própria (2025)

Esses resultados obtidos reforçam que ambos os cogumelos apresentam elevado teor de umidade, uma característica comum em cogumelos frescos, o que evidencia sua alta perecibilidade.

Quando comparados aos dados da literatura, observa-se pouca variação nos valores de umidade. Bach (2017) encontrou 90,65% para o shimeji e 88,46% para o shiitake, enquanto Cunha *et al.* (2011) reportaram teores de umidade variando entre 89,87% e 91,21% para o shimeji e de 91,17% a 91,49% para o shiitake. No presente estudo, o teor de umidade encontrado para o shimeji (89,41%) foi ligeiramente inferior ao reportado por Bach (2017) e próximo ao limite inferior descrito por Cunha *et al.* (2011). Já para o shiitake, o valor obtido (89,94%) se situa entre os valores reportados por Bach (2017) e a faixa descrita por Cunha *et al.* (2011). Adicionalmente, Kurozawa (2005), ao estudar o teor de umidade em cogumelos *in natura*, encontrou um valor de 88,75 ± 0,12% para *Agaricus blazei*, reforçando a coerência dos resultados obtidos no presente estudo, mesmo considerando a diferença entre as espécies analisadas. Além disso, Freire (2019), reportou um teor de 89,44 ± 0,12% para o shimeji, um valor bastante próximo ao encontrado neste estudo.

As diferenças entre os valores obtidos no presente estudo e aqueles descritos na literatura podem ser justificadas por variações nas condições de cultivo, estágio de maturação no momento da colheita, temperatura, umidade relativa e condições de

armazenamento. Esses fatores influenciam diretamente a retenção de água nos cogumelos e sua taxa de evaporação durante o processo de secagem.

A umidade de equilíbrio foi determinada por balanço de massa utilizando os dados experimentais obtidos após 24 horas de secagem, momento em que as amostras alcançaram equilíbrio dinâmico com o ar de secagem. Os resultados obtidos para os talos e chapéus do shimeji, independentemente do diâmetro ou espessura, foram semelhantes, apresentando baixos valores de desvio padrão. Isso indica boa reprodutibilidade do experimento, além de homogeneidade na distribuição das amostras sobre as bandejas utilizadas durante o processo de secagem.

Os cogumelos frescos possuem elevado teor de umidade e uma estrutura celular que favorece a retenção de água, além de uma composição química que os torna altamente perecíveis, favorecendo sua rápida deterioração e alterações indesejadas. Por isso, seu armazenamento em baixas temperaturas e o consumo em curto prazo são recomendados. No entanto, a secagem se apresenta como uma alternativa eficiente para prolongar a vida útil dos cogumelos, fato evidenciado neste estudo. Após 24 horas de secagem a 60 °C, a umidade final dos cogumelos foi reduzida para 6,04% (shimeji) e 4,44% (shiitake), conforme apresentado na Tabela 3, comprovando a eficácia do processo de desidratação como método de conservação.

A Tabela 4 apresenta os coeficientes de difusão efetivos da água durante o processo de secagem a 60 °C, juntamente com os parâmetros estatísticos utilizados para avaliar o ajuste dos dados experimentais à lei de Fick, considerando as amostras como placas planas.

Tabela 4 - Valores da difusividade efetiva da água durante a secagem a 60 °C dos cogumelos, coeficiente de determinação, erro médio relativo e erro quadrático médio relativo

Amostra	$D_{ef}(10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	R^2	P (%)	$RMSE$
Chapéus médios de shimeji	1,837	0,76	539,17	0,18
Chapéus grandes de shimeji	2,585	0,75	294,70	0,18
Talos médios de shimeji	0,061	0,67	5613,65	0,15
Talos grandes de shimeji	0,208	0,76	4946,53	0,18
Chapéus do shiitake	0,391	0,64	107,25	0,18
Talos do shiitake	0,121	0,78	336,78	0,15

Fonte: Autoria própria (2025)

Conforme apresentado na Tabela 4, o modelo de Fick não demonstrou um ajuste satisfatório aos dados experimentais. Embora os valores da raiz do erro quadrático médio (*RMSE*) tenham sido relativamente baixos, os elevados valores do erro médio relativo e o R^2 inferior a 0,90 indicam limitações na adequação dos dados ao modelo. Além disso, a modelagem dos talos considerando-os como cilindros infinitos, também não apresentou resultados satisfatórios.

Kurozawa (2005), ao analisar a cinética de secagem do cogumelo *Agaricus blazei*, também constatou que os dados experimentais não se ajustaram bem ao modelo de Fick. O autor observou que a partir de determinado tempo de processo, houve discrepâncias entre o modelo e os dados observados, o que pode ser explicado pelas simplificações assumidas na resolução da segunda Lei de Fick. A transferência de umidade na secagem de alimentos nem sempre segue as premissas do modelo, que assume homogeneidade do material, encolhimento desprezível e resistência uniforme ao fluxo de água no interior do produto (KUROZAWA, 2005).

Por outro lado, estudos como o de Polegato (2023) demonstraram que a Lei de Fick pode apresentar bom ajuste em alguns alimentos, como fatias de maçã de 1,00 cm de espessura, para as quais os dados experimentais apresentaram um ajuste satisfatório ao modelo. Os valores de coeficiente de difusão efetivos encontrados pelo autor foram similares aos obtidos no presente estudo.

De maneira semelhante, Faria Baroni (2004), ao estudar a secagem de tomates *in natura* e desidratados osmoticamente, verificou que a Lei de Fick apresentou bom ajuste para os tomates submetidos diretamente ao processo de secagem. No entanto, as amostras desidratadas osmoticamente apresentaram um ajuste inferior, possivelmente devido ao maior encolhimento durante a secagem, o que afeta diretamente a difusividade da água no material.

No presente estudo, o encolhimento das amostras, foi analisado com base nos diâmetros e espessuras antes e após o processo de secagem. Para os chapéus do shimeji, observou-se que os cogumelos classificados como médios apresentaram uma redução de 36,42% no diâmetro e 16,19% na espessura, enquanto os grandes sofreram uma diminuição de aproximadamente 25% em ambos os parâmetros. Nos talos da mesma espécie, verificou-se uma redução de 46,04% no diâmetro para os médios e 23,45% para os grandes.

Em relação ao shiitake, os chapéus apresentaram uma redução de 31,23% no diâmetro e cerca de 60,27% na espessura, enquanto os talos tiveram uma

diminuição de 32,77% no diâmetro. Essas alterações geométricas significativas impactam diretamente o coeficiente de difusão e a resistência interna à transferência de massa, que são pressupostos fundamentais da Lei de Fick. Dessa forma, mudança estrutural dos cogumelos durante a secagem pode justificar a falta de ajuste dos dados experimentais ao modelo de Fick.

As Figuras 3 a 6 apresentam visualmente as alterações estruturais resultantes do processo de secagem, evidenciando a relação entre encolhimento, estrutura do material e adequação do modelo matemático.

Figura 3 - Chapéus do cogumelo shiitake *in natura* e após secagem a 60°C por 24 h



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 4 - Talos do cogumelo shiitake *in natura* e após secagem a 60 °C por 24 h



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 5 - Talos do cogumelo shimeji *in natura* e após secagem a 60 °C por 24 h



Fonte: Aatoria própria (2025)

Figura 6 - Chapéus do cogumelo shimeji *in natura* e após secagem a 60 °C por 24 h



Fonte: Aatoria própria (2025)

Os parâmetros estatísticos e dos modelos, obtidos a partir do ajuste dos dados experimentais aos modelos empíricos descritos na Tabela 2 são apresentados nas Tabelas 5 a 10.

O ajuste da Lei de Fick, considerando os talos como cilindros infinitos, apresentou um ajuste razoável para os talos do shiitake e os talos grandes do shimeji, com $R^2 > 0,70$ e P em torno de 400%. No entanto, para os talos médios do shimeji, o ajuste foi insatisfatório, com $R^2 = 0,62$ e P de aproximadamente 6000%, apesar dos baixos valores de $RMSE$ e SE .

Dentre os modelos empíricos testados, o modelo de Page foi que melhor representou os dados experimentais para as amostras de chapéus grandes e médios

e talos grandes do shimeji. Já para os talos médios dessa espécie, os dados se ajustaram bem ao modelo de Wang e Singh.

Tabela 5 - Parâmetros estatísticos e parâmetros dos modelos que melhor representaram os dados experimentais da secagem dos chapéus grandes do cogumelo shimeji

Modelo	R²	P (%)	RMSE	SE	a	b	n	k
Page	0,99	20,60	0,015	0,016	-	-	0,000001	2,545392
Newton	0,85	227,41	0,14	0,14	-	-	-	0,004787
Henderson e Pabis	0,90	170,32	0,11	0,13	1,215316	-	-	0,005870
Exponencial de Dois Termos	0,97	71,36	0,05	0,06	0,009175	-	-	2,341953
Wang e Singh	0,92	137,41	0,10	0,11	-0,003607	0,000003	-	-

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 6 - Parâmetros estatísticos e parâmetros dos modelos que melhor representaram os dados experimentais da secagem dos chapéus médios do cogumelo shimeji

Modelo	R²	P (%)	RMSE	SE	a	b	n	k
Page	0,99	17,31	0,01	0,01	-	-	0,000002	2,564593
Newton	0,86	428,89	0,14	0,14	-	-	-	0,005288
Henderson & Pabis	0,90	331,18	0,11	0,12	1,215576	-	-	0,006421
Exponencial de Dois Termos	0,97	156,04	0,06	0,06	0,009918	-	-	2,341419
Wang e Singh	0,92	223,44	0,10	0,11	-0,004013	0,000004	-	-

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 7 - Parâmetros estatísticos e parâmetros dos modelos que melhor representaram os dados experimentais da secagem dos talos grandes do cogumelo shimeji

Modelo	R²	P (%)	RMSE	SE	a	b	n	k
Page	0,99	51,68	0,02	0,02	-	-	0,000003	2,423916
Newton	0,86	3746,39	0,13	0,14	-	-	-	0,004841
Henderson e Pabis	0,90	2843,48	0,11	0,12	1,91656	-	-	0,005810
Exponencial de Dois Termos	0,96	4946,53	0,18	0,18	0,008916	-	-	2,273074
Wang e Singh	0,93	3698,94	0,09	0,09	-0,003474	0,000002	-	-
Fick Cilindro	0,71	6005,83	0,19	0,19	-	-	-	-

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 8 - Parâmetros estatísticos e parâmetros dos modelos que melhor representaram os dados experimentais da secagem dos talos médios do cogumelo shimeji

Modelo	R^2	P (%)	$RMSE$	SE	a	b	n	k
Newton	0,81	4774,10	0,11	0,11	-	-	-	0,002795
Henderson & Pabis	0,86	4294,82	0,09	0,10	1,130833	-	-	0,003429
Exponencial de Dois Termos	0,91	3372,25	0,07	0,08	0,005713	-	-	2,132105
Wang e Singh	0,96	142,02	0,06	0,07	-0,001156	-0,000003	-	-
Fick Cilindro	0,62	5965,30	0,16	0,16	-	-	-	-

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 9 - Parâmetros estatísticos e parâmetros dos modelos que melhor representaram os dados experimentais da secagem dos chapéus do cogumelo shiitake

Modelo	R^2	P (%)	$RMSE$	SE	a	b	n	k
Page	0,98	12,77	0,03	0,03	-	-	$3,51 \times 10^{-7}$	2,414807
Newton	0,80	83,49	0,13	0,14	-	-	-	0,001665
Henderson & Pabis	0,86	68,91	0,11	0,12	1,156630	-	-	0,002111
Exponencial de Dois Termos	0,94	42,55	0,07	0,07	2,209245	-	-	0,003543
Wang e Singh	0,99	22,71	0,03	0,04	-0,000574	-0,000001	-	-

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 10 - Parâmetros estatísticos e parâmetros dos modelos que melhor representaram os dados experimentais da secagem dos talos do cogumelo shiitake

Modelo	R^2	P (%)	$RMSE$	SE	a	b	n	k
Newton	0,88	258,56	0,11	0,11	-	-	-	0,003194
Henderson & Pabis	0,91	217,77	0,09	0,10	1,123172	-	-	0,003697
Exponencial de Dois Termos	0,96	126,74	0,06	0,06	2,091890	-	-	0,005687
Wang e Singh	0,98	142,02	0,06	0,06	-0,002191	0,000001	-	-
Fick Cilindro	0,72	391,89	0,17	0,17	-	-	-	-

Fonte: Autoria própria (2025)

Para os chapéus do shiitake, tanto o modelo de Page quanto de Wang e Singh representaram adequadamente os dados experimentais, com $R^2 > 0,98$ e de P inferior a 25%, e valores de $RMSE$ e SE próximos de zero. No caso dos talos do shiitake, o modelo que melhor se ajustou foi o de Wang e Singh.

De modo geral, todos os modelos, exceto o de Fick considerando as amostras como cilindros infinitos, apresentaram bons ajustes aos dados experimentais de secagem, com o menor R^2 igual a 0,81.

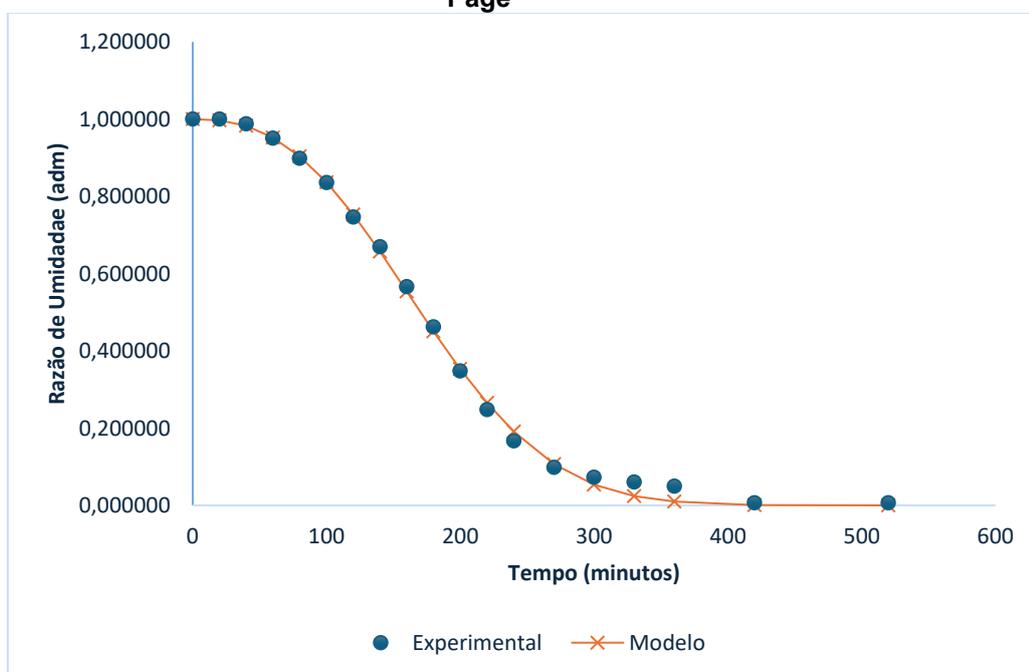
Além disso, foram observados valores elevados do parâmetro P nas modelagens realizadas. De acordo com Lomauro *et al.* (1985), um valor P inferior a 10% indica um bom ajuste. No entanto, valores superiores a 10% são comuns em estudos de secagem, pois a Equação 19 é baseada em resíduos relativos, cujas variações aumentam no final do processo, quando a umidade residual é muito baixa.

Os resultados obtidos neste estudo corroboram os achados de Freire (2019), que analisou a cinética de secagem dos cogumelos *eryngii* e *shimeji*, ajustando os dados experimentais a diversos modelos, incluindo Henderson e Pabis, Newton e Page, e constatando que todos os modelos apresentaram ajustes satisfatórios, como observado no presente trabalho.

De forma semelhante, Kurozawa (2005) comparou os ajustes dos modelos Exponencial, Fick e Page, e concluiu que o modelo de Page foi o mais adequado para a predição da cinética de secagem do *Agaricus blazei*.

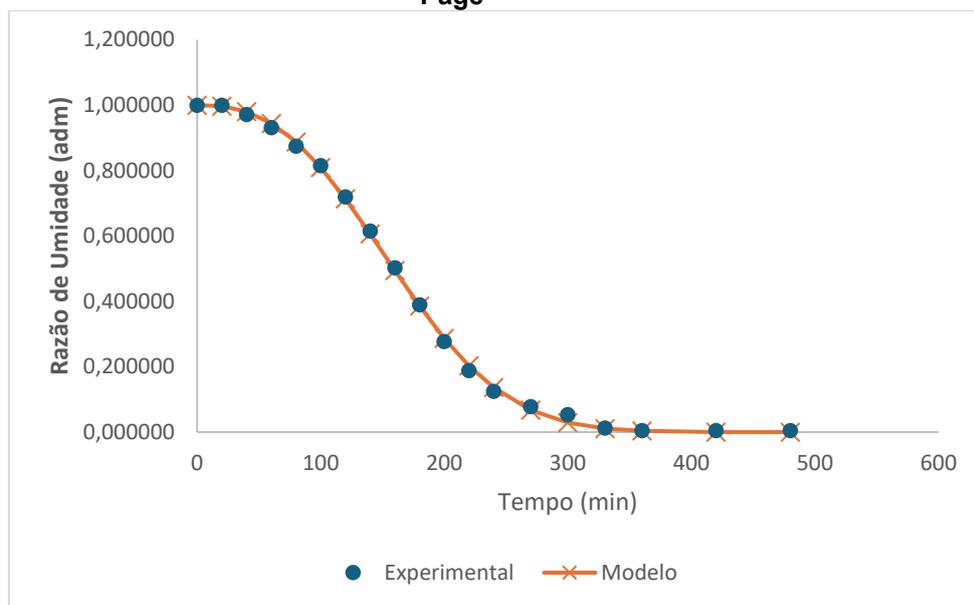
As curvas de secagem obtidas a partir dos modelos que apresentaram melhor ajuste aos dados experimentais da secagem dos cogumelos *shimeji* e *shiitake* a 60 °C estão apresentadas nas Figuras 7 a 12.

Figura 7 - Curva de secagem dos chapéus grandes do shimeji a 60 °C, utilizando o modelo de Page



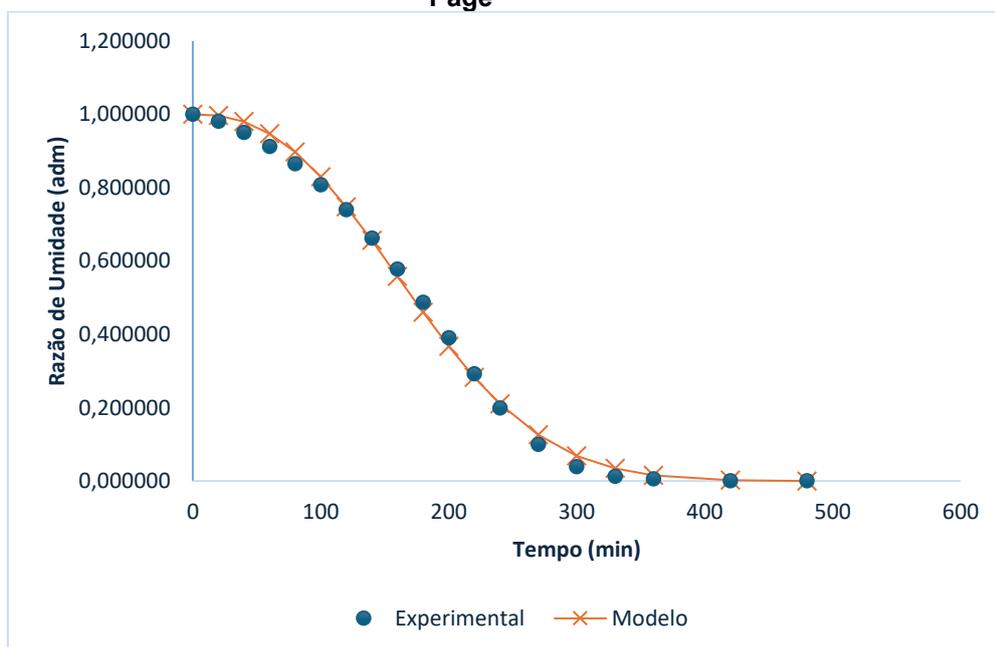
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 8 - Curva de secagem dos chapéus médios do shimeji a 60 °C, utilizando o modelo de Page



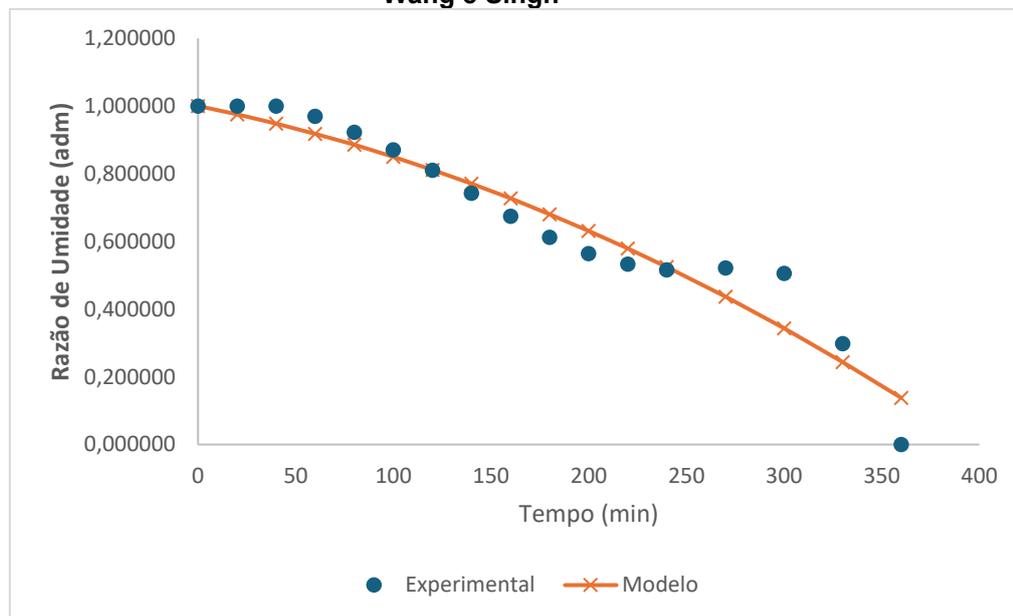
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 9 - Curva de secagem dos talos grandes do shimeji a 60 °C, utilizando o modelo de Page



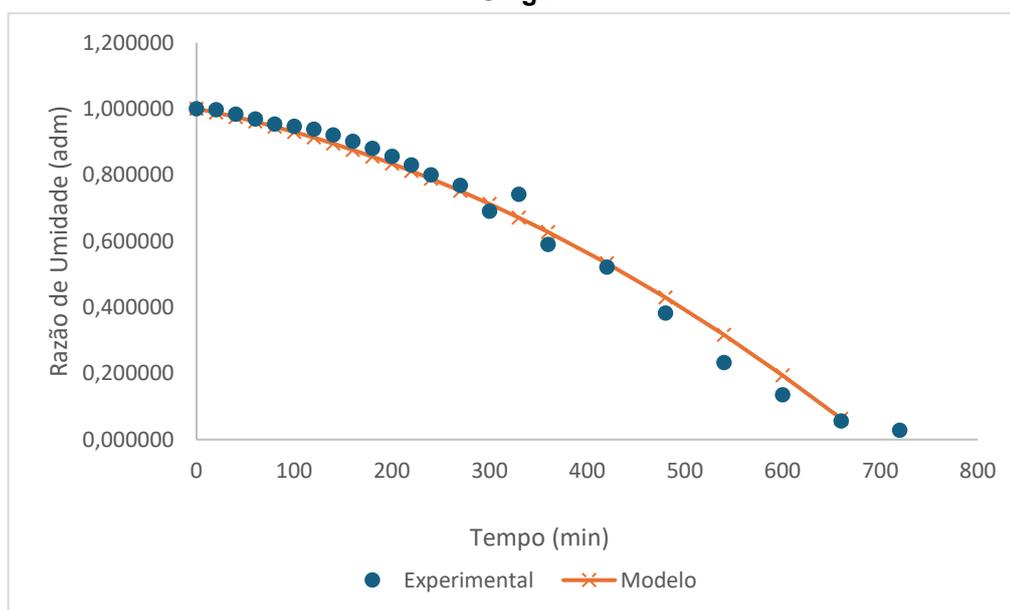
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 10 - Curva de secagem dos talos médios do shimeji a 60 °C, utilizando o modelo de Wang e Singh



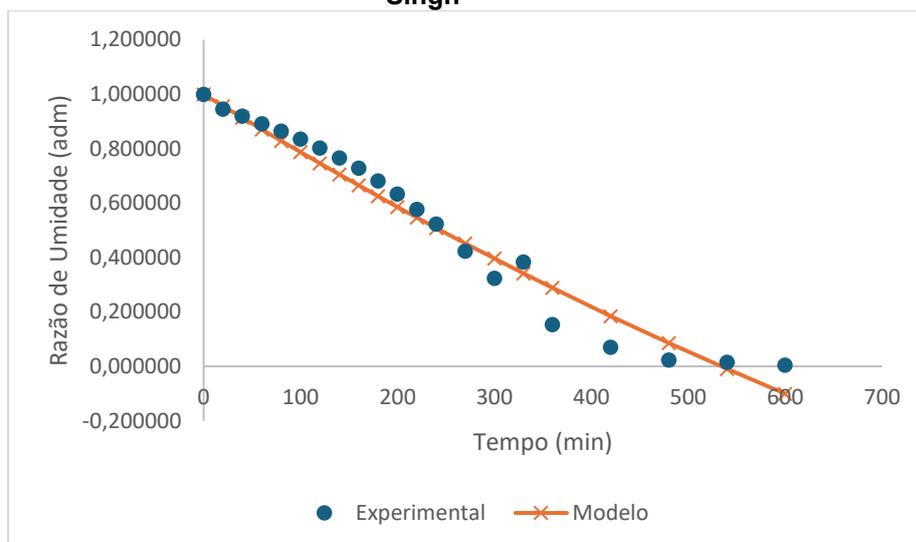
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 11 - Curva de secagem dos chapéus do shiitake a 60 °C, utilizando o modelo de Wang e Singh



Autoria própria (2025)

Figura 12 - Curva de secagem dos talos do shiitake a 60 °C, utilizando o modelo de Wang e Singh



Fonte: Autoria própria (2025)

Ao analisar as Figuras 7 a 12, observa-se que os modelos de Page e Wang e Singh representaram de forma adequada os dados de secagem das amostras.

6 CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo corroboram com a literatura ao evidenciar que os cogumelos shimeji e shiitake *in natura* apresentam altos teores de umidade, característica que contribui para sua elevada perecibilidade.

Na análise da cinética de secagem, constatou-se que o modelo de Fick apresentou limitações no ajuste aos dados experimentais, especialmente devido às alterações geométricas e estruturais decorrentes do processo de secagem. Em contrapartida, os modelos empíricos, como os de Page e Wang e Singh, demonstraram melhor ajuste estatístico, com elevados valores de R^2 e baixos erros médios relativos, especialmente para os chapéus dos cogumelos.

Os talos dos cogumelos exibiram comportamentos distintos de secagem em relação aos chapéus. Para os talos grandes do shimeji, o modelo de Page apresentou melhor representatividade, enquanto, para os talos médios, o modelo de Wang e Singh foi o mais adequado. De forma similar, os chapéus e talos do shiitake ajustaram-se bem aos modelos de Page e Wang e Singh, com excelente representatividade estatística.

Este estudo reforça a importância da escolha adequada de modelos matemáticos para descrever a cinética de secagem de alimentos, considerando as características físicas e estruturais do material. As informações obtidas contribuem para otimizar os processos de secagem, reduzir perdas e melhorar a qualidade dos produtos desidratados.

Futuras pesquisas podem explorar a influência de variáveis adicionais, como diferentes velocidades e temperaturas de secagem, ampliando a aplicabilidade dos modelos e aprofundando a compreensão da dinâmica de transferência de massa em cogumelos. Esses avanços poderão abrir oportunidades para novos produtos e aplicações tecnológicas na conservação e processamento de cogumelo.

REFERÊNCIAS

ALEXOPOULOS, Constantine J.; MIMS, Charles W.; BLACKWELL, Meredith. **Introductory mycology**. 4. ed. New York, NY]: Wiley, 1996.

ALVES, Tales Prado; NICOLETI, Joel Fernando. Influência das variáveis de processo sobre a secagem osmo-convectiva de pimentão verde. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, v. 10, n. 1, p. 2022–2037, 2016. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbta/article/view/2014>>.

ANTUNES, Pamela Dos S; ERPEN-DALLA CORTE, Lígia; BUENO, Janaina Cm; *et al.* Firmness and biochemical composition of Shitake and Shimeji commercialized in natura and consumers' opinion survey. **Horticultura Brasileira**, v. 39, n. 4, p. 425–431, 2021. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-05362021000400425&tlng=en>.

ANVISA. AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Resolução da diretoria colegiada- RDC Nº 272, de 22 de setembro de 2025.

ARAUJO, Willian Dias; GONELI, André Luís Duarte; CORRÊA, Paulo Cesar; *et al.* Mathematical modelling of thin-layer drying in peanut fruit. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 3, p. 448–457, 2017. Disponível em: <<http://www.gnresearch.org/doi/10.5935/1806-6690.20170052>>.

ASCHEMANN-WITZEL, Jessica; MAROSCHECK, Nicole; HAMM, Ulrich. Are organic consumers preferring or avoiding foods with nutrition and health claims? **Food Quality and Preference**, v. 30, n. 1, p. 68–76, 2013. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950329313000591>.

AZEVEDO, E., BARATA, M., (2018) Diversidade no reino Fungi e aplicações à Indústria, **Ciência Elementar**, V6, n.1, p. 1-7. doi.org/10.24927/rce2018.077

BACH, F. **Avaliação do potencial nutricional, antioxidante e antibacteriano de cogumelos comestíveis**. 2017. 136f. Tese (de Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Departamento de Engenharia Química, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/51245>.

CELESTINO, Sonia Maria Costa. Princípios de Secagem de Alimentos. **EMBRAPA Serrados**, 2010, 1. ed. 51 p.

CRANK, John. **The mathematics of diffusion**. 2. ed., reprint. Oxford: Clarendon Press, 1976.

CUNHA, André Luiz Borborema da; SALES-CAMPOS, Ceci; VAREJÃO, Maria de Jesus Coutinho; *et al.* Valor Nutricional de Cogumelos Comestíveis Comercializados em Manaus-am. **XX Jornada de Iniciação Científica PIBIC INPA - CNPq/FAPEAM**, 2011. Disponível em: <<https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/4173>>.

DITCHFIELD, Cynthia. **Estudo dos métodos para a medida da atividade de água**. Mestre em Engenharia Química, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-06112001-090117/>>.

EL-RAMADY, Hassan; ABDALLA, Neama; BADGAR, Khandsuren; *et al.* Edible Mushrooms for Sustainable and Healthy Human Food: Nutritional and Medicinal Attributes. **Sustainability**, v. 14, n. 9, p. 4941, 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/14/9/4941>>

FARIA BARONI, Alessandra. **Propriedades mecânicas, termodinâmicas e de estado de tomate submetido a desidratação osmótica e secagem**. Doutor em Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2004. Disponível em: <<https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=462142>>.

FRANCO, Talita Szlapak. **Desidratação de suco de yacon pelo método de camada de espuma**. Doutor em Engenharia de Alimentos, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2015. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/38215>>.

FREIRE, Janaina Oliveira. **Cinética de secagem de cogumelos comestíveis e efeito da temperatura sobre os compostos antioxidantes**. Mestre em Engenharia e Ciência de Alimentos, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga-BA, 2019. Disponível em: <<http://www2.uesb.br/ppg/ppgecal/wp-content/uploads/2019/07/JANAINA-OLIVEIRA-FREIRE.pdf>>.

FURLANI, Regina Prado Zanes; GODOY, Helena Teixeira. Valor nutricional de cogumelos comestíveis. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 27, n. 1, p. 154–157, 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-20612007000100027&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt>.

GARCIA, Carolina Castilho; CAETANO, Lidimara Cássia; CANIZARES, Diego; *et al.* Blanching effects on convective air-drying and sorption properties of papaya. **Drying Technology**, v. 40, n. 16, p. 3509–3519, 2022. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07373937.2022.2062378>>.

GARCIA, Carolina Castilho; CAETANO, Lidimara Cássia; DE SOUZA SILVA, Keila; *et al.* Influence of Edible Coating on the Drying and Quality of Papaya (*Carica papaya*). **Food and Bioprocess Technology**, v. 7, n. 10, p. 2828–2839, 2014. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11947-014-1350-6>>.

GAVA, Altanir J. **Princípios De Tecnologia De Alimentos**. [s.l.]: Nobel, 1996.

GOMES, Sávio; CHAVES, Viviany; DE CARVALHO, Aline; *et al.* **Brazilian food biodiversity: a richness invisible on our plates**. 2023. Disponível em: <<https://www.researchsquare.com/article/rs-2467846/v1>>.

HANSON, Nicole; YUN, Wonjoo. Should “big food” companies introduce healthier options? The effect of new product announcements on shareholder value. **Marketing Letters**, v. 29, n. 1, p. 1–12, 2018. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11002-018-9449-6>>.

HELM, C. V. CORADIN, J.H., KESTRING, D.R. **Avaliação da Composição Química dos Cogumelos Comestíveis *Agaricus bisporus*, *Agaricus brasiliensis*, *Agaricus bisporus portobello*, *Lentinula edodes* e *Pleorotus ostreatus***. Colombo-PR, 2009.

HIBBETT, David S.; BINDER, Manfred; BISCHOFF, Joseph F.; *et al.* A higher-level phylogenetic classification of the Fungi. **Mycological Research**, v. 111, n. 5, p. 509–547, 2007. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0953756207000615>>.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz. **Métodos físico-químicos para análises de alimentos**. 4ª ed. (1ª Edição digital), 2008. 1020 p.

KIRK, Paul M.; BISBY, Guy Richard; AINSWORTH, Geoffrey C.; *et al* (Orgs.). **Ainsworth & Bisby’s dictionary of the fungi**. 10. ed. Wallingford: CABI, 2008.

KOHMANN, L. M. Atividade de água em alimentos . **Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas**, Fevereiro 2013. Disponível em: <https://sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/SBRT/pdfs/24843_59178.pdf> .

KUROZAWA, Louise Emy. **Efeito das condições de processo na cinética de secagem de cogumelo (*Agaricus blazei*)**. Mestre em Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2005. Disponível em: <<https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=462651>>.

LI, Huili; TIAN, Yang; MENOLLI, Nelson; *et al.* Reviewing the world’s edible mushroom species: A new evidence-based classification system. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 20, n. 2, p. 1982–2014, 2021. Disponível em: <<https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12708>>.

LOMAURO, C. J.; BAKSHI, A.S.; LABUZA, T.P. Evaluation of Food Moisture Sorption Isotherms Equations. Part I: Fruit, Vegetables and Meat Products. **LWT**, v. 18, p. 111–117, 1985.

MARQUARDT, Donald W. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. **Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics**, v. 11, n. 2, p. 431–441, 1963. Disponível em: <<http://epubs.siam.org/doi/10.1137/0111030>>.

MARTINAZZO, A.P.; MELO, E.C.; CORRÊA, P.C.; *et al.* Modelagem matemática e parâmetros qualitativos da secagem de folhas de capim-limão [*Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf]. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v. 12, n. 4, p. 488–498, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-05722010000400013&lng=pt&tlng=pt>.

MORAIS, Simone Janaína Da Silva; DEVILLA, Ivano Alessandro; FERREIRA, Daiane Assis; *et al.* Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de

difusão de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 3, p. 455–463, 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-66902013000300006&lng=pt&nrm=iso&tlng=en>.

MOSCON, Eder Stolben; MARTIN, Samuel; SPEHAR, Carlos Roberto; *et al.* Cinética de secagem de grãos de quinoa (*Chenopodium quinoa* W.). **REVISTA ENGENHARIA NA AGRICULTURA - REVENG**, v. 25, n. 4, p. 318–325, 2017. Disponível em: <<https://periodicos.ufv.br/ojs/index.php/reveng/article/view/695>>.

MUELLER, Gregory Michael; BILLS, Gerald F.; FOSTER, Mercedes S. **Biodiversity of fungi: inventory and monitoring methods**. Amsterdam Boston: Elsevier Academic Press, 2004.

PARK, K.J., NOGUEIRA, R.I. Modelos de ajuste de isotermas de sorção de alimentos. **Engenharia Rural**, Piracicaba: ESALQ/USP, v. 3, n. 1, p.81-86, 1992.

POLEGATO, Guilherme de Sousa. **Secagem e reidratação de fatias de maçã**. Bacharel em Engenharia de Alimentos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, PR, 2023. Disponível em: <<http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/handle/1/32514>>.

RIBEIRO, Eliana Paula; SERAVALLI, Elisena Aparecida Guastafarro. **Química de alimentos**. 2. ed. rev. [s.l.]: São Paulo Instituto Mauá de Tecnologia 2007 Edgard Blücher., 2007.

SANTANA, Marcos Diones Ferreira; KOMURA, Dirce Leimi; COUCEIRO, Douglas de Moraes; *et al.* **Fungos Silvestres da Amazônia Paraense: é de comer?** [s.l.]: Editora INPA, 2023. Disponível em: <<https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/39628>>.

SHIELDS, Margot; TREMBLAY, Mark S. Sedentary behaviour and obesity. **Health Reports**, v. 19, n. 2, p. 19–30, 2008.

SOUSA, Felipe Almeida de; ANDRADE, Ednilton Tavares De; FIGUEIRA, Vitor Gonçalves; *et al.* Estudo da cinética de secagem, contração volumétrica e análise da difusão líquida do morango (*Fragaria* SP.). **Engevista**, v. 16, n. 1, p. 8–18, 2014. Disponível em: <<http://periodicos.uff.br/engevista/article/view/8991>>.

SOUSA, Kelly Aparecida De; RESENDE, Osvaldo; CHAVES, Tarcísio Honório; *et al.* Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 4, p. 883–892, 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-66902011000400009&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt>.

SUN, Li-bin; ZHANG, Zhi-yong; XIN, Guang; *et al.* Advances in umami taste and aroma of edible mushrooms. **Trends in Food Science & Technology**, v. 96, p. 176–187, 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924224419303978>>.

TADINI, Carme Cecília; TELIS, Vania Regina Nicoletti; MEIRELLES, Antonio José de Almeida; *et al.* **Operações unitárias na indústria de alimentos volume II**. 1–2017. ed. Brazil: Ltc-Livros Tecnicos E Cientificos Editora Lda, 2015.

TREVISANI, Juliana Machado Guillen. **Atitudes do consumidor em relação ao consumo de cogumelos champignon de Paris**. Especialista em gestão empresarial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018. Disponível em: <<http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/handle/1/23747>>.

URBEN, Arailde Fontes. **Produção de cogumelos por meio de tecnologia chinesa modificada: biotecnologia e aplicações na agricultura e na saúde**. 3^a ed., revista e ampliada. Brasília, DF: Embrapa, 2016.

VILELA, Carlos Alberto Almeida; ARTUR, Patrícia Oliveira. Secagem do açafrão (*Curcuma longa* L.) em diferentes cortes geométricos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 28, n. 2, p. 387–394, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-20612008000200018&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt>.