

## Modelagem Matemática da Cinética de Secagem de Fatias de Beterraba (*Beta vulgaris* L.)

Maria Clara Costa Alves<sup>1</sup>, Jakeline Mendonça<sup>1</sup>, Érica Regina Bárbaro da Silva<sup>1</sup>, Samuel Fernandes De Arruda<sup>1</sup>, Carolina Castilho Garcia<sup>2</sup>, Elciane Regina Zanatta<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Acadêmico de Engenharia de Alimentos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Campus Medianeira, Paraná, Brasil, e-mail: mariaalves@alunos.utfpr.edu.br

<sup>2</sup>Docente do Departamento de Alimentos – DAALM, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Campus Medianeira – Paraná, Brasil, e-mail: elcianezanatta@utfpr.edu.br

**Resumo:** Este estudo analisou a cinética de secagem de fatias de beterraba a 70 °C. Observou-se uma redução de 90,1% na massa inicial, o que evidencia a eficiência da remoção contínua de água pelo mecanismo de difusão. Os modelos de Newton, Page e Henderson e Pabis foram ajustados aos dados, todos com coeficientes de determinação superiores a 0,98. O modelo de Page destacou-se como o mais adequado  $R^2=0,9974$ , sendo o mais apropriado para descrever a cinética de secagem nas condições avaliadas.

**Palavras-chave:** beterraba (*Beta vulgaris* L.); secagem; cinética de secagem; modelagem matemática; modelo de Page.

## Modelagem Matemática da Cinética de Secagem de Fatias de Beterraba (*Beta vulgaris* L.)

**Abstract:** This study analyzed the drying kinetics of beetroot slices at 70 °C. A 90.1% reduction in initial mass was observed, demonstrating the efficiency of continuous water removal via the diffusion mechanism. The Newton, Page, and Henderson & Pabis models were fitted to the data, all yielding coefficients of determination greater than 0.98. The Page model stood out as the best fit ( $R^2 = 0.9974$ ), proving to be the most appropriate for describing the drying kinetics under the conditions evaluated.

**Keywords:** beetroot (*Beta vulgaris* L.); drying; drying kinetics; mathematical modeling; Page model.

### INTRODUÇÃO

A beterraba (*Beta vulgaris* L.) trata-se de uma raiz que possui em sua composição alto teor de carboidratos, fibra alimentar, minerais como ferro, manganês, potássio e magnésio, vitaminas C, E e K, além de apresentar relevância devido ao seu valor nutricional e funcional, tais como suas propriedades antioxidantes e anti-inflamatórias (França, 2021; Marra, 2025) possui elevado teor de água, como pode ser visto na Tabela 1, sendo altamente perecível, influenciando significativamente em reações indesejáveis e deterioração microbiológica.

**Tabela 1.** Composição nutricional da beterraba (*Beta vulgaris* L.) in natura.

| Componente          | Unidade | Teor<br>(em 100g) |
|---------------------|---------|-------------------|
| Valor energético    | cal     | 43                |
| Água                | %       | 87,3              |
| Proteínas           | g       | 1,6               |
| Lipídios            | g       | 0,1               |
| Carboidratos totais | g       | 9,9               |
| Fibras              | g       | 0,8               |
| Cinzas              | g       | 1,1               |
| Cálcio              | mg      | 16                |
| Fósforo             | mg      | 33                |
| Ferro               | mg      | 33                |
| Sódio               | mg      | 60                |



|                              |    |      |
|------------------------------|----|------|
| Potássio                     | mg | 335  |
| Vitamina A (Retinol)         | mg | 20   |
| Vitamina B1 (Tiamina)        | mg | 0,03 |
| Vitamina B2 (Riboflavina)    | mg | 0,05 |
| Vitamina B3 (Niacina)        | mg | 0,4  |
| Vitamina C (Ácido ascórbico) | mg | 10   |

**Fonte:** Adaptada de Tivelli *et al.* (2011)

Para reduzir a sua atividade de água e evitar a deterioração, a secagem visa garantir a estabilidade do alimento, preservando a vida útil e inibindo o crescimento de microrganismos e retardando reações químicas. Na secagem o calor é transferido do ar aquecido para o produto por convecção, e posteriormente a água evaporada também é transportada para o ar por convecção. A secagem convectiva geralmente requer muito tempo e causa muitas mudanças indesejáveis no material (Nowak & Lewicki, 2004)

A secagem de alimentos vem sendo bastante empregada na indústria de alimentos, principalmente na aplicação em vegetais, visando a conservação por meio da remoção térmica da umidade por evaporação. Durante a secagem, o tecido pode sofrer redução em seu volume (encolhimento), devido a alterações na microestrutura do material fresco, como o aumento de cavidades, dentre outras transformações causadas pelo estresse térmico, e, principalmente, pela remoção de umidade. As alterações estruturais dependem, também, do formato do produto que está sendo submetido à secagem (Katekawa 2006, Borges *et al.* 2008).

Na secagem, a perda de umidade é rápida nos primeiros instantes, já que no início a evaporação ocorre próxima à superfície do produto (THUWAPANICHAYANAN *et al.*, 2011). Ao final do processo a água removida está ligada às moléculas do tecido, provocando resistência interna de transferência de massa (CANO-CHAUCA *et al.*, 2004), resultando em menor coeficiente de difusão (BORGES *et al.*, 2008) e velocidade lenta de secagem.

O conhecimento da umidade de equilíbrio é bastante relevante para os processos de transformação, preservação e armazenamento de alimentos. A estimação para realização da umidade de equilíbrio é importante para a avaliação da cinética de secagem, além da utilização dos modelos matemáticos e determinação da constante de secagem (k), difusividade efetiva de massa (Def) e energia de ativação (Ea) (Batista 2004, Silva *et al.* 2009).

A cinética de secagem e a modelagem matemática possibilitam a simulação e otimização do processo, como o dimensionamento e determinação da aplicação comercial do sistema de secagem (PEREA-FLORES *et al.*, 2012; BAPTESTINI *et al.*, 2015).

O estudo da cinética de secagem é fundamental para descrever o comportamento do material durante o processo e estimar o tempo necessário para a desidratação. A perda de água ocorre em etapas: inicialmente, remove-se a umidade superficial ao longo do tempo, e, em seguida, ocorre a difusão do líquido das camadas internas para a superfície do material, onde a evaporação acaba desidratando o alimento, por conta da saturação da superfície. Devido a alguns fatores, como espessura das fatias, temperatura e teor de umidade do alimento a ser seco.

Desta forma, este estudo teve como objetivo investigar a cinética de secagem de fatias de beterraba (*Beta vulgaris* L.) a 70 °C, por meio do ajuste dos dados experimentais aos modelos matemáticos de Newton, Page e Henderson e Pabis, avaliando sua capacidade de representar o processo de secagem. A modelagem matemática constitui uma ferramenta importante para a simulação, otimização e dimensionamento de sistemas de secagem, contribuindo para o aumento da eficiência do processo e para a preservação da qualidade do produto.

## MATERIAL E MÉTODOS

Inicialmente, foram selecionadas amostras de beterraba com espessuras de 0,5 cm. Foram cortadas aproximadamente 60 fatias de beterraba, utilizando um cortador manual retangular, cujas dimensões (comprimento e largura iniciais) foram mensuradas. Para o controle experimental, a espessura de cinco fatias de cada grupo foi medida aleatoriamente com o auxílio de um paquímetro. Uma parcela da beterraba fresca foi reservada separadamente para a análise de umidade inicial.

Os experimentos de secagem foram realizados em uma estufa com circulação forçada de ar e controlador digital de temperatura, operando a 70 °C durante um período de 4 horas. Inicialmente, à estufa e o sistema de circulação de ar foram ligados até que a temperatura de operação fosse estabilizada. Em seguida, três bandejas metálicas gradeadas foram identificadas, pesadas individualmente e utilizadas para acondicionar as amostras frescas. Ao longo do processo de secagem, as bandejas foram pesadas em intervalos de 20 minutos, com o objetivo de acompanhar a cinética de secagem das amostras. Ao término do experimento, foram realizadas novas medições do comprimento, da largura e da espessura

de cinco amostras de cada espessura utilizando um paquímetro, permitindo a avaliação da retração dimensional provocada pela secagem.

A determinação da umidade foi realizada em triplicata para as amostras frescas (tempo zero), secas (após 4 horas de processamento) e em equilíbrio. Para isso, utilizou-se o método gravimétrico em estufa sem circulação de ar, mantida a 105 °C. Inicialmente, foram pesados entre 3 e 5 gramas de cada amostra em cadinhos previamente identificados. Em seguida, as amostras permaneceram na estufa por 4 horas. Após esse período, os cadinhos foram transferidos para um dessecador, onde permaneceram por aproximadamente 20 minutos para resfriamento, sendo então realizada a pesagem final para determinação do teor de umidade.

Os dados experimentais da secagem foram expressos na forma da razão de umidade (MR), calculada pela Equação 1:

$$MR = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \quad (1)$$

sendo:

( $X_t$ ) corresponde ao teor de umidade no tempo (t),

( $X_0$ ) ao teor de umidade inicial,

( $X_e$ ) ao teor de umidade de equilíbrio, todos expressos em base seca.

Em seguida, os dados experimentais foram ajustados aos modelos matemáticos de Newton, Page e Henderson e Pabis, as equações estão apresentadas na Tabela 2. A estimativa dos parâmetros de cada modelo foi realizada utilizando o suplemento *Solver* do *Microsoft Excel*®, por meio do método GRG Não Linear, minimizando a soma dos quadrados dos resíduos entre os valores experimentais e os valores preditos pelos modelos. A qualidade dos ajustes foi avaliada com base no coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

**Tabela 2.** Modelos matemáticos utilizados para descrever a cinética de secagem.

| Modelo            | Equação              |
|-------------------|----------------------|
| Newton            | $MR = e^{-kt}$ (2)   |
| Page              | $MR = e^{-kt^n}$ (3) |
| Henderson e Pabis | $MR = ae^{-kt}$ (4)  |

**Fonte:** Autoria Própria (2026).

Em que:

MR – Razão de umidade,

k – Constantes de secagem,

t – Tempo,

n – Coeficientes do modelo,

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados experimentais brutos relacionando o peso em gramas das amostras de beterraba durante o processo de secagem em estufa, são apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3.** Média das massas das amostras de beterraba em função do tempo de secagem em estufa com convecção de ar e temperatura de 70 °C.

| Tempo (minutos) | Massa (gramas) |
|-----------------|----------------|
| 0               | 82,950         |
| 20              | 71,506         |
| 40              | 65,006         |
| 60              | 56,626         |
| 80              | 44,992         |
| 100             | 38,845         |
| 120             | 32,057         |
| 140             | 26,366         |
| 160             | 21,652         |
| 180             | 17,047         |
| 220             | 10,582         |
| 260             | 8,205          |

**Fonte:** Autoria Própria (2026).

Observou-se que a permanência da beterraba no interior da estufa de secagem resultou em uma redução acentuada da massa das amostras. A média das massas iniciais das fatias de beterraba foi de 82,95 gramas, reduzindo-se para 8,205 gramas ao final do processo, o que corresponde a uma perda aproximada de 90,1% da massa inicial. Este fenômeno decorre do gradiente de transferência de massa (evaporação da água livre), o qual induz o estresse estrutural e o consequente encolhimento (retração volumétrica) da matriz celular decorrente do processo de desidratação.

A temperatura máxima a qual as amostra de beterraba foram submetidas, foi limitada a 70 °C, e isso possibilita que as características relacionadas à qualidade do produto desidratado se mantenham adequadas. De maneira geral, pode-se observar que a secagem convectiva é uma técnica economicamente

atraente para a indústria de alimentos pois aumenta a eficiência do processo e reduz significativamente seu gasto energético, mantendo a qualidade dos produtos desidratados (De Queiroz *et al.*, 2022)

Os dados obtidos experimentalmente durante o processo de secagem da beterraba a 70 °C, foram utilizados para calcular a razão de umidade adimensional, e são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4.** Razão de umidade (MR) das amostras de beterraba submetidas ao processo de secagem em estufa com circulação forçada de ar a temperatura de 70 °C em função do tempo de secagem em minutos.

| Tempo (min) | Razão de Umidade (MR) |
|-------------|-----------------------|
| 0           | 1,0000                |
| 20          | 0,8649                |
| 40          | 0,7797                |
| 60          | 0,6700                |
| 80          | 0,5176                |
| 100         | 0,4371                |
| 120         | 0,3482                |
| 140         | 0,2737                |
| 160         | 0,2119                |
| 180         | 0,1516                |
| 220         | 0,0669                |
| 260         | 0,0358                |

**Fonte:** Autoria Própria (2026).

É possível observar que a razão de umidade (MR) reduziu ao longo do tempo de secagem. Essa redução demonstra a remoção contínua de água do vegetal durante o processo, indicando que a secagem foi eficiente na diminuição do teor de umidade das fatias de beterraba.

Comportamento semelhante foi observado por (Mella *et al.*, 2022), que relataram que a razão de umidade (MR) da beterraba decresce continuamente ao longo do tempo de secagem até que atinja o equilíbrio. De acordo com os autores, esse processo ocorre pelo mecanismo de difusão, onde a água livre evapora intensamente no estágio inicial e, posteriormente, a umidade ligada é transportada para a superfície do vegetal para ser removida, resultando na remoção contínua de água e na consequente redução da massa da amostra.

Os resultados obtidos a partir do ajuste dos modelos de Newton, Page e Henderson e Pabis aos dados experimentais da cinética de secagem da beterraba são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5.** Ajuste dos dados experimentais, razão de umidade (MR), pelos modelos de Newton, Page e Henderson e Pabis.

| Tempo (minutos) | Modelo de Newton | Modelo de Page | Modelo de Henderson e Pabis |
|-----------------|------------------|----------------|-----------------------------|
| 0               | 1                | 1              | 1,0588                      |
| 20              | 0,8376           | 0,9051         | 0,8768                      |
| 40              | 0,7015           | 0,7783         | 0,7261                      |
| 60              | 0,5876           | 0,6507         | 0,6013                      |
| 80              | 0,4922           | 0,5326         | 0,4979                      |
| 100             | 0,4122           | 0,4285         | 0,4123                      |
| 120             | 0,3453           | 0,3396         | 0,3414                      |
| 140             | 0,2892           | 0,2656         | 0,2827                      |
| 160             | 0,2422           | 0,2053         | 0,2341                      |
| 180             | 0,2029           | 0,1570         | 0,1939                      |
| 220             | 0,1423           | 0,0891         | 0,1329                      |
| 260             | 0,0999           | 0,0488         | 0,0912                      |

**Fonte:** Autoria Própria (2026).

Pode-se observar que a razão de umidade diminui progressivamente ao longo do processo de secagem, comportamento esperado em decorrência da remoção contínua de água do material. Os três modelos empregados para o ajuste dos dados experimentais foram capazes de representar satisfatoriamente essa tendência, reproduzindo a redução da razão de umidade ao longo do tempo.

A modelagem matemática é uma maneira concisa de representar o comportamento físico em termos matemáticos que consistem em equações que fornecem uma saída baseada em um conjunto de dados de entrada. Tem se mostrado uma ferramenta relevante para comparação de diferentes parâmetros de processo e pré-tratamento na área de secagem (Graciola, 2022).

Na Tabela 6 estão apresentados os parâmetros obtidos pelo ajuste dos modelos de Newton, Page e Henderson e Pabis aos dados experimentais da cinética de secagem da beterraba a 70 °C, e seus respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e a soma dos quadrados dos erros (SSE).

**Tabela 6.** Parâmetros dos modelos de Newton, Page e Henderson e Pabis, coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e a soma dos quadrados dos erros (SSE).

| Modelos | Newton | Page   | Henderson e Pabis |
|---------|--------|--------|-------------------|
| $R^2$   | 0,9866 | 0,9974 | 0,9828            |
| k       | 0,0089 | 0,0019 | 0,0094            |

|     |            |            |            |
|-----|------------|------------|------------|
| a   | -          | -          | 1,0588     |
| n   | -          | 1,3297     | -          |
| SSE | 2,8494E-02 | 3,1654E-03 | 2,2040E-02 |

**Fonte:** Autoria Própria (2026).

Entre os modelos analisados para descrever a cinética de secagem da beterraba, o modelo de Page apresentou o melhor desempenho, com o maior coeficiente de determinação  $R^2 = 0,9974$  e a menor soma dos quadrados dos erros  $SSE = 3,1654 \times 10^{-3}$ . Esses resultados indicam que esse modelo foi o que melhor representou os dados experimentais, apresentando maior concordância entre os valores observados e os valores preditos. Embora os modelos de Newton, com  $R^2 = 0,9866$ , e Henderson e Pabis, com  $R^2 = 0,9828$ , também tenham apresentado elevados coeficientes de determinação, seus valores de SSE foram superiores aos obtidos para o modelo de Page, evidenciando menor precisão no ajuste dos dados experimentais.

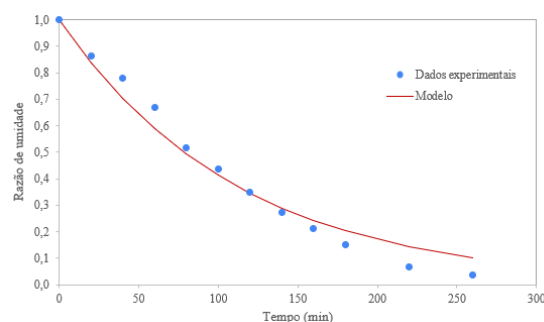
Os resultados obtidos neste estudo estão em concordância com os relatados por Leite et al., (2017), que, ao avaliarem a desidratação da casca de abacaxi em estufa nas temperaturas de 75 °C e 85 °C, verificaram que os modelos de Page, Aproximação da Difusão e Midilli apresentaram coeficientes de determinação superiores a 0,99, sendo considerados os mais adequados para descrever a cinética de secagem. De forma semelhante, o elevado coeficiente de determinação obtido para o modelo de Page neste trabalho demonstra sua elevada capacidade em representar o comportamento da secagem da beterraba nas condições experimentais avaliadas.

Além disso, conforme discutido por (Barros et al., 2020), coeficientes de determinação superiores a 0,98 indicam que os modelos matemáticos apresentam elevada capacidade de representar o comportamento da secagem. Dessa forma, embora os três modelos avaliados tenham apresentado desempenho satisfatório, o modelo de Page destacou-se por fornecer o melhor ajuste aos dados experimentais, podendo ser considerado o mais apropriado para descrever a cinética de secagem da beterraba nas condições estudadas.

Os modelos matemáticos foram validados experimentalmente com uma secagem contínua e intermitente, com parâmetros estatísticos satisfatórios (De Queiroz et al., 2022). Segundo Sander et al. (2010), o modelo de Page é amplamente utilizado devido à sua excelente correlação com dados experimentais, superando modelos de camada fina mais simples, como o de Lewis (frequentemente associado ao modelo de Newton),

independentemente do tipo de material ou método de aquecimento utilizado.

Na Figura 1, 2 e 3, está representado a cinética de secagem da beterraba fatiada, para os modelos de Newton, Page e Henderson e Pabis, respectivamente. Podemos observar que os pontos em azul apresentam os dados experimentais de perda de massa durante a secagem, e as linhas contínuas representam os dados de ajuste preditos pelos modelos utilizados.



**Figura 1.** Ajuste do modelo de Newton aos dados experimentais da cinética de secagem da beterraba em estufa com circulação forçada de ar, a temperatura de 70 °C.

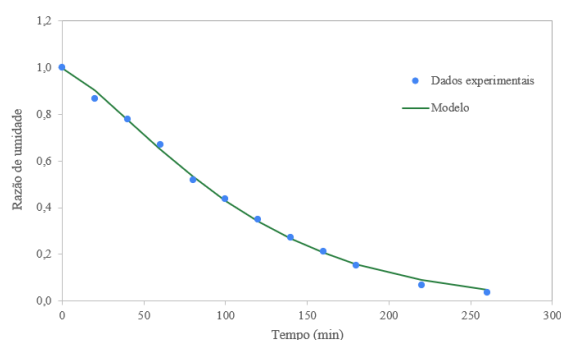
**Fonte:** Autoria Própria (2026).

Na Figura 1, observa-se o ajuste obtido pelo modelo de Newton aos dados experimentais da cinética de secagem da beterraba a 70 °C. Embora a curva apresente comportamento decrescente e acompanhe a tendência geral de redução da razão de umidade, é possível observar um afastamento entre os pontos experimentais e a curva ajustada em alguns tempos específicos, principalmente em 40 e 60 minutos e, posteriormente, nos tempos finais de 180, 220 e 260 minutos. Esse comportamento indica que o modelo de Newton não representou com a mesma precisão todas as etapas da secagem, apresentando desvios tanto na fase intermediária quanto na fase final do processo.

A limitação observada no modelo de Newton para descrever com precisão todas as etapas da secagem da beterraba é um fenômeno documentado na literatura para diversos materiais porosos. Sander et al. (2010) realizaram um estudo comparativo com 11 tipos de materiais porosos (incluindo argila, couro, madeira e produtos farmacêuticos) e reforçaram que modelos simples e puramente exponenciais, como o de Newton (também referido como modelo de Lewis), não se correlacionam inteiramente com todas as partes dos dados de secagem.

Segundo (Buzrul, 2022) esses desvios observados em tempos específicos ocorrem porque o modelo de Newton (ou Lewis) baseia-se em um decaimento exponencial simples que, não possui flexibilidade

suficiente para descrever a complexidade da cinética de secagem na maioria dos alimentos.

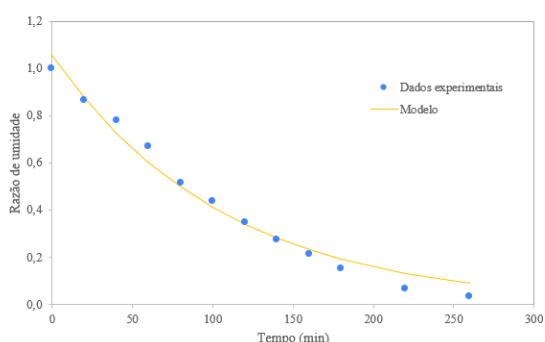


**Figura 2.** Ajuste do modelo de Page aos dados experimentais da cinética de secagem da beterraba em estufa com circulação forçada de ar, a temperature de 70 °C.

**Fonte:** Autoria Própria (2026).

A Figura 2 apresenta o ajuste do modelo de Page, no qual se observa maior proximidade entre a curva estimada e os pontos experimentais. Esse resultado confirma visualmente os dados estatísticos apresentados na Tabela 6, em que o modelo de Page apresentou o maior coeficiente de determinação e a menor soma dos quadrados dos erros.

Segundo Sander et al. (2010), o ajuste do modelo de Page está justamente em sua capacidade de capturar o momento em que a difusão se torna o mecanismo governante, representando as variações na taxa de remoção de umidade com maior fidedignidade estatística do que os modelos mais simples.



**Figura 3.** Ajuste do modelo de Henderson e Pabis aos dados experimentais da cinética de secagem da beterraba em estufa com circulação forçada de ar, a temperature de 70 °C.

**Fonte:** Autoria Própria (2026).

Na Figura 3, referente ao modelo de Henderson e Pabis, também é possível observar que a curva ajustada acompanha a tendência decrescente da razão

de umidade. No entanto, assim como no modelo de Newton, verifica-se maior afastamento em alguns pontos, principalmente na fase inicial e final do processo, quando comparado ao modelo de Page. Apesar disso, o modelo apresentou coeficiente de determinação elevado, indicando que também foi capaz de representar satisfatoriamente o comportamento da secagem da beterraba, ainda que com menor precisão.

Um comportamento análogo foi verificado por Leite *et al.* (2017) ao estudarem casca de abacaxi os autores observaram que, apesar de o modelo apresentar um  $R^2$  elevado, ele demonstrou uma distribuição tendenciosa dos resíduos, indicando que não consegue representar com total fidedignidade todas as etapas da remoção de água, sendo superado pela flexibilidade matemática de modelos que utilizam parâmetros de ajuste adicionais

## CONCLUSÃO

O estudo da cinética de secagem de fatias de beterraba a 70 °C demonstrou que o processo é altamente eficiente para a remoção de umidade, resultando em uma redução de massa muito significativa. A análise da razão de umidade confirmou um decréscimo contínuo ao longo do tempo, evidenciando que a secagem ocorre predominantemente pelo mecanismo de difusão, com uma fase inicial de evaporação intensa da água livre seguida pela remoção da umidade ligada.

Quanto à modelagem matemática, os três modelos testados, Newton, Page e Henderson e Pabis apresentaram coeficientes de determinação elevados o que indica uma capacidade satisfatória de representar o fenômeno. No entanto, o modelo de Page destacou-se como o mais adequado, apresentando o maior ajuste estatístico com maior coeficiente de determinação e a menor soma dos quadrados dos erros.

## TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade a este estudo, sugerem-se futuras pesquisas que explorem a cinética de secagem em uma faixa mais ampla de temperaturas e espessuras de fatias, visando otimizar o tempo necessário para a desidratação do vegetal. É fundamental realizar a determinação de parâmetros termo físicos mais complexos, tais como a difusividade efetiva de massa ( $D_{ef}$ ) e a energia de ativação ( $E_a$ ), que são essenciais para o dimensionamento e aplicação comercial de sistemas de secagem. Além disso, considerando a relevância nutricional da beterraba, torna-se necessário avaliar o impacto do processamento térmico sobre a retenção de compostos bioativos,



como suas propriedades antioxidantes e anti-inflamatórias, garantindo que a qualidade funcional seja preservada. Outras frentes de investigação podem incluir um estudo mais aprofundado sobre o encolhimento e a retração volumétrica da matriz celular decorrente do estresse térmico, bem como a análise da eficácia de diferentes pré-tratamentos que possam acelerar a remoção de água e aumentar a eficiência energética do processo

### AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos à Prof.<sup>a</sup> Dra. Elciane Regina Zanatta, pela orientação, dedicação, disponibilidade e pelos valiosos ensinamentos que contribuíram significativamente para o desenvolvimento deste trabalho. Agradecemos, também, à Prof.<sup>a</sup> Dra. Caroline Castilho, pela orientação durante a prática de secagem, na qual foram obtidos os dados experimentais utilizados neste estudo, bem como pelos conhecimentos compartilhados ao longo da atividade. Por fim, os autores agradecem à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Medianeira, pelo suporte institucional e pela disponibilização da infraestrutura e dos laboratórios necessários para a realização das atividades experimentais.

### REFERÊNCIAS

BARROS, Sâmela Leal *et al.* Modelagem matemática da cinética de secagem de cascas do kimo (*Cucumis metuliferus*). **Research, Society and Development**, v. 9, n. 1, p. e60911608–e60911608, 1 jan. 2020.

BUZRUL, Sencer. Reassessment of Thin-Layer Drying Models for Foods: A Critical Short Communication. **Processes** **2022**, Vol. 10, Page 118, v. 10, n. 1, p. 118, 7 jan. 2022.

DE QUEIROZ, Geisiany Maria *et al.* Otimização da secagem convectiva intermitente com foco na redução de consumo de energia e melhoria da qualidade - aplicação a beterrabas vermelhas. 7 mar. 2022.

GRACIOLA, Keli Cristiane. Pré-tratamentos para secagem de beterraba. 2022.

LEITE, Daniela Dantas de Farias *et al.* Mathematical modeling for the description of drying kinetics of pineapple bark. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 12, n. 4, p. 769–774, 1 out. 2017.

MELLA, Carolina *et al.* Impact of vacuum drying on drying characteristics and functional properties of beetroot (*Beta vulgaris*). **Applied Food Research**, v. 2, n. 1, p. 100120, 1 jun. 2022.

THUWAPANICHAYANAN, R. *et al.* Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying. **LWT - Food Science and Technology**, v. 44, p. 1502-1510, 2011. DOI: 10.1016/j.lwt.2011.01.003. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.01.003>. Acesso em: 29 jun. 2026.

CANO-CHAUCA, M. *et al.* Curvas de secagem e avaliação da atividade de água da banana passa. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, v. 22, p. 121-132, 2004. Disponível em: <http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs/index.php/alimentos/article/view/1184/985>. Acesso em: 29 jun. 2026.

BORGES, S. V. *et al.* Secagem de fatias de abóboras (*Cucurbita moschata* L.) por convecção natural e forçada. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 28, p. 245-251, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/cta/v28s0/37.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2026.

KATEKAWA, M. E. Análise teórico-experimental do encolhimento: estudo da secagem de banana. 2006. 151 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

BATISTA, L. M. Secagem de quitosana obtida a partir de resíduos de camarão: análise da cinética de secagem considerando encolhimento. 2004. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos) – Fundação Universidade do Rio Grande, Rio Grande, 2004.

SILVA, A. S. *et al.* Cinética de secagem em camada fina da banana maçã em secador de leito fixo. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 11, n. 2, p. 129-136, 2009.

BAPTESTINI, F. M. *et al.* Modelagem matemática da secagem de espuma de graviola. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 1203-1208, 2015.

MARRA, B. C. Estudo sobre secagem de beterraba (*Beta vulgaris* L.) em janela de refratância. 2025. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal de Uberlândia, Patos de Minas, 2025.



FRANÇA, P. R. L. Secagem de beterraba vermelha: avaliação do processo e qualidade do produto por uso de técnicas de imagem e espectroscopia no infravermelho próximo (NIR). 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2021.