

# CAPÍTULO 4

## ANÁLISE DA CINÉTICA DE SECAGEM DO FRUTO MELÃO DE SÃO CAETANO (*MOMORDICA CHARANTIA* L.)

Luan Gustavo dos Santos  
Alessandra Telis dos Santos  
Edmur Gustavo Cabral Scatena  
Janaina Dos Reis Bondezan  
Karla Fernanda Felette  
Tuliana Lorraine Custódio Machado  
Raquel Manozzo Galante  
Leandro Osmar Werle

### RESUMO

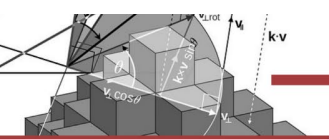
O melão São Caetano (*Momordica charantia* L.) é uma planta alimentícia não convencional rica em compostos bioativos. Seus frutos apresentam capacidade funcionais, capazes de serem eficazes no tratamento de doenças degenerativas. No entanto, seus frutos possuem uma baixa vida-útil devido sua composição rica em água, a qual promove oxidação e degradação. Neste contexto, a secagem quando aplicadas em produtos agroindustriais favorece na preservação do produto, redução do tamanho e redução de atividade biológicas e bioquímicas de produtos agroindustriais. Portanto, este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento cinético da secagem de fatias de melão São Caetano nas temperaturas de 60 e 70 °C e definir um modelo matemático que represente este processo. O aumento da temperatura de secagem de 60 para 70 °C promoveu a redução de 30 min do processo, a qual está associada ao aumento da difusividade de  $1,581 \times 10^{-9}$  para  $1,641 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Além disso, o modelo de Midilli melhor se ajustou aos dados cinéticos, sendo capaz de predizer o processo de desidratação das fatias de melão São Caetano.

**PALAVRAS-CHAVE:** Desidratação. Coeficiente de difusividade. Conservação de Alimentos.

### 1. INTRODUÇÃO

Comumente utilizada para a preservação de produtos agroindustriais, a secagem é uma técnica que se baseia na remoção da água do interior do produto através da difusividade, ou seja, pelo transporte da água não ligada para a superfície do material e que, através da transferência de calor e massa, promove a redução da umidade do produto (SANTOS *et al.*, 2021). De modo a obter produtos de alta qualidade nutricional e sensorial, diversas técnicas de secagem são exploradas no campo agroindustrial, tais como convectiva, infravermelho, micro-ondas, liofilização etc. Vale salientar que a redução do teor de água em produtos alimentícios favorece na redução e/ou inativação de microrganismos, prolongando sua vida útil (SANTOS *et al.*, 2019a).

A secagem por convecção baseia-se na exposição do produto úmido a uma fonte de calor aquecido durante um tempo específico, de modo a ocorrer a redução do conteúdo de água



do material (SANTOS *et al.*, 2021). A temperatura, velocidade do ar, umidade relativa e área do material úmido são alguns dos parâmetros que podem influenciar no tempo de secagem e, portanto, diversos estudos são realizados para obter melhores condições de operação e qualidade do produto seco (GODOI *et al.*, 2020).

O melão São Caetano (*Momordica Charantia* L.) é uma planta alimentícia não convencional a qual é muito utilizada como em diversas regiões da América Latina como alimento funcional e medicinal (ASSIS *et al.*, 2015). Estudos mostram que o melão São Caetano (MSC) apresenta propriedades bioativas, tais como ação antibacteriana, anti-hipertensiva, imunossupressora, anti-inflamatória e até mesmo anticancerígena, devido seu alto teor de compostos fenólicos, vitaminas do complexo B e ferro, sendo usada no tratamento e combate da doença de Alzheimer, fígado, coração e diabetes (GAYATHRY; JOHN, 2022). Sua composição rica em água favorece reações químicas, bioquímicas e biológicas, gerando rápida degradação. Por isso, a aplicação da secagem torna-se fundamental para a preservação dos constituintes fitoquímicos e prolongamento da vida-útil do MSC.

Portanto, o objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento cinético de secagem de fatias de melão São Caetano nas temperaturas de 60 e 70 °C e ajustar modelos matemáticos aos dados experimentais para melhor predizer o processo de desidratação.

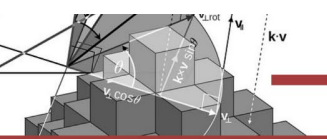
## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O melão São Caetano foi adquirido em Caarapó – Mato Grosso do Sul e o experimento foi realizado na Universidade Federal da Grande Dourados, no laboratório de análise tecnológica (LATEC). O MSC foi cortado em fatias com espessura de aproximadamente 0,3 cm e seu diâmetro foi medido em duplicata. As amostras foram pesadas e colocadas em um vidro relógio, previamente identificados.

Para a secagem das amostras, utilizou-se um secador convectivo de bandejas com fluxo de ar vertical, com temperatura de ar de  $60 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $70 \pm 2^\circ\text{C}$  com velocidade do ar de secagem de  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . As pesagens foram realizadas nas duas primeiras horas a cada 15 minutos, na terceira e quarta hora a cada 30 minutos e nas demais a cada uma hora. A pesagem prosseguiu até alcançar peso constante. Posteriormente, as amostras permaneceram na estufa por 24 horas e pesadas novamente para obter a massa do sólido seco ( $W_{ss}$ ) (BONZI *et al.*, 2022).

### 2.1 Determinação das curvas de secagem

A umidade inicial e ao longo do tempo ( $X_t$ ) para as amostras analisadas das fatias de açafreão foram determinadas empregando o peso da água evaporada e do peso final da amostra



seca ( $W_{ss}$ ). Foi construída a curva típica de secagem, plotando-se a umidade em função do tempo, durante o período de secagem.

A razão de umidade (RU) das fatias de açafrão na temperatura avaliada foi definida conforme a Equação 1. Onde RU,  $X_e$  e  $X_0$  representam, respectivamente, o teor de umidade do produto ao longo do tempo, teor de umidade em equilíbrio do produto e o teor de umidade inicial do produto, dados em gramas de água por grama de sólido seco ( $g_{H_2O} g_{ss}^{-1}$ ) (SILVA *et al.*, 2014).

$$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (1)$$

A taxa de secagem, Ra ( $g_{H_2O}/min.cm^2$ ) descrita pela Equação 2, foi obtida a partir do método numérico com a derivação dos dados de umidade em relação ao tempo, onde  $\Delta X$  corresponde a variação da umidade livre média ( $g_{H_2O}/g_{ss}$ ) e  $\Delta t$  a variação do tempo (s), além do peso final da amostra seca ( $W_{ss}$ ) e da área superficial da amostra em m (A), determinada pela aproximação à área transversal de um cilindro, utilizando o diâmetro médio da amostra.

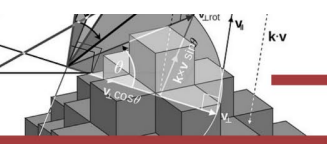
$$Ra = \frac{W_{ss} \cdot \Delta X}{A \cdot \Delta t} \quad (2)$$

## 2.2 Determinação do coeficiente de difusividade efetivo

Os dados experimentais foram ajustados de acordo com o modelo descrito pela 2ª Lei de Fick (Equação 3), para a cinética de secagem de alimentos. A partir desta equação foi calculada a difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) da água do interior das amostras, considerando o material como geometria de placa plana infinita, distribuição uniforme de umidade inicial, temperatura constante de secagem e encolhimento insignificante da amostra, conforme metodologia proposta por Crank (1975).

$$RU = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{ef} t}{4L^2}\right) \quad (3)$$

De acordo com Menezes *et al.* (2013) e Santos e Werle (2021) longos períodos de secagem, a Equação 3 pode ser simplificada apenas ao primeiro termo, não alterando os resultados da determinação do coeficiente difusivo, conforme mostrado na Equação 4.



$$RU = \frac{8}{\pi^2} e^{-\text{Def} \left(\frac{\pi}{2L}\right)^2 t} \quad (4)$$

Onde  $D_{\text{ef}}$  é o coeficiente de difusão efetivo ( $\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ ),  $t$  é o tempo de secagem (min) e  $L$  representa a espessura da amostra (cm).

### 2.3 Modelos matemáticos de secagem

Para avaliar a secagem do MSC os dados cinéticos foram ajustados em modelos matemáticos de secagem de produtos agroindustriais conforme mostrado na Tabela 1.

**Tabela 1:** Modelos aplicados na avaliação da cinética de secagem da semente de melancia.

Nome do modelo	Modelo	Referência
Page	$RU = e^{-kt^n}$	Page (1948)
Midilli	$RU = a e^{-kt^n} + bt$	Midilli, Kucuk e Yapar (2002)
Verma	$RU = a e^{-kt} + 1-a e^{-k_1 t}$	Verna, Bucklin, Endan e Wratten (1985)

RU = Razão de umidade;  $k$ ,  $k_1$ ,  $n$ ,  $a$ ,  $b$  = constantes do modelo de secagem;  $t$  = tempo de secagem.

Fonte: Dados da pesquisa (2019).

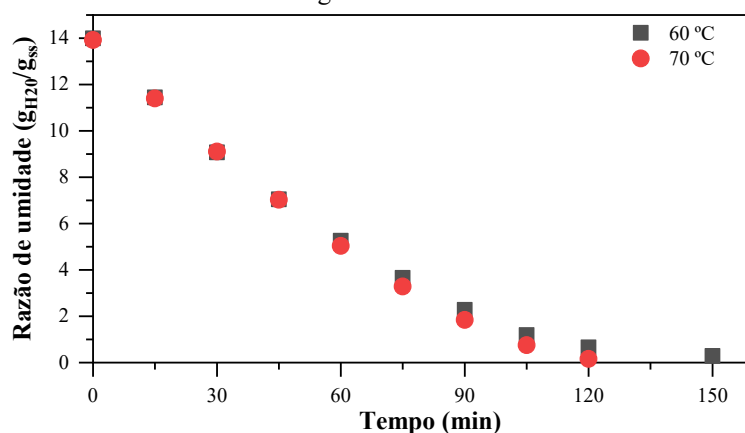
### 2.4 Análise estatística

Os ajustes dos dados cinéticos aos modelos matemáticos foram avaliados por meio do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e a raiz do erro médio (RMSE), onde os melhores ajustes são determinado sendo os valores mais próximos de 1 e 0, respectivamente (SANTOS *et al.*, 2021).

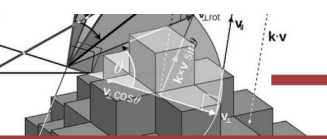
## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os constituintes dos produtos agroindustriais podem provocar uma maior barreira na penetração e transferência de calor, aumentando o tempo de secagem dos materiais (GODOI *et al.*, 2020). No processo de desidratação do melão São Caetano, pela análise do Gráfico 1 foi possível observar que o aumento da temperatura de 60 para 70 °C promoveu a redução do tempo de processo de 150 para 120 minutos, respectivamente.

**Gráfico 1:** Curva de secagem das fatias de melão São Caetano.



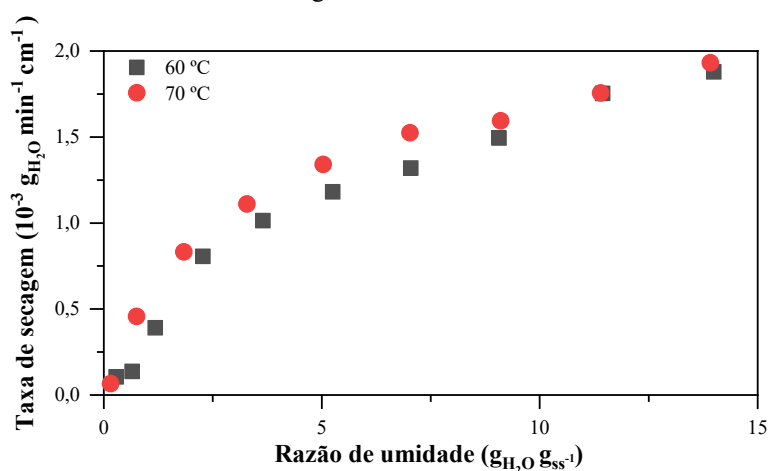
Fonte: Dados da pesquisa (2019).



Este comportamento está associado a exposição das fatias do MSC a uma fonte de calor superior, aumentando a troca de calor e, conseqüentemente, redução do tempo de secagem. Comportamento similar foi observado no aumento da temperatura de secagem da bardana (SANTOS *et al.*, 2022), semente de melancia (SANTOS *et al.*, 2021) e abóbora menina (SANTOS; WERLE, 2021).

Avaliando a taxa de secagem (Gráfico 2) é possível observar que uma maior quantidade de água foi removida das fatias do MSC quando secas a 70 °C, corroborando com o menor tempo de processo discutido anteriormente. Além disso, todo o processo seguir um fluxo decrescente, indicando que o fenômeno de difusão molecular interna é a principal característica do processo de desidratação (SANTOS *et al.*, 2021).

**Gráfico 2:** Taxa de secagem das fatias de melão São Caetano.



Fonte: Dados da pesquisa (2019).

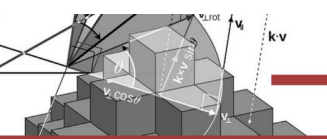
Ajustando os dados experimentais a 2ª Lei de Fick foi possível determinar o coeficiente de secagem (k) e a difusividade efetiva (D<sub>ef</sub>) do processo, como mostra a Tabela 2. Novamente, o aumento da temperatura promoveu maiores valores de k, gerando maior difusão do material devido ao aumento da troca de calor, permeação da água até a superfície do material e evaporação da umidade (SANTOS; WERLE, 2021).

**Tabela 2:** Difusividade efetiva (D<sub>ef</sub>) e Coeficiente de secagem (k) das fatias de melão São Caetano.

Temperatura (°C)	k (min <sup>-1</sup> )	D <sub>ef</sub> (10 <sup>-9</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
60	0,025	1,581
70	0,027	1,641

k: constante de secagem. D<sub>ef</sub>: difusividade efetiva.

Fonte: Dados da pesquisa (2019).



Produtos agrícolas apresentam valores de  $D_{ef}$  entre  $10^{-9}$  e  $10^{-11}$   $m^2.s^{-1}$  (SANTOS; WERLE, 2021), estando conforme aos valores de  $D_{ef}$  encontrados nas duas temperaturas avaliadas deste estudo. Ressalta-se que é de extrema importância a avaliação da temperatura ideal de secagem de alimentos, pois, apesar de maiores temperaturas ocasionarem uma redução no tempo de processo, a exposição exacerbada pode provocar a oxidação de fitoquímicos e afetar negativamente as características organolépticas do produto seco (GODOI *et al.*, 2020).

Os coeficientes dos modelos matemáticos de produtos agroindustriais ajustados a cinética de secagem das fatias do MSC são mostrados na Tabela 3. De modo geral, houve bom ajuste dos dados aos modelos, uma vez que os valores de  $R^2$  foram superiores a 0,9767. No entanto, ao avaliar os valores de RMSE, observa-se que o modelo de Midilli melhor representou os dados experimentais, isso porque, os dados estatísticos apresentaram-se inferior a 0,0072. Resultados similares foram apresentados na secagem de grãos de guandu (SILVA *et al.*, 2014), abóbora menina (SANTOS; WERLE, 2021) e bardana (SANTOS *et al.*, 2022).

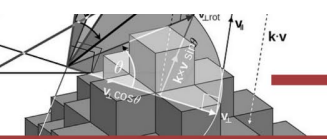
**Tabela 3:** Coeficientes dos modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais.

Modelo	Parâmetros					
	a	b ( $\times 10^{-4}$ )	k	n	$R^2$	RMSE
Midilli						
60 °C	0,9977	-0,001	0,0079	1,1399	0,9991	0,0072
70 °C	0,9981	-0,002	0,0075	1,1224	0,9996	0,0050
Page						
60 °C		0,0047	1,3218	0,9957		0,0193
70 °C		0,0036	1,3922	0,9937		0,0231
Verma						
60 °C	-0,1600	10	0,0205		0,9843	0,0343
70 °C	-0,1814	10	0,0213		0,9767	0,0406

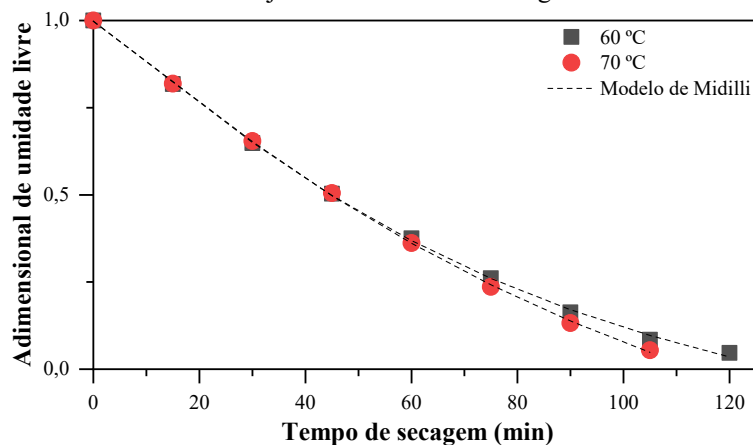
a, b, k,  $k_1$ : coeficientes do modelo de secagem.  $R^2$ : coeficiente de determinação. RMSE: Raiz quadrada do erro médio.

**Fonte:** Dados da pesquisa (2019).

Como pode ser observado na Gráfico 3, os dados experimentais se ajustaram fielmente ao modelo de Midilli. Este comportamento indica que o modelo de Midilli é capaz de representar o processo de secagem de fatias de MSC nas duas temperaturas avaliadas, auxiliando na determinação de melhores condições de processo, preservação dos constituintes do produto e eficiência energética.



**Gráfico 3:** Modelo de Midilli ajustado à cinética de secagem do melão São Caetano.



Fonte: Dados da pesquisa (2019).

#### 4. CONCLUSÃO

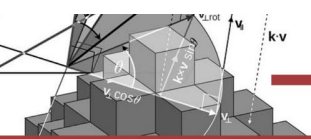
Neste estudo foi possível observar que o aumento da temperatura de 60 para 70 °C da secagem de fatias de melão São Caetano promoveu a redução de 30 min de processo devido ao aumento da taxa de secagem e, conseqüentemente, difusividade efetiva. Ainda, dentre os três modelos avaliados, Midilli apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais de ambas as temperaturas de secagem, sendo capaz de prever o processo de secagem das fatias de melão São Caetano.

#### REFERÊNCIAS

ASSIS, J. P. *et al.* Avaliação biométrica de caracteres do melão de São Caetano (*Momordica charantia* L). **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, [s. l.], v. 17, n. 4, p. 505–514, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbpm/a/7qM9jQ6zwZSFVQXTbqcT9nk/abstract/?lang=pt>. Acessado em: Fevereiro, 2023.

GAYATHRY, K. S.; JOHN, J. A. A comprehensive review on bitter gourd (*Momordica charantia* L.) as a gold mine of functional bioactive components for therapeutic foods. **Food Production, Processing and Nutrition**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 10, 2022. Disponível em: <https://fppn.biomedcentral.com/articles/10.1186/s43014-022-00089-x>. Acessado em: Fevereiro, 2023.

GODOI, A. S. *et al.* Determinação da Cinética de Secagem de Kiwi Amarelo (*Actinidia Chinensis*) E Kiwi Verde (*Actinidia Deliciosa*). **Brazilian Journal of Development**, [s. l.], v. 6, n. 7, p. 51941–51950, 2020. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/13982>. Acessado em: Fevereiro, 2023.



MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A. A new model for single-layer drying. **Drying Technology**, 20, p. 1503-1513, 2002. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1081/DRT-120005864>. Acessado em: Fevereiro, 2023.

SANTOS, L. G. dos. *et al.* Comparação da Cinética de Secagem de Maçã Argentina (*Malus domestica* 'RED DELICIOUS') e Maçã Verde (*Malus domestica* 'GRANNY SMITH'). In: **A Produção do Conhecimento nas Ciências da Saúde 2**. [s.l.] : Atena Editora, 2019. a. p. 178–187. Disponível em: <https://www.atenaeditora.com.br/catalogo/post/comparacao-da-cinetica-de-secagem-de-maca-argentina-malus-domestica-red-delicious-e-maca-verde-malus-domestica-granny-smith>. Acessado em: Fevereiro, 2023.

SANTOS, L. G. dos. *et al.* Avaliação de Modelos de Secagem e Determinação do Coeficiente Difusivo de Cará (*Dioscorea alata*). In: **As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente 4**. [s.l.] : Atena Editora, 2019. b. p. 40–48. Disponível em: <https://www.atenaeditora.com.br/catalogo/post/avaliacao-de-modelos-de-secagem-e-determinacao-do-coeficiente-difusivo-de-cara-dioscorea-alata>. Acessado em: Fevereiro, 2023.

SANTOS, L. G. dos; WERLE, L. O. Influência da Temperatura de Secagem de Fatias da Polpa de Abóbora Menina Brasileira nos Parâmetros Cinéticos e Termodinâmicos. **Revista Brasileira de Agrotecnologia**, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 556–562, 2021. Disponível em: <https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/REBAGRO/article/view/8761>. Acessado em: Fevereiro, 2023.

SANTOS, L. G. *et al.* Cinética de secagem das sementes de melancia (*Citrullus vulgaris*). In: **A indústria de alimentos e a economia circular: alimentando uma nova consciência**. [s.l.] : Agron Food Academy, 2021. Disponível em: <https://agronfoodacademy.com/9786599539640-34/> Acessado em: Fev. 2023.

SANTOS, L. G. *et al.* Aplicação de Modelos Matemáticos na Cinética de Secagem da Bardana (*Arctium lappa*). In: **A Indústria de Alimentos e a Economia Circular: Alimentando uma Nova Consciência**. [s.l.] : Agron Food Academy, 2022. Disponível em: <https://agronfoodacademy.com/9786599539640-39/>. Acessado em: Fev. 2023.

SILVA, F. P. da. *et al.* Thermodynamic properties and drying kinetics of Bauhinia forficata Link leaves. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 21, n. 1, p. 61–67, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/D66JSJjqDmX99HT4N3mjh8R/?lang=em> Acessado em: Fev. 2023.

SILVA, L. M. de M. *et al.* Modelos de predição da cinética de secagem dos grãos de guandu. **Brazilian Journal of Food Technology**, [s. l.], v. 17, n. 4, p. 310–318, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjft/a/TXTCyhJTTfc9CdzFTq4Bpkv/?lang=pt>. Acessado em: Fev. 2023.

PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum of air drying shelled corn in thin layer**. Indiana: Purdue University, 1948.

VERNA, L. R. *et al.* Effects of drying air parameters on rice drying models. **Transaction of the ASAE**, p. 28, 296-301, 1985. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=32245>. Acessado em: Fev. 2023.