



INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE SECAGEM DE FATIAS DA POLPA DE ABÓBORA MENINA BRASILEIRA NOS PARÂMETROS CINÉTICOS E TERMODINÂMICOS

Influence of the drying temperature of menina brasileira pumpkin slices in the kinetic and thermodynamic parameters

Luan Gustavo dos SANTOS^{1}, Leandro Osmar WERLE²*

RESUMO: A abóbora apresenta grande interesse nutricional devido seu conteúdo de carboidratos, fibras, carotenoides e compostos fenólicos. A abóbora menina brasileira é comumente encontrada no Brasil e apresenta grande susceptibilidade à degradação devido ao seu alto conteúdo de umidade, que promove a modificação das características físico-químicas e sensoriais, elevando a proliferação de micro-organismos e descarte deste alimento. Sendo assim, este trabalho tem por objetivo realizar a secagem convectiva de fatias da polpa da abóbora menina brasileira nas temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C, avaliando por meio de modelos matemáticos empíricos e semiempíricos os efeitos em relação a cinética de secagem e dos parâmetros termodinâmicos do processo. A cinética de secagem foi obtida por sucessivas pesagens de fatias de abóbora menina brasileira alocadas em secadora de bandeja ajustada a uma velocidade do ar de 1 m s⁻¹. Os dados cinéticos foram ajustados a seis modelos matemáticos e a Segunda Lei de Fick foi utilizada para determinar o coeficiente de difusividade do material. A partir da equação de Arrhenius foram determinados os parâmetros termodinâmicos. Foi observado que o aumento da temperatura reduziu o tempo de secagem de 360 min para 180 min, elevando a difusividade efetiva de 1,3526x10⁻⁹ para 1,9352x10⁻⁹. Além disso, os modelos de Cavalcanti-Mata e Valcam representaram de forma preditiva e precisa o comportamento dos dados experimentais em todas as temperaturas avaliadas. Por fim, a partir dos parâmetros termodinâmicos, foi possível afirmar que o processo de desidratação é endotérmico e não ocorre de forma espontânea.

Palavras-chave: Desidratação. Difusividade efetiva. Modelagem matemática. Curvas de secagem. Energia de ativação.

ABSTRACT: Pumpkin has great nutritional interest due to its content of carbohydrates, fibers, carotenoids and phenolic compounds. The menina brasileira pumpkin is commonly found in Brazil and has great susceptibility to degradation due to its high moisture content, which promotes the modification of the physical-chemical and sensory characteristics, increasing the proliferation of microorganisms and the disposal of this food. Therefore, this work aims to perform the convective drying of slices of menina brasileira pumpkin pulp at temperatures of 50, 60, 70 and 80 °C, evaluating by means of empirical and semi-empirical mathematical models the effects in relation to drying kinetics and the thermodynamic parameters of the process. The drying kinetics was obtained by successive weighing of menina brasileira pumpkin slices allocated in a tray dryer adjusted to an air speed of 1 m s⁻¹. The kinetic data were adjusted to six mathematical models and the Second Fick's Law was used to determine the diffusivity coefficient of the material. Thermodynamic parameters were determined from the Arrhenius equation. It was observed that the increase in temperature reduced the drying time from 360 min to 180 min, increasing the effective diffusivity from 1.3526x10⁻⁹ to 1.9352x10⁻⁹. In addition, the Cavalcanti-Mata and Valcam models represented in a predictive and accurate way the behavior of the experimental data at all temperatures evaluated. Finally, from the thermodynamic parameters, it was possible to state that the dehydration process is endothermic and does not occur spontaneously.

Key words: Dehydration. Effective diffusivity. Mathematical modeling. Drying curves. Activation energy.

* Autor para correspondência

Recebido para publicação em 20/04/2021, aprovado em 05/06/2021.

¹Eng. de Alimentos, Doutorando em Engenharia e Ciência de Alimentos pela Universidade Federal do Rio Grande, FURG, Rio Grande – RS, luansantos.ea@outlook.com.

²Eng. Químico, D. Sc., Professor Adjunto da Universidade Federal da Grande Dourados, UFGD, Dourados – MS, leandrowerle@gmail.com

INTRODUÇÃO

A abóbora (*Cucurbita sp.*) pertence ao grupo vegetal Cucurbitaceae que corresponde a 120 gêneros diferentes, contendo cerca de 800 espécies no mundo (ROJAS; SILVEIRA; AUGUSTO, 2020). São comumente encontradas em regiões tropicais e, no Brasil, há o cultivo de cerca de 30 gêneros e 200 espécies (RESENDE; BORGES; GONÇALVES, 2013), apresentando uma produção de cerca de 273.451 toneladas no ano de 2017, conforme o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Ainda, a abóbora apresenta grande importância nutricional devido seu alto teor de fibras, minerais, carotenoides e compostos fenólicos que auxiliam e melhoram o funcionamento do sistema gástrico, intestinal e imunológico, prevenindo de doenças degenerativas e cardiovasculares (KULCZYŃSKI; GRAMZA-MICHAŁOWSKA, 2019; ONWUDE et al., 2016).

Dentre as espécies encontradas no Brasil, a abóbora menina brasileira (*Cucurbita moschata*) é uma das cultivares mais consumidas no país, sendo identificada pela sua casca verde e rígida, polpa amarela-esverdeada e poucas sementes em seu interior. Diversos estudos demonstram a incorporação deste fruto no desenvolvimento de alimentos funcionais, tais como doces (MUZZAFFAR et al., 2016), pães (RAKCEJEVA et al., 2011), biscoitos (MUSTIKA; KARTIKA, 2020) e sucos (ALJAHANI; CHEIKHOUSMAN, 2017). No entanto, abóboras *in natura* apresentam grande susceptibilidade a degradação, ocasionado pelo seu alto conteúdo de água e, conseqüentemente, maior atividade metabólica e microbiológica, modificando as características físico-químicas e elevando os índices de deterioração do fruto.

Desta forma, é imprescindível a aplicação de métodos de conservação que reduzam o teor de umidade das abóboras e, concomitantemente, promova menores gastos energéticos, evite o desperdício desnecessário e prolongue o *shelf-life* dos alimentos *in natura* (SANTOS et al., 2019). Convencionalmente, os métodos de conservação de alimentos de baixo custo envolvem a aplicação de conservantes, aditivos e, principalmente, pela exposição do material a uma fonte de calor, denominado de processamento por secagem (GODOI et al., 2020).

A secagem de um material sólido úmido é um processo complexo no qual envolve simultaneamente a transferência de massa e calor, sendo avaliado de acordo com as alterações do teor de umidade à exposição de uma fonte aquecida durante um período de tempo (MENEZES et al., 2013). O estudo do processo de secagem ocorre devido a análise de diversos parâmetros que afetam o tempo de redução do conteúdo de umidade de um material, tais como temperatura, velocidade do vento de circulação, umidade relativa e área do material úmido, os quais, são de extrema importância para a elaboração de projetos de simulação de um sistema de secagem e/ou dimensionamento de secadores (SILVA et al., 2014).

Diversos estudos são desenvolvidos na área de secagem de produtos agrícolas, focando na modelagem matemática do processo, já que a utilização de modelos empíricos e semiempíricos favorece o estabelecimento de condições e parâmetros ideais para cada tipo de alimento (SOUZA et al., 2020). Melhores condições de processos estão associadas a produtos alimentícios desidratados com melhores qualidades sensoriais, como textura, odor, sabor e cor, as quais podem ser fatores determinantes no momento da compra e consumo de produtos secos (ONWUDE et al., 2016). Ainda, definindo

melhores condições do processo de secagem, há a redução de custos energéticos e menores desgastes de equipamentos durante o processamento (SANTOS et al., 2019).

Portanto, o objetivo deste trabalho foi realizar a desidratação de fatias da abóbora menina brasileira utilizando secador de bandejas em temperaturas diferentes (50, 60, 70 e 80 °C), avaliar a cinética de secagem por meio de modelos matemáticos empíricos e semiempíricos e, por fim, avaliar os efeitos das temperaturas de secagem das fatias de abóbora menina brasileira sobre o coeficiente de difusividade e dos parâmetros termodinâmicos, tais como a energia de ativação, entalpia, entropia e energia livre de Gibbs.

MATERIAL E MÉTODOS

MATERIAL

A abóbora menina brasileira, adquirida no comércio local da cidade de Dourados – Brasil, foram selecionadas conforme seu tamanho e integridade. Os frutos foram direcionados ao Laboratório de Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), sendo higienizados em água corrente, retirando quaisquer impurezas presentes em sua superfície. O teor de umidade inicial das amostras foi determinado em estufa de convecção de ar forçada a 105°C por 24 h (AOAC, 2006), apresentando valores médios de 90,55% (massa em base úmida).

OBTENÇÃO DAS CURVAS DE SECAGEM

Com o auxílio de uma faca de inox, as abóboras foram descascadas e cortadas em fatias de espessura de 5 ± 1 mm, medidas por meio de paquímetro digital (MTX, Brasil). Posteriormente, as amostras foram dispostas em vidro relógio e pesadas em balança digital (OHAUS, Brasil), determinando a umidade inicial. Foi utilizado um secador convectivo de bandejas com fluxo vertical para realizar a desidratação das fatias da polpa da AMB, ajustando-o em temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C.

A determinação da curva de secagem foi realizada por meio de pesagens consecutivas das amostras, analisando o teor de água removido, onde, nas duas primeiras horas de secagem as amostras foram pesadas em intervalos de 15 min, terceira e quarta hora a cada 30 minutos e as demais, a cada 1 h até a obtenção de peso constante ($\pm 0,001$ g), atingindo o teor de umidade em equilíbrio (X_e). Por fim, foi obtido o peso final da amostra seca após a permanência da amostra por 24 h dentro do secador. Todo o experimento de secagem foi conduzido em triplicata.

A razão de umidade (RU) das fatias da AMB em todas as temperaturas avaliadas foi definida conforme a Eq. 1. Onde RU, X_e e X_0 representam, respectivamente, o teor de umidade do produto, 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 ($g_{H_2O} g_{ss}^{-1}$).

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

MODELAGEM MATEMÁTICA

Modelos de secagem em camada fina foram ajustados aos dados experimentais para identificar uma equação que descreva e prevê o comportamento da secagem das fatias da

AMB. Os modelos matemáticos de caracteres empíricos, semiempíricos e teóricos utilizados no ajuste dos dados experimentais da secagem da AMB foram escolhidos por

serem frequentemente utilizados na representação da cinética de secagem de produtos agrícolas, sendo demonstrados na Tabela 1 pelas Eqs. 2–7

Tabela 1 - Modelos matemáticos de cinética de secagem de produtos agrícolas

Nome do Modelo	Modelo	Referência	Eq.
Aproximação da difusão	$RU = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	Mahjoorian et al. (2017)	(2)
Cavalcanti-Mata	$RU = a_1 \exp(-k_1t)^{a_2} + a_3 \exp(-k_1t)^{a_4} + a_5$	Lisboa et al. (2019)	(3)
Henderson e Pabis modificado	$RU = a \exp(-kt) + b \exp(-k_0t) + c \exp(-k_1t)$	Phitakwinai; Thepa; Nilnont (2019)	(4)
Midilli	$RU = a \exp(-kt^n) + bt$	Menezes et al. (2013)	(5)
Valcam	$RU = a + bt + ct^{1.5} + dt^2$	Silva et al. (2017)	(6)
Wang-Singh	$RU = 1 + at + bt^2$	Menezes et al. (2013)	(7)

RU - Razão da umidade (adimensional). t - Tempo de secagem (min). k, k₀, k₁ - Constantes de secagem (min⁻¹). a, a₁, a₂, a₃, a₄, a₅, b, c, n - Coeficientes utilizados nos modelos.

Para a determinação do modelo que melhor representa os dados experimentais da cinética de secagem utilizou-se o coeficiente de determinação (R²), raiz quadrada do erro médio (RMSE) e o erro médio absoluto percentual (MAPE), sendo os dois últimos demonstrados nas Eqs. 8 e 9, respectivamente. Onde Y_t, F_t e n são valores preditos pelo modelo matemático, valores experimentais e número de observações experimentais, respectivamente.

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Y_t - F_t)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{Y_t - F_t}{Y_t} \right| \quad (9)$$

COEFICIENTE DE DIFUSIVIDADE E PARÂMETROS TERMODINÂMICOS

A difusividade efetiva (D_{ef}) da água do interior das amostras foi determinado a partir da Segunda Lei de Fick (Eq. 10), 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).

$$RU = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{ef} t}{4L^2}\right) \quad (10)$$

Onde D_{ef} é dado em m² s⁻¹, t é o tempo de secagem (s) e L representa a espessura (m) da amostra.

De acordo com Menezes et al. (2013) longos períodos de secagem, a Eq. 10 pode ser simplificada apenas ao primeiro termo, não alterando os resultados da determinação do coeficiente difusivo, conforme mostrado na Eq. 11.

$$RU = \frac{8}{\pi^2} e^{-D_{ef} \left(\frac{\pi}{2L}\right)^2 t} \quad (11)$$

A relação da difusividade com a temperatura pode ser determinada pela energia de ativação baseando-se na equação de Arrhenius descrita na Eq. (12). Em que D₀ é o fator de Arrhenius (m² s⁻¹), E_a energia de ativação (kJ mol⁻¹), R constante dos gases (8,314 kJ mol⁻¹ K⁻¹) e T se refere a temperatura absoluta (K).

$$D_{ef} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (12)$$

As propriedades termodinâmicas associadas ao processo de secagem das fatias de AMB foram determinadas conforme metodologia proposta por Lisboa et al. (2019) e demonstrada nas Eqs. 13, 14 e 15.

$$\Delta H = E_a - RT \quad (13)$$

$$\Delta S = R \left[\ln(D_0) - \ln\left(\frac{k_b}{h_p}\right) - \ln(T) \right] \quad (14)$$

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S \quad (15)$$

Onde ΔH, ΔS, k_b, h_p, ΔG referem-se a entalpia (kJ mol⁻¹), entropia (kJ mol⁻¹ K⁻¹), constante de Boltzmann (1,38x10⁻²³ J K⁻¹), constante de Planck (6,626x10⁻³⁴ J s⁻¹) e energia livre de Gibbs (kJ mol⁻¹).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

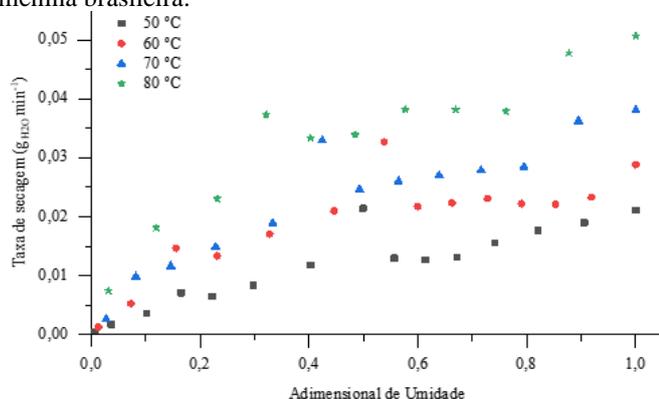
Plotando os dados referentes a RU e o tempo de processo, foi possível determinar as curvas de cinética de secagem das fatias de AMB nas diferentes temperaturas avaliadas. Foi observado que o tempo de secagem reduziu com o aumento da temperatura de processamento, onde, nas temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C o tempo para realizar a desidratação ocorreu durante 360, 300, 240 e 180 min, respectivamente. O mesmo comportamento é relatado em diversos estudos relacionados a secagem por convecção de ar de diversos produtos agrícolas (LISBOA et al., 2019; MAHJOORIAN et al., 2017; PHITAKWINAI; THEPA; NILNONT, 2019; SILVA et al., 2014). A elevação da temperatura modifica as estruturas internas do produto, permitindo maior permeação e evaporação da água do interior de materiais alimentícios (SANTOS et al., 2019).

A partir da Figura 1 observa-se que não é possível obter um período inicial de condicionamento ou um período de taxa constante, sendo o processo de secagem das fatias de AMB ocorrendo totalmente em fase decrescente até obter o teor de umidade de equilíbrio.

De acordo com Menezes et al. (2013), esse comportamento é decorrente de materiais que apresentam mecanismo físico predominante de difusão molecular interna, onde a exposição a altas temperaturas promove a retirada constante de umidade. Além disso, avaliando a taxa de

secagem em relação ao adimensional de umidade nas temperaturas de secagem estudadas, foi possível observar que maiores temperaturas promovem maiores taxas de secagem e, assim, reduz o tempo de secagem das amostras.

Figura 1. Taxa de secagem das fatias da polpa da abóbora menina brasileira.



Na Tabela 2 são demonstrados os valores dos parâmetros estatísticos R^2 , RMSE e MAPE utilizados para definir o modelo matemático que melhor se ajuste e prediz a cinética de secagem da AMB em diferentes temperaturas.

Tabela 2 - Parâmetros dos modelos ajustados à cinética de secagem da abóbora menina brasileira.

Nome do modelo	Parâmetros	Temperatura (°C)			
		50	60	70	80
Aproximação da difusão	R^2	0,9997	0,9926	0,9946	0,9913
	MAPE	32,8738	32,1788	17,9460	22,5529
	RMSE	0,0182	0,0268	0,0223	0,0275
Cavalcanti-Mata	R^2	0,9992	0,9995	0,9996	0,9998
	MAPE	5,0334	3,1352	3,2425	1,6892
	RMSE	0,0090	0,0068	0,0061	0,0038
Henderson e Pabis modificado	R^2	0,9986	0,9986	0,9991	0,9994
	MAPE	9,8207	10,5644	2,8868	3,2973
	RMSE	0,0116	0,0116	0,0088	0,0073
Midilli	R^2	0,9980	0,9980	0,9988	0,9984
	MAPE	15,1410	11,4260	4,6530	4,6951
	RMSE	0,0139	0,0140	0,0107	0,0086
Valcam	R^2	0,9987	0,9990	0,9990	0,9990
	MAPE	9,2798	4,6998	2,1859	2,8159
	RMSE	0,0111	0,0102	0,0082	0,0069
Wang e Singh	R^2	0,9985	0,9962	0,9992	0,9991
	MAPE	16,3866	21,2092	2,1152	2,8159
	RMSE	0,0120	0,0192	0,0085	0,0069

R^2 : Coeficiente de determinação. MAPE: Erro médio absoluto percentual (%). RMSE: Raiz quadrada do erro médio.

Diante disto, dentre os modelos matemáticos propostos para ajuste aos dados experimentais, apenas o de Cavalcanti-Mata e Valcam apresentaram valores de MAPE inferiores a 10% em todas as temperaturas de secagem avaliadas, indicando que estes modelos podem ser considerados preditivos e precisos ao representar a cinética de desidratação das fatias de AMB.

Resultados semelhantes foram obtidos ao ajustar dados da cinética de secagem de folhas de Bauhinia ao modelo de Valcam (SILVA et al., 2017) no qual, valores de MAPE de cerca de 6,78% foram obtidos, sendo escolhido para representar o fenômeno de secagem devido a sua forma simplificada e menores números de coeficientes, sendo

Ajustando os dados experimentais da cinética de secagem de fatias da polpa da AMB a modelos matemáticos foi possível observar que os valores de R^2 foram superiores a 0,9913, indicando bom ajuste, visto que quanto mais próximo de 1, melhor é o ajuste dos valores experimentais aos modelos matemáticos.

Além disso, os valores de RMSE foram inferiores a 0,0275 nas temperaturas de secagem avaliadas, mostrando um ajuste adequado de todos os modelos avaliados. O RMSE é uma medida estatística padrão, a qual pode ser utilizada para definir o modelo de simulação mais preciso onde, valores mais próximos de zero indicam maior precisão do ajuste ao modelo proposto (SILVA et al., 2014). Comportamento similar foi observado na avaliação da secagem de feijão (LISBOA et al., 2019), grãos de guandu (SILVA et al., 2014) e polpa de caqui (PÊ et al., 2016).

No entanto, apenas o coeficiente de determinação e o RMSE pode não constituir um bom critério para a seleção de modelos não lineares e, por isso, foi avaliado os valores preditos dos modelos por meio da análise estatística de MAPE. De acordo com Silva et al. (2017), o ajuste dos dados experimentais a modelos matemáticos é considerado preditivos quando os valores de MAPE apresentam-se inferiores a 10%.

facilmente empregado na representação de secagem de produtos agrícolas.

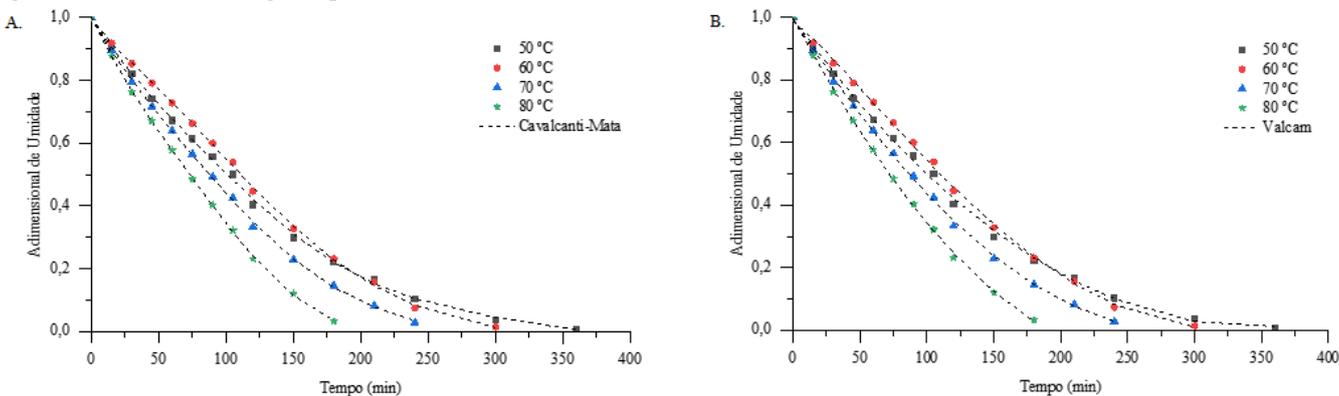
Na Figura 2A e 2B estão representadas as curvas de secagem das fatias da polpa da AMB em diferentes temperaturas, relacionando a forma adimensional de água (razão do teor de água) em função do tempo de secagem ajustando-as aos modelos de Cavalcanti-Mata e Valcam, respectivamente. É possível observar que, pela correspondência dos valores experimentais e dos preditos pelos modelos, há o melhor ajuste e representação do processo de desidratação.

A determinação de modelos que represente a cinética de secagem de materiais agrícolas é de grande importância devido a redução da exposição de alimentos a altas temperaturas,

menor gasto de processamento, gerando produtos desidratados com melhores qualidades sensoriais e menores perdas de

componentes nutricionais dos alimentos (SANTOS et al., 2019).

Figura 2. Cinética de secagem aplicadas aos modelos de Cavalcanti-Mata (A) e Valcam (B).



Como mencionado anteriormente, o comportamento das curvas de taxa de secagem das fatias da ABM ocorre pela difusão interna entre os poros capilares, possibilitando a determinação da constante de secagem e da difusividade efetiva por meio da Segunda Lei de Fick. Portanto, as constantes de secagem (k), os coeficientes de difusividade efetiva (D_{ef}) e os parâmetros termodinâmicos obtidas em cada temperatura avaliada neste estudo podem ser observadas na Tabela 3.

Como esperado, observou-se que os valores de k aumentaram com a elevação da temperatura de secagem das amostras. De acordo com SILVA et al. (2015), maiores temperaturas promovem a modificação da viscosidade dos líquidos presentes no interior de produtos agrícolas, favorecendo a movimentação dos fluidos, alterando a difusão da água nos capilares estruturais de vegetais.

Diversos estudos mostram que a D_{ef} de produtos agrícolas variam entre 10^{-9} a $10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (LISBOA et al., 2019; ONWUDE et al., 2016; SILVA et al., 2015), estando os parâmetros de difusividade obtidos nas temperaturas avaliadas

dentro dos padrões estabelecidos. Ao secar fatias de abóbora da variedade *C. moschata* estudos mostram que os valores de D_{ef} pode variar entre $3,12 \times 10^{-8}$ a $3,040 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (CALISKAN; DIRIM, 2017; GUINÉ; HENRRIQUES; BARROCA, 2012), similares aos encontrados neste estudo.

Relacionando os dados do coeficiente de difusividade e da temperatura de secagem, foi possível determinar a E_a do processo por meio da equação de Arrhenius. Em processos de secagem, a E_a é considerada como um parâmetro a ser atravessado para que o processo de secagem e difusão de matéria úmidos pode ocorrer e, portanto, quanto menor o seu valor, mais rápido se torna o processo de remoção de água interna do produto (SILVA et al., 2015).

De acordo com Potosí-Calvache, Vanegas-Mahecha e Correa (2017), os valores de E_a pode variar de acordo com a variedade da amostra e, também, das condições climáticas do local onde a cultivar foi obtida. Além disso, parâmetros como velocidade do ar de secagem, temperatura e umidade relativa, podem afetar e modificar os valores da E_a (LISBOA et al., 2019).

Tabela 3 – Constante de secagem (k), difusividade efetiva (D_{ef}) e parâmetros termodinâmicos do processo de secagem de fatias de abóbora menina brasileira

T (°C)	k (min^{-1})	D_{ef} ($10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)	E_a (kJ mol^{-1})	R^2	ΔH (kJ mol^{-1})	ΔS ($\text{kJ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	ΔG (kJ mol^{-1})
50	0,0080	1,3526			8,2238	-0,3818	131,6081
60	0,0087	1,4607	10,9105	0,9279	8,1407	-0,3821	135,4275
70	0,0094	1,5874			8,0575	-0,3823	139,2495
80	0,0115	1,9352			7,9744	-0,3826	143,0738

T - Temperatura. k – Constante de secagem. D_{ef} - Difusividade efetiva. E_a – Energia de ativação. R^2 - Coeficiente de determinação. ΔH - Entalpia. ΔS - Entropia. ΔG – Energia livre de Gibbs.

A partir da determinação da E_a foi possível determinar os parâmetros termodinâmicos de entalpia, entropia e energia livre de Gibbs, como demonstrado na Tabela 3. O aumento da temperatura resultou em valores positivos e menores de ΔH , indicando que uma menor energia foi requerida para remover a umidade da amostra e que o processo ocorre de forma endotérmica (SILVA et al., 2017).

Em relação aos ΔS , de acordo com Araujo et al. (2017) os valores negativos indicam menores liberdades estruturais para o estado de transição adsorvente, ou seja, devido as modificações estruturais provocadas pelo processo de secagem, como o encolhimento e rompimento das fibras, a água do interior do material se torna mais excitada, permeando

com mais facilidade, reduzindo o seu teor com o aumento da temperatura de processo.

Os valores de ΔG são dependentes de ΔH e ΔS do sistema, sendo assim, influenciado pela temperatura do processo de secagem. De acordo com Lisboa et al. (2019) valores positivos de energia livre de Gibbs ocorre quando o sistema apresenta reação endergônica, ou seja, quando o sistema necessita que uma energia seja adicionada para que a reação ocorra. Esse comportamento é bastante semelhante aos processos de secagem, já que desidratação de materiais agrícolas ocorrem sob desorção, não apresentando características espontâneas (ARAUJO et al., 2017; SILVA et al., 2017).

CONCLUSÕES

1. A partir do estudo da cinética de secagem de fatias da abóbora menina brasileira foi possível determinar que o tempo ideal de secagem foram de 360, 300, 240 e 180 min nas temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C.

2. O aumento da temperatura de secagem promove maiores taxas de secagem, reduzindo o tempo de processo.

3. Dentre os 6 modelos avaliados, apenas os modelos de Cavalcanti-Mata e Valcam apresentaram valores de R² superior a 0,9987 e menores valores de RMSE e MAPE.

4. Os modelos Cavalcanti-Mata e Valcam foram considerados preditivos e precisos na representação da cinética de desidratação das fatias de abóbora menina brasileira.

5. O aumento da temperatura aumentou o coeficiente de difusividade das amostras de $1,3526 \times 10^{-9}$ para $1,9352 \times 10^{-9}$.

6. A entalpia e entropia apresentaram valores negativos e positivos, respectivamente, aumentando a energia livre de Gibbs.

REFERÊNCIAS

- ALJAHANI, A.; CHEIKHOUSMAN, R. Nutritional and sensory evaluation of pumpkin-based (*Cucurbita maxima*) functional juice. *Nutrition and Food Science*, v. 47, n. 3, p. 346–356, 2017.
- ARAUJO, W. D.; GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; FILHO, C. P. H.; MARTINS, E. A. S. Modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada. *Revista Ciencia Agronomica*, v. 48, n. 3, p. 448–457, 2017.
- CALISKAN, G.; DIRIM, S. N. Drying characteristics of pumpkin (*Cucurbita moschata*) slices in convective and freeze dryer. *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, v. 53, n. 6, p. 2129–2141, 2017.
- CRANK, J. *The mathematics of diffusion*. 2. ed. Oxford: University Press, 1975.
- GODOI, A. S.; SANTOS, B. M. M.; HOLSBACH, F. M. S.; SILVA, W. C.; LIMA, T. De; WERLE, L. O.; GALANTE, R. M. Determinação Da Cinética De Secagem De Kiwi Amarelo (*Actinidia Chinensis*) E Kiwi Verde (*Actinidia Deliciosa*). *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 7, p. 51941–51950, 2020.
- GUINÉ, R. P. F.; HENRIQUES, F.; BARROCA, M. J. Mass Transfer Coefficients for the Drying of Pumpkin (*Cucurbita moschata*) and Dried Product Quality. *Food and Bioprocess Technology*, v. 5, n. 1, p. 176–183, 2012
- KULCZYŃSKI, B.; GRAMZA-MICHAŁOWSKA, A. The Profile of Carotenoids and Other Bioactive Molecules in Various Pumpkin Fruits (*Cucurbita maxima* Duchesne) Cultivars. *Molecules*, v. 24, n. 18, p. 3212, 2019.
- LISBOA, H. M.; ARAUJO, H.; PAIVA, G.; ORIENTE, S.; PASQUALI, M.; DUARTE, M. E.; MATA, M. E. R. M. C. Determination of characteristic properties of mulatto beans (*Phaseolus vulgaris* L.) during convective drying. *Journal of Agriculture and Food Research*, v. 1, n. November, p. 100003, 2019.
- MENEZES, M. L.; STRÖHER, A. P.; CURVELO PEREIRA, N.; TERESA DAVANTEL DE BARROS, S. Análise da cinética e ajustes de modelos matemáticos aos dados de secagem do bagaço do maracujá-amarelo. *Engevista*, v. 15, n. 2, p. 176, 2013.
- MAHJOORIAN, A.; MOKHTARIAN, M.; FAYYAZ, N.; RAHMATI, F.; SAYYADI, S.; ARIANI, P. Modeling of drying kiwi slices and its sensory evaluation. *Food Science and Nutrition*, v. 5, n. 3, p. 466–473, 2017.
- MUSTIKA, A. R.; KARTIKA, W. D. Formulation of yellow pumpkin cookies with mocaf (modified cassava flour) flour addition as a snack for the obese community. *Food Research*, v. 4, n. S3, p. 109–113, 2020.
- MUZZAFFAR, S.; BABA, W. N.; NAZIR, N.; MASOODI, F. A.; BHAT, M. M.; BAZAZ, R. Effect of storage on physicochemical, microbial and antioxidant properties of pumpkin (*Cucurbita moschata*) candy. *Cogent Food & Agriculture*, v. 2, n. 1, 2016.
- ONWUDE, D. I.; HASHIM, N.; JANIUS, R. B.; NAWI, N.; ABDAN, K. Modelling effective moisture diffusivity of pumpkin (*Cucurbita moschata*) slices under convective hot air drying condition. *International Journal of Food Engineering*, v. 12, n. 5, p. 481–489, 2016.
- PÊ, P. R.; CARNEIRO, G. G.; PÊ, F. R.; CASTRO, D. S.; SILVA, D. R. S.; MARQUES, L. F. Secagem de polpa de caqui pelo método de camada de espuma. *HOLOS*, v. 4, p. 77, 2016.
- PHITAKWINAI, S.; THEPA, S.; NILNONT, W. Thin-layer drying of parchment Arabica coffee by controlling temperature and relative humidity. *Food Science & Nutrition*, v. 7, n. 9, p. 2921–2931, 2019.
- POTOSÍ-CALVACHE, D. C.; VANEGAS-MAHECHA, P.; MARTINEZ CORREA, H. A. Convective drying of squash (*Cucurbita moschata*): Influence of temperature and air velocity on effective moisture diffusivity, carotenoid content and total phenols. *DYNA*, v. 84, n. 202, p. 112–119, 2017.
- RAKCEJEVA, T.; GALOBURDA, R.; CUDE, L.; STRAUTNIECE, E. Use of dried pumpkins in wheat bread production. *Procedia Food Science*, v. 1, n. Icef 11, p. 441–447, 2011.
- RESENDE, G. M.; BORGES, R. M. E.; GONÇALVES, N. P. S. Produtividade da cultura da abóbora em diferentes densidades de plantio no Vale do São Francisco. *Horticultura Brasileira*, v. 31, n. 3, p. 504–508, 2013.
- ROJAS, M. L.; SILVEIRA, I.; AUGUSTO, P. E. D. Ultrasound and ethanol pre-treatments to improve convective drying: Drying, rehydration and carotenoid content of pumpkin. *Food and Bioprocess Technology*, v. 119, p. 20–30, 2020.
- SANTOS, L. G. Dos; FERNANDES, A. dos S.; DORIGON, M. F. B.; SANTOS, M. A. D.; GALANTE, R. M.; WERLE, L. O. Comparação da cinética de secagem de maçã argentina (*Malus domestica* ‘RED DELICIOUS’) e maçã verde (*Malus*

domestic A 'GRANNY SMITH'). (eds.). Ponta Grossa: Atena Editora, 2019. cap. 21, p. 178–187.

SILVA, F. P.; SIQUEIRA, V. C.; MARTINS, E. A. S.; MIRANDA, F. M. N.; MELO, R. M. Thermodynamic properties and drying kinetics of *Bauhinia forficata* Link leaves. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 21, n. 1, p. 61–67, 2017.

SILVA, L. A.; RESENDE, O.; VIRGOLINO, Z. Z.; BESSA, J. F. V.; MORAIS, W. A.; VIDAL, V. M. Cinética de secagem e difusividade efetiva em folhas de jenipapo (*Genipa americana* L.). *Revista Brasileira de Plantas Mediciniais*, v. 17, n. 4, p. 953–963, 2015.

SILVA, L. M. de M.; SOUSA, F. C.; SOUSA, E. P. De; CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; DUARTE, M. E. M. Modelos de predição da cinética de secagem dos grãos de guandu. *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 17, n. 4, p. 310–318, 2014.

SOUZA, P. D.; DURANTE, T. P. Y.; GALANTE, R. M.; WERLE, L. O. Cinética De Secagem De Pera Argentina (*Pyrus Communis* L.) E Pera Willians (*Pyrus Communis* 'Williams'). *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 7, p. 51931–51940, 2020.