

MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE SECAGEM DE SEMENTES DE GERGELIM EM CAMADA DELGADA

MUFUME, D. R. S.^{1*}; MABASSO, G. A.¹; MAZUNGA, J. F.¹; COVANE, Y. I. A. L. E.¹;
ZAVALA, E. H.¹

¹Faculdade de Engenharia Ambiental e dos Recursos Naturais (FEARN), Universidade Zambeze, Bairro 7 de Abril, Estrada Regional 523 - km 5, Cidade de Chimoio - Manica, Moçambique. *Autor para correspondência. E-mail: readomd@gmail.com

RESUMO

Gergelim é uma importante fonte de óleo alimentar de alta estabilidade e resistente a oxidação. Os seus frutos quando atingem a maturação fisiológica facilmente sofrem deiscência, acarretando perdas qualitativas e quantitativas, sendo assim importante antecipar a colheita. Através do presente trabalho objetivou-se selecionar os modelos matemáticos que melhor se ajustam a cinética de secagem de sementes de gergelim em camada delgada. As sementes colhidas com o teor de água de $27.09 \pm 0.64\%$ em base úmida (b.u.) foram submetidas a secagem em uma estufa de ventilação forçada, nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C e umidade relativa de 24.26, 15.85, 10.02 e 5.32% respetivamente. A secagem foi realizada por meio de três bandejas com base totalmente perfurada, contendo cada 25 g de sementes até atingir o teor de água de $4.11 \pm 0.12\%$. Os modelos matemáticos foram analisados por meio da regressão não-linear, pelo método de Gauss Newton e complementados pelo Critério de Informação de Akaike e Critério de Informação Bayesiano (AIC e BIC). Concluiu-se que, a taxa de redução de água aumentou com a elevação da temperatura do ar de secagem e reduziu com o aumento do tempo de secagem; o modelo Dois termos apresentou melhor ajuste na temperatura de 40 °C e o modelo Aproximação da difusão ajustou-se melhor nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C; o coeficiente de difusão efetivo variou de 1.94×10^{-11} à $4.15 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para as temperaturas de 40 à 70 °C e a energia de ativação foi de $23.26 \text{ kJ mol}^{-1}$.

Palavras-chave: *Sesamum indicum* L.; AIC e BIC; coeficiente de difusão efetivo; energia de ativação.

ABSTRACT

Sesame is an important source of food oil with high stability and resistance to oxidation. Its fruits when they reach physiological maturity easily undergo dehiscence, causing qualitative and quantitative losses, so it is important to anticipate the harvest and drying the seeds to minimize losses. The aim of the present study was to select the mathematical models that best fit the drying kinetics of thin layer sesame seeds. The seeds harvested with a moisture content of $27.09 \pm 0.64\%$ (wet basis, wb) were dried in a forced ventilation oven at temperatures of 40, 50, 60 and 70 °C and relative humidity of 24.26, 15.85, 10.02 and 5.32% respectively. Drying was carried out using three trays with a fully perforated base, each containing 25 g of seeds until reaching a final moisture content of $4.11 \pm 0.12\%$ (wb). Model selection was based on the Gauss-Newton non-linear regression method and was complemented by Akaike Information Criterion and Schwarz's Bayesian Information Criterion (AIC and BIC). It was concluded that the water reduction rate increased with the increase in drying air temperature and reduced with

the increase in drying time; the Two terms model presented the best fit at the temperature of 40 °C, while the Diffusion approximation model had the best fit at the temperatures of 50, 60 and 70 °C; the magnitude of effective diffusion coefficient ranged from 1.94×10^{-11} to 4.15×10^{-11} m² s⁻¹ for temperatures from 40 to 70 °C and the activation energy was 23.26 kJ mol⁻¹.

Keywords: *Sesamum indicum* L.; AIC and BIC; effective diffusion coefficient; activation energy.

INTRODUÇÃO

Sesamum indicum L. é uma espécie pertencente à família *Pedaliaceae*, uma das oleaginosas mais antigas cultivadas e usadas pelo homem, sendo uma importante fonte de óleo utilizada na cozinha, cosméticos, tinta e lubrificantes (Amoo *et al.*, 2017). Após a maturação fisiológica, ocorre o processo de deiscência dos seus frutos e a consequente queda das sementes, iniciando-se assim a sua deterioração. A colheita antecipada é uma alternativa para minimizar as perdas decorrente da abertura dos frutos e preservação da qualidade durante o armazenamento, desde que o produto seja submetido a secagem de forma adequada (Oyekale *et al.*, 2012).

A secagem é um processo simultâneo de transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem (Brooker *et al.*, 1992). É uma etapa importante na produção de sementes, é responsável por reduzir a atividade da água, preservar a qualidade durante o período de armazenamento (Silva, 2019). Um dos aspetos mais importantes na operação e tecnologia de secagem, especialmente para processos industriais, é a modelagem dos processos de secagem (Khazaei; Mohammadi, 2009). Os modelos matemáticos permitem realizar previsões precisas da temperatura e teor de água das sementes durante a secagem, informações necessárias para selecionar a melhor configuração do secador e as condições de operação mais adequadas e tempo de secagem com vista a preservar a qualidade das sementes (Barrozo *et al.*, 2014).

A determinação da viabilidade, dimensionamento, otimização e aplicação comercial de sistemas de secagem, são feitas através da modelagem matemática, cujo princípio se fundamenta na secagem de sucessivas camadas delgadas do produto, fazendo uso de um modelo matemático que descreva satisfatoriamente a perda de água dos produtos agrícolas (Sousa *et al.*, 2011). O comportamento dos produtos agrícolas durante a secagem em camada delgada varia com a espécie, variedade, condições ambientais, operações pós-colheita, entre outros fatores (Costa *et al.*, 2011), neste contexto diversos estudos têm sido realizados com o intuito de simular o processo de secagem de diversos tipos de grãos e sementes (Resende *et al.*, 2009; Camicia *et al.*, 2015; Mabasso *et al.*, 2022).

Neste sentido, com o presente trabalho objetivou-se descrever o processo de secagem, por forma a selecionar os modelos matemáticos que melhor se ajustam a cinética de secagem de sementes de gergelim em camada delgada, bem como determinar a taxa de redução de água, o coeficiente de difusão efetivo e a energia mínima necessária para desencadear o processo de secagem de sementes de gergelim para diferentes temperaturas do ar de secagem.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no laboratório de processos pós-colheita, pertencente a Faculdade de Engenharia Ambiental e dos Recursos Naturais (FEARN) da Universidade Zambeze, cidade de Chimoio, província de Manica, Moçambique.

A colheita e debulha das sementes de gergelim foram realizadas manualmente, seguidas de limpeza, que consistiram na redução do teor de impurezas. O teor de água inicial das sementes de gergelim foi de $27.09 \pm 0.64\%$ (b.u.), determinado pelo método padrão de estufa, a uma temperatura de 105 ± 1 °C por um período de 24 h, em 3 (três) repetições de 5 g.

A secagem das sementes de gergelim foi realizada em estufa de ventilação forçada, da marca INDELAB, modelo IDL-EI-120, utilizando-se 3 (três) bandejas metálicas com 170 mm de diâmetro e fundo totalmente perfurado, contendo 25 g de produto distribuído uniformemente, nas temperaturas de 40; 50; 60 e 70 °C e 24.26; 15.85; 10.02 e 5.32% de umidade relativa do ar de secagem nas quatro condições de temperatura respectivamente.

A perda de água das sementes foi monitorada através de uma balança analítica da marca KERN com a precisão de 0.01 g. Para determinação do teor de água de equilíbrio, o processo de secagem foi realizado até a obtenção da massa constante, por forma a possibilitar o cálculo da razão de umidade do produto. A taxa de redução de água das sementes foi determinada com base na Eq. 1.

$$TRA = \frac{X_0 - X_i}{t_i - t_0} \quad (1)$$

Onde: TRA: taxa de redução de água ($\text{kg kg}^{-1} \text{h}^{-1}$); X_0 : teor de água anterior (b.s.); X_i : teor de água total atual (b.s.); t_0 : tempo total de secagem anterior (h); t_i : tempo total de secagem atual (h).

Para a determinação da razão de umidade das sementes de gergelim durante a secagem, nas diferentes condições de ar, foi utilizada a Eq. 2.

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} \quad (2)$$

Onde: RX: razão de umidade (adimensional); X_e : teor de água de equilíbrio (b.s.); X : teor de água (b.s.); X_i : teor de água inicial (b.s.).

Os dados experimentais de secagem foram ajustados aos modelos matemáticos comumente usados para representar a cinética de secagem de produtos agrícolas conforme ilustrado na Tabela 1 (Siqueira *et al.*, 2020).

Tabela 1. Modelos matemáticos utilizados para prever o processo de secagem de produtos agrícolas.

Modelo	Designação do modelo	Eq.
Page	$RX = \exp(-kt^n)$	(3)
Midilli	$RX = a \times \exp(-kt^n) + bt$	(4)
Newton	$RX = \exp(-kt)$	(5)
Thompson	$RX = \exp\left\{\frac{[-a - (a^2 + 4bt)^{0.5}]}{2b}\right\}$	(6)
Henderson & Pabis	$RX = a \times \exp(-kt)$	(7)
Logaritmo	$RX = a \times \exp(-kt) + c$	(8)
Exponencial de dois termos	$RX = a \times \exp(-kt) + (1-a) \times \exp(-kat)$	(9)
Dois Termos	$RX = a \times \exp(-kt) + b \times \exp(-gt)$	(10)
Aproximação da difusão	$RX = a \times \exp(-kt) + (1-a) \times \exp(-kbt)$	(11)
Valcam	$RX = a + bt + ct^{1.5} \times dt^2$	(12)

RX: razão de umidade (adimensional); t: tempo de secagem (h); k: constante de secagem (h^{-1}); a, b, c, d, g, n: coeficientes dos modelos (adimensionais).

Para realizar o ajuste dos modelos matemáticos, os dados experimentais do processo de secagem em camada delgada das sementes de gergelim, os mesmos foram submetidos a análise de regressão não linear, pelo método Gauss Newton, usando o *software* STATISTICA® versão 7.0. O grau de ajuste de cada modelo, para cada temperatura do ar de secagem foi aferido considerando as magnitudes do coeficiente de determinação (R^2), do erro médio relativo (P) e do erro médio estimado (SE) (Eqs.13 e 14).

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (13) \quad SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{GLM}} \quad (14)$$

Onde: Y: valor observado experimentalmente; \hat{Y} : valor estimado pelo modelo; n: número de observações experimentais; GLM: graus de liberdade do modelo, que correspondem a diferença entre o número de observações e o número de parâmetros do modelo.

Para complementar a seleção dos modelos que melhor se ajustam ao processo de secagem das sementes de gergelim, foi aplicado o Critério de Informação de Akaike e o Critério de Informação Bayesiano (AIC e BIC) por meio do *software* R® versão 3.6.1. Os critérios AIC e BIC são frequentemente utilizados com boa acurácia para selecionar os modelos que melhor se ajustam ao fenômeno em estudo, sendo escolhido como melhor aquele que apresentar maiores valores absolutos (Eqs. 15 e 16) (Siqueira *et al.*, 2020).

$$AIC = -2 \log L + 2p \quad (15) \quad BIC = -2 \log L + p \ln(N) \quad (16)$$

Onde: p: é o número de parâmetros do modelo; N: é o número total de observações; L: é a máxima verossimilhança, considerando as estimativas dos parâmetros.

O coeficiente de difusão efetivo das sementes de gergelim, para as diferentes condições de secagem, foi determinado por meio da Eq. 17, baseada na teoria da difusão líquida, representando uma solução analítica para a segunda lei de Fick, considerando a forma geométrica do produto como uma esfera e com aproximação de oito termos.

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n_t=1}^{\infty} \frac{1}{n_t^2} \exp \left[\frac{n_t^2 \pi^2 D_{ef} t}{9} \left(\frac{3}{r_e} \right)^2 \right] \quad (17)$$

Onde: D_{ef} : coeficiente de difusão efetivo ($m^2 s^{-1}$); r_e : raio de esfera equivalente (m); n_t : número de termos.

O raio equivalente utilizado no modelo foi obtido a partir da medição dos eixos ortogonais (maior, médio e menor) de cinquenta sementes de gergelim, selecionados de forma aleatória na massa de sementes submetidas a secagem. Os eixos ortogonais foram mensurados por meio de um paquímetro digital da marca DRAPER EXPERT, modelo PVC150D, com resolução de 0.01 mm. Em posse desses valores, determinou-se o volume unitário da semente considerando como um esferoide tri-axial por meio da Eq. 18, e posteriormente, o raio equivalente foi determinado pela Eq. 19 (Mohsenin, 1986).

$$V_s = \frac{\pi \times (a \times b \times c)}{6} \quad (18) \quad r_e = \sqrt[3]{\frac{3 \times V_s}{4\pi}} \quad (19)$$

Onde: V_s : volume unitário da semente (mm^3); r_e : raio equivalente (mm); a: eixo maior (mm); b: eixo médio (mm); c: eixo menor (mm).

Com vista a avaliar a influência da variação da temperatura no coeficiente de difusão efetivo, foi utilizada a equação de Arrhenius (Eq. 20).

$$D_{ef} = D_0 \exp\left(\frac{E_a}{R \times T_a}\right) \quad (20)$$

Onde: D_0 : fator pré-exponencial ($m^2 s^{-1}$); T_a : temperatura (K); R : constante universal dos gases ($8.314 \text{ kJ kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$); E_a : energia de ativação (kJ mol^{-1}).

A energia de ativação foi estimada a partir da equação logarítmica (Eq. 20), de onde foi obtida a reta (Eq. 21) que relaciona o $\text{Ln}(D_{ef})$ com o inverso da temperatura do ar de secagem.

$$\text{Ln}D_{ef} = \text{Ln}D_0 - \frac{E_a}{R} \times \frac{1}{T_a} \quad (21)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os tempos decorridos para reduzir o teor de água de 27.09 ± 0.64 para $4.11 \pm 0.12\%$ em base úmida foram de 9.17, 2.67, 1.5 e 1.5 h para as temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C respectivamente (Figura 1). A taxa de redução de água diminuiu com a redução da temperatura do ar de secagem e ao longo do tempo de secagem.

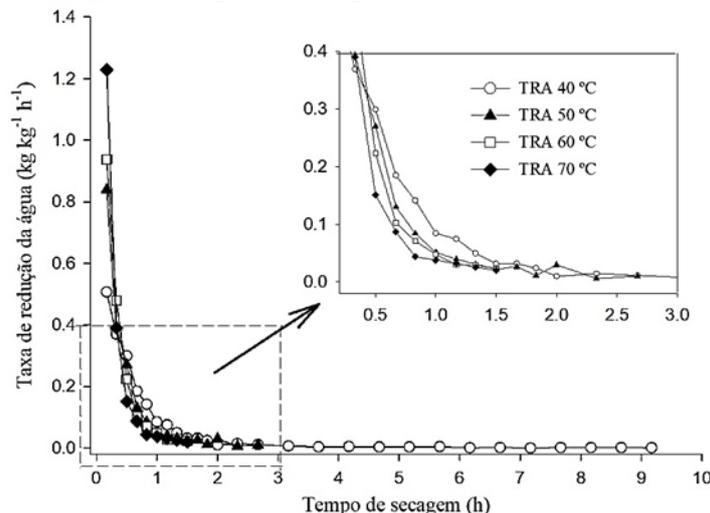


Figura 1. Taxa de redução de água das sementes de gergelim (*Sesamum indicum* L.) durante a secagem para diferentes temperaturas.

Observa-se igualmente que para maiores temperaturas do ar de secagem, a taxa de redução inicial foi igualmente maior, em virtude de uma maior disponibilidade de água livre e maior quantidade de energia para forçar a sua saída. Comportamentos similares têm sido observados em secagem de sementes de diversos produtos agrícolas (Almeida *et al.*, 2009; Faria *et al.*, 2012).

Na Tabela 2 são apresentados os valores dos parâmetros estatísticos analisados no ajuste dos dez (10) modelos, para as diferentes condições do ar de secagem.

Tabela 2. Coeficientes de determinação (R^2 , decimal), erros médios relativos (P, %), erros médios estimados (SE, decimal) para os dez (10) modelos analisados na secagem em camada fina de sementes de gergelim (*Sesamum indicum* L.) em diferentes condições de temperatura do ar de secagem.

Modelos	Temperatura											
	40 °C			50 °C			60 °C			70 °C		
	SE	P	R^2	SE	P	R^2	SE	P	R^2	SE	P	R^2

3	0.020	48.167	0.997	0.018	14.401	0.998	0.020	11.507	0.998	0.016	8.361	0.999
4	0.017	37.697	0.998	0.012	8.796	0.999	0.012	6.130	0.999	0.010	4.572	0.999
5	0.027	58.325	0.994	0.050	47.083	0.982	0.047	36.301	0.988	0.072	50.694	0.968
6	0.015	38.655	0.998	0.013	10.533	0.999	0.015	8.677	0.999	0.015	8.621	0.999
7	0.027	57.279	0.994	0.049	44.041	0.984	0.048	34.682	0.988	0.074	48.321	0.970
8	0.016	53.101	0.998	0.019	15.778	0.998	0.012	7.474	0.999	0.022	12.700	0.998
9	0.019	50.288	0.997	0.034	33.813	0.992	0.050	36.300	0.988	0.057	38.263	0.982
10	0.004	3.476	0.999	0.005	2.136	0.999	0.004	1.834	0.999	0.002	0.873	0.999
11	0.004	3.716	0.999	0.005	2.132	0.999	0.004	1.844	0.999	0.002	0.873	0.999
12	0.062	145.355	0.971	0.026	20.191	0.996	0.010	6.059	0.999	0.031	14.673	0.996

O erro médio relativo (P) é um parâmetro estatístico que indica o desvio dos valores observados em relação a curva estimada pelo modelo. Kashaninejad *et al.* (2007) recomendam a seleção de modelos com valores do erro médio relativo abaixo de 10%, acima deste os modelos são excluídos do ajuste. Os modelos de Dois termos (10) e Aproximação da difusão (11) se ajustaram de forma satisfatória para todas as temperaturas estudadas, com valores de P menores que 10% pelo critério. O modelo de Midilli (4) apresentou valores inferiores a 10% em todas as temperaturas do ar de secagem exceto na temperatura de 40 °C.

Os valores do erro médio estimado (SE) demonstram a precisão com que um modelo pode ser usado para descrever um determinado processo físico, quanto menor for o seu valor, melhor será a qualidade de ajuste do modelo em relação aos dados experimentais (Draper; Smith, 1998). Neste contexto, os modelos de Dois termos (10) e Aproximação da difusão (11) apresentaram os menores valores de SE em todas temperaturas do ar de secagem, ajustando-se melhor a representação do fenômeno de secagem de sementes de gergelim em camada delgada, assim como sucedeu na análise do parâmetro P.

Para todas as temperaturas utilizadas no processo de secagem de sementes de gergelim, pode-se verificar que todos os modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais do processo de secagem, apresentaram coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0.95, sendo considerado um bom ajuste para este parâmetro (Madamba *et al.*, 1996). Os modelos Aproximação da difusão (11), Dois termos (10), Page (3), Midilli (4) e Thompson (6) destacaram-se dos demais, com valores de R^2 acima de 0.99 para todas as temperaturas estudadas.

O coeficiente de determinação isoladamente não constitui um bom critério para a seleção de modelos não-lineares (Madamba *et al.*, 1996), sendo assim, este parâmetro deve ser analisado de forma conjunta com os valores dos erros médio relativo (P) e estimado (SE). Em uma análise conjunta, verifica-se que, somente os modelos Aproximação da difusão (11) e Dois termos (10) ajustam-se satisfatoriamente a secagem de sementes de gergelim em camada delgada para todas as temperaturas do ar de secagem.

Segundo Wolfinger (1993) os critérios AIC e BIC devido a sua rigorosidade, podem ajudar a complementar a seleção dos modelos pré-selecionados pelo critério Gauss Newton, quanto maiores os valores absolutos do AIC e BIC, melhor é o ajuste do modelo.

Pela Tabela 3 constata-se que o modelo Dois termos (10) teve os maiores valores absolutos de AIC e BIC na temperatura de 40 °C e o modelo Aproximação da difusão (11) apresentou maiores valores absolutos de AIC e BIC para as demais temperaturas, sendo então recomendados os modelos Dois termos (10) para temperatura de 40 °C Aproximação da difusão (11) para as temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

Tabela 3. Critério de Informação de Akaike e Critério de Informação Bayesiano de Schwarz's (AIC e BIC) para os modelos que melhor se ajustam aos dados de secagem de sementes de gergelim (*Sesamum indicum* L.) em diferentes condições de temperatura do ar.

Modelos	Temperatura							
	40 °C		50 °C		60 °C		70 °C	
	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC
11	-223.989	-217.328	-121.310	-117.770	-66.875	-65.362	-96.573	-95.060
12	-221.919	-216.590	-123.256	-120.424	-68.741	-67.531	-98.573	-97.362

Os modelos de Dois termos e Aproximação da difusão têm sido adotados na modelagem matemática de diferentes grãos e sementes de oleaginosas em diferentes faixas de temperaturas. Dentre os cultivos do mesmo grupo, destacam-se o processo de secagem de soja (*Glycine max* L. Merrill), nas temperaturas de 30, 40, 50, 60 e 70 °C (Rafiee *et al.*, 2009), cinética de secagem de sementes de *Ricinus communis*, nas temperaturas de 80, 90, 100 e 110 °C (Perea-Flores *et al.*, 2012) e descrição da cinética de secagem de grãos de amendoim (*Arachis hypogaea* L.) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C (Goneli *et al.*, 2017).

Na Figura 2 são apresentadas as curvas de cinética de secagem de sementes de gergelim (*Sesamum indicum* L.) para os modelos selecionados. Os modelos selecionados mostram um bom ajuste, descrevendo o processo de secagem de sementes de gergelim (*Sesamum indicum* L.) com boa acurácia, isto é, há uma boa correspondência entre os valores estimados e os observados.

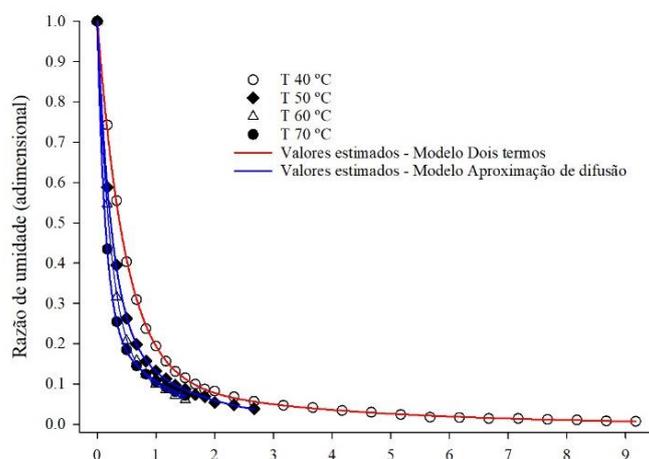


Figura 2. Valores de razão de umidade experimentais e estimados pelos modelos de Aproximação da difusão e Dois termos durante o processo de secagem das sementes de gergelim (*Sesamum indicum* L.) em camada delgada para diferentes condições de temperatura.

As curvas apresentam uma maior inclinação no início do processo, para todas as temperaturas do ar de secagem em ambos modelos, elucidando uma maior taxa de redução de água na fase inicial do processo de secagem.

Para o modelo de Aproximação da difusão (12) pode-se observar que a magnitude da constante de secagem “k”, aumenta com a elevação da temperatura do ar de secagem, o mesmo comportamento pode ser observado para o parâmetro “b”, enquanto que o parâmetro “a” apresentou um comportamento aleatório (Tabela 4). O parâmetro “k” pode ser utilizado como uma aproximação para descrever o efeito da temperatura e está relacionado à difusividade efetiva no processo de secagem no período decrescente (Madamba *et al.*, 1996).

Tabela 4. Coeficientes dos modelos de Dois termos e Aproximação da difusão obtidos para sementes de gergelim (*Sesamum indicum* L.) em diferentes condições de temperatura do ar de secagem.

Temperatura (°C)	Modelos matemáticos						
	Dois termos				Aproximação da difusão		
	a	k	b	G	a	k	b
40	0.8857*	2.1257*	0.1202*	0.3036*	-	-	-
50	-	-	-	-	0.2425*	0.7071*	5.8354*
60	-	-	-	-	0.1989*	0.7674*	6.1205*
70	-	-	-	-	0.2527*	0.8579*	8.6597*

*Efeito significativo em nível de 5% de probabilidade pelo teste t-student.

O valor do coeficiente de difusão efetivo aumentou com a elevação da temperatura do ar de secagem, com valores que variam de 1.94×10^{-11} à 4.15×10^{-11} $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ para a faixa de temperatura de 40 à 70 °C respectivamente (Figura 3-A). Khazaei e Daneshmandi (2007) estudando a cinética de secagem de sementes de gergelim em condições de circulação do ar por convecção natural e forçada, obtiveram uma variação de 1.1×10^{-11} $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ para a convecção natural e 3.1×10^{-11} $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ para convecção forçada.

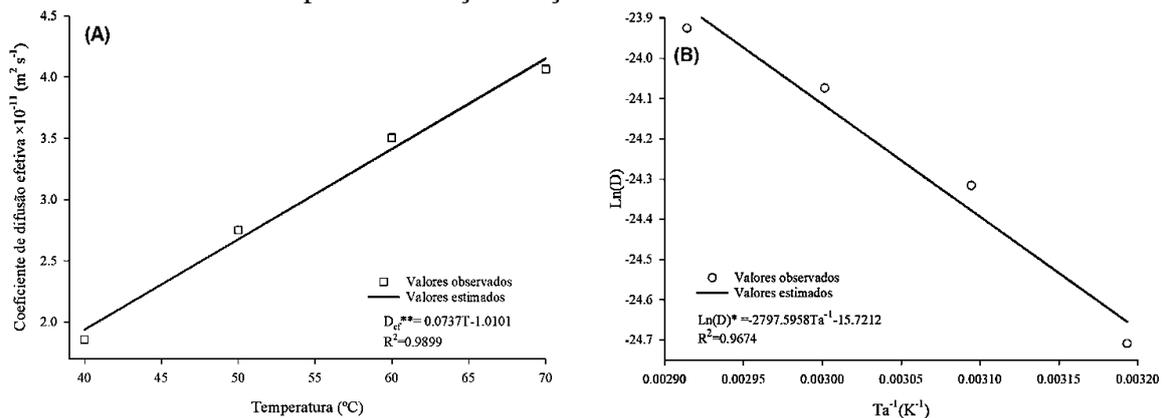


Figura 3. Valores médios do coeficiente de difusão efetivo (A) e a representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo (B), para a secagem das sementes de gergelim (*Sesamum indicum* L.) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C. ** Efeito significativo em nível de 1% de probabilidade pelo teste t-student.

A difusividade pode ser entendida como a facilidade com que a água é removida do produto agrícola (Costa *et al.*, 2011). De acordo com Madamba *et al.* (1996), para a secagem dos produtos agrícolas os valores de coeficiente de difusão variam de 10^{-11} a 10^{-9} $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$. O aumento do coeficiente de difusão efetivo com a elevação da temperatura do ar de secagem, também foi constatado em diversos estudos de secagem de produtos agrícolas como sementes de *Crambe abyssinica* (Costa *et al.*, 2011), sementes de *Vigna angularis* (Almeida *et al.*, 2009) e sementes de *Vigna unguiculata* L. Walp (Camicia *et al.*, 2015).

A dependência do coeficiente de difusão efetivo de sementes de gergelim em relação à temperatura do ar de secagem também pode ser descrita pela relação de Arrhenius (Figura 3 B). A inclinação da curva da representação de Arrhenius fornece a relação $E_a R^{-1}$ enquanto a interseção com o eixo das ordenadas indica o valor de D_0 .

A energia mínima necessária para desencadear o processo de secagem, isto é, energia de ativação (E_a) para o processo de secagem de sementes de gergelim em camada delgada foi

de $23.26 \text{ kJ mol}^{-1}$, quanto menor a energia de ativação maior será a difusividade de água no produto (Costa *et al.*, 2011).

Segundo Kashaninejad *et al.* (2007) a energia de ativação é uma barreira que deve ser ultrapassada para que o processo de difusão possa ser desencadeado no produto. Para Zogzas *et al.* (1996), a energia de ativação dos produtos agrícolas varia entre 12.7 à 110 kJ mol^{-1} , deste modo o valor da energia de ativação do presente estudo encontra-se dentro desta faixa.

O valor da energia de ativação encontrado no presente trabalho é coerente com os valores observados para outras oleaginosas, como exemplo o valor de $24.78 \text{ kJ mol}^{-1}$ obtido na secagem de *Raphanus sativus* L. (Sousa *et al.*, 2011), $31.27 \text{ kJ mol}^{-1}$ para grãos de *Arachis hypogaea* L. (Goneli *et al.*, 2017) e $41.41 \text{ kJ mol}^{-1}$ para sementes de *Ricinus communis* (Perea-Flores *et al.*, 2012), evidenciando assim a influência que o tamanho e a composição do produto exercem na energia mínima necessária para que haja evaporação da água no produto.

CONCLUSÃO

Com a elevação da temperatura do ar de secagem, ocorre um aumento na taxa de redução de água e redução no tempo de secagem. O modelo Dois termos apresentou melhor ajuste na temperatura de $40 \text{ }^\circ\text{C}$, enquanto o modelo de Aproximação da difusão apresentou o melhor ajuste para as temperaturas de 50 , 60 , e $70 \text{ }^\circ\text{C}$. O coeficiente de difusão efetivo para as sementes de gergelim aumenta com a elevação da temperatura do ar de secagem, variando de 1.94×10^{-11} à $4.15 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para as temperaturas de 40 à $70 \text{ }^\circ\text{C}$. A energia mínima necessária para desencadear o processo de secagem das sementes de gergelim foi de $23.26 \text{ kJ mol}^{-1}$.

REFERÊNCIAS

- Almeida, D., Resende, O., Costa, L., Mendes, U., & Sales, J. (2009). Cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). *Global Science And Technology*, 2(1), 72 - 83.
- Amoo, S., Okorogbona, A., Du Plooy, C., & Venter, S. (2017). *Sesamum indicum*. Em V. Kuete (Ed.), *Medicinal Spices and Vegetables from Africa* (pp. 549-579). Academic Press.
- Barrozo, A., Mujumdar, A., & Freire, J. (2014). Air-drying of seeds: A review. *Drying Technology: An International Journal*, 32(10), 1127-1141.
- Brooker, D., Bakker-Arkema, F., & Hall, C. (1992). *Drying and storage of grains and oilseeds*. Springer Science & Business Media.
- Camicia, R., Christ, D., Coelho, S., & Camicia, R. (2015). Modelagem do processo de secagem de sementes de feijão-caupi. *Revista Caatinga*, 28, 206-214.
- Costa, L., Resende, O., Sousa, K., & Gonçalves, D. (2011). Coeficiente de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de sementes de crambe. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15(10), 1089-1096.
- Draper, N., & Smith, D. (1998). *Applied regression analysis* (3^a ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Faria, R., Teixeira, I., Devilla, I., Ascheri, D., & Resende, O. (2012). Cinética de secagem de sementes de crambe. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16(5), 573-583.
- Goneli, A., Araujo, W., Hartmann Filho, C., Martins, E., & Oba, G. (2017). Drying kinetics of peanut kernels in thin layers. *Engenharia Agrícola*, 37(5), 994-1003.
- Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A., & Tabil, L. (2007). Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. *Journal of Food Engineering*, 78(1), 98-108.
- Khazaei, J., & Daneshmandi, S. (2007). Modeling of thin-layer drying kinetics of sesame seeds: mathematical and neural networks modeling. *International Agrophysics*, 21, 335-348.

- Khazaei, J., & Mohammadi, N. (2009). Effect of temperature on hydration kinetics of sesame seeds (*Sesamum indicum* L.). *Journal of Food Engineering*, *91*, 542-552.
- Mabasso, G., Covane, Y., Cangela, G., Siqueira, V., Dauala, G., Salgado, I., . . . Cristovão, L. (2022). Drying kinetics and physiology of Cowpea seeds (*Vigna unguiculata* L. Walp) at different temperatures. *International journal of advance agricultural research*, *10*, 10-19.
- Madamba, P., Driscoll, R., & Buckle, K. (1996). The thin-layer drying characteristics of garlic slices of Garlic Slices. *Journal of Food Engineering*, *29*, 75-97.
- Mohsenin, N. (1986). *Physical properties of plant and animal materials*. New York: Gordon and Breach Publishers.
- Oyekale, K. O., Nwangburuka, C. C., Denton, O. A., Daramola, D. S., Adeyeye, J. A., & Akinkuotu, A. O. (2012). Comparative effects of organic and inorganic seed treatments on the viability and vigour of sesame seeds in storage. *Journal of Agricultural Science*, *4*(9), 187-198.
- Perea-Flores, M. J., Garibay-Febles, V., Chanona-Pérez, J. J., Calderón-Domínguez, G., Méndez-Méndez, J. V., Palacios-González, E., & Gutiérrez-López, G. F. (2012). Mathematical modelling of castor oil seeds (*Ricinus communis*) drying kinetics in fluidized bed at high temperatures. *Industrial Crops and Products*, *38*, 64-71.
- Rafiee, S., A., K., Sharifi, M., Jafari, A., Mobli, H., & Tabatabaeefar, A. (2009). Thin Layer Drying Properties of Soybean (Viliamz Cultivar). *J. Agric. Sci. Technol.*, *11*(1), 289-300.
- Resende, O., Arcanjo, R. V., Siqueira, V. C., & Rodrigues, S. (2009). Modelagem matemática para a secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de concreto. *Acta Scientiarum Agronomy*, *31*(2), 189-196.
- Silva, G. (2019). *Produção, tecnologia e armazenamento de sementes*. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A.
- Siqueira, V. C., Leite, R. A., Mabasso, G. A., Martins, E. A., Quequeto, W. D., & Isquierdo, E. P. (2020). Drying kinetics and effective diffusion of buckwheat grains. *Ciência e Agrotecnologia*, *44*, 1-10.
- Sousa, K. A., Resende, O., Chaves, T. H., & Moreira Costa, L. (2011). Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). *Revista Ciência Agronômica*, *42*(4), 883-892.
- Wolfinger, R. (1993). Covariance structure selection in general mixed models. *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, *22*(4), 1079-1106.
- Zogzas, N. P., Maroulis, Z. B., & Marinos-Kouris, D. (1996). Moisture Diffusivity Data Compilation in Foodstuffs. *Drying Technology: An International Journal*, *14*(10), 2225-2253.