



MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM POR INFRAVERMELHO DE PERA PORTUGUESA

Pedro Henrique Alves Martins¹, Fernanda Machado Baptestini²

¹ Estudante de doutorado em Engenharia de Alimentos, Universidade Federal do Espírito Santo, Campus Alegre. pedro.a.martins@edu.ufes.br

² Docente na Universidade Federal do Espírito Santo, Campus Alegre.
E-mail: fernanda.baptestini@ufes.br

Recebido em: 15/05/2026 – Aprovado em: 05/06/2026 – Publicado em: 30/06/2026
DOI: 10.18677/EnciBio_2026B12

RESUMO

A pera é uma fruta com textura, aroma e sabor apreciados por muitos consumidores. Entretanto, tem vida de prateleira curta, o que requer operações unitárias para prevenir a perda de qualidade e prolongar seu tempo de consumo. Um desses processos é a secagem. Independentemente dos mecanismos de condução, convecção e radiação, este é um processo de transferência de calor e de massa. Peras portuguesas foram cortadas com 5,0 mm de espessura e 2,0 cm de diâmetro e secas até massa constante, em um secador com fonte de aquecimento por infravermelho e balança incorporada de precisão de 0,001 g, nas temperaturas de 50, 60, 70, 80, 90 e 100 °C. As leituras da variação de massa foram feitas em intervalos de 1,0 min. Aos dados experimentais foram ajustados modelos matemáticos e calculado o coeficiente de difusão efetiva e a energia de ativação. Verificou-se que, à medida que a temperatura aumenta, o tempo de secagem diminui e as curvas adquirem maior inclinação. Os modelos Aproximação da difusão e Dois termos foram os que melhor se ajustaram aos dados experimentais em todas as condições de secagem. Houve uma sutil elevação das constantes de secagem com o incremento da temperatura. À medida que a temperatura aumentou, o coeficiente de difusão efetiva aumentou e esta relação pode ser representada pela Equação de Arrhenius, obtendo-se uma energia de ativação para o processo de secagem de 35,816 kJ mol⁻¹. As propriedades termodinâmicas apresentaram tendência esperada com a elevação da temperatura, visto que o processo de secagem não foi espontâneo.

PALAVRAS-CHAVE: Desidratação; Difusão; Energia de ativação.

MATHEMATICAL MODELING OF INFRARED DRYING OF PORTUGUESE PEARS

ABSTRACT

Pear is a fruit whose texture, aroma, and flavor are widely appreciated by consumers. However, it has a short shelf life, which makes it necessary to apply unit operations to prevent quality loss and extend its period of consumption. One such process is drying. Regardless of the mechanisms involved - conduction, convection, or radiation-drying is a heat and mass transfer process. Portuguese pears were sliced to a thickness of 5.0 mm and a diameter of 2.0 cm and dried to constant mass in a dryer equipped with an infrared heating source and an integrated balance with a precision of 0.001 g, at temperatures of 50, 60, 70, 80, 90, and 100 °C. Mass variation readings were recorded at 1.0 min intervals. Mathematical models were fitted to the experimental data, and the

effective diffusion coefficient and activation energy were calculated. It was observed that as temperature increased, drying time decreased and the drying curves became steeper. The Diffusion Approximation and Two-Term models provided the best fit to the experimental data under all drying conditions. A slight increase in the drying constants was observed with increasing temperature. As temperature increased, the effective diffusion coefficient also increased, and this relationship can be described by the Arrhenius equation, resulting in an activation energy for the drying process of 35.816 kJ mol⁻¹. The thermodynamic properties showed the expected trend with increasing temperature, since the drying process was non-spontaneous.

KEYWORDS: Dehydration; Diffusion; Activation energy.

INTRODUÇÃO

A pera é um fruto originado da pereira, pertencente à família Rosaceae, do gênero *Pyrus*, e que apresenta uma variedade de espécies cultivadas em todo o mundo. Segundo levantamentos do IBGE (2026), a produção brasileira predomina na região Sul, de clima ameno, e ainda é pequena, mantendo o país dependente das exportações da Argentina, do Chile e de Portugal. A fruta exibe características sensoriais como sabor delicioso, textura macia e suculência (DU *et al.*, 2025). Ainda, segundo Hong *et al.* (2021), diferentes variedades de peras têm nutrientes semelhantes, porém com teores significativamente diferentes. Em cada 100 g de peras, o teor de água é de 70–90%, o de açúcar é de 10–14%, o de fibra é de 2–5%, o de proteína é de 0,1–0,9% e o de gordura é de 0,1–0,2%.

O tratamento térmico em alimentos é presente em grande parte dos processos industriais, como na secagem, na pasteurização, na esterilização e em outros. Os mecanismos de transferência de calor são: condução, convecção e radiação e ocorrem por existir diferença de temperatura entre os meios. Particularmente, a radiação ocorre por meio de ondas eletromagnéticas, como o infravermelho, que não precisam de um meio material para se propagar. Esta, quando usada para a secagem, aquece diretamente o material, evaporando a água rapidamente, sem precisar aquecer o ar ambiente. Hay *et al.* (2022) citam vantagens significativas em relação à secagem convencional, como economia de tempo e energia, alta qualidade do produto, ambiente de trabalho limpo e controle e monitoramento precisos dos parâmetros do processo.

A desidratação prolonga a vida útil de alimentos por permitir a remoção da água, reduzindo a deterioração microbiológica e as reações de degradação, e possibilita a disponibilização de alimentos sazonais, impedindo a perda de valor comercial. Além disso, permite reduzir a massa e o volume do produto, aumentando a eficiência de transporte e de armazenamento. Também agrega valor aos alimentos, uma vez que um produto com propriedades físicas e químicas diferenciadas do *in natura* é disponibilizado no mercado (BAPTESTINI *et al.*, 2016).

A modelagem matemática é um processo cíclico no qual a matemática é usada para representar, explorar e compreender melhor situações do mundo real, matematizando um problema e validando os resultados (TAITE *et al.*, 2025). Ela é caracterizada pelas seguintes fases: (1) identificação de um problema do mundo real; (2) desenvolvimento de uma representação matemática; (3) geração de uma solução matemática; (4) interpretação da solução no contexto original; e (5) avaliação da validade da solução (GEIGER *et al.*, 2025). Na secagem, os modelos matemáticos usados são agrupados em: modelos teóricos, que consideram apenas a resistência interna e a transferência de calor e de água entre o produto e o ar quente, e os

semiteóricos e empíricos, que analisam apenas a resistência interna, a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem.

Muitos modelos, tais como Aproximação da difusão, Henderson e Pabis, Newton, entre outros, foram propostos e são utilizados para modelar a cinética de secagem em camada fina de diversos produtos. Contudo, eles são específicos para cada produto e condição de secagem (MOURA *et al.*, 2021) neste sentido, é necessária a modelagem quando pelo menos um desses fatores é alterado.

Em processos de secagem, é muito comum o cálculo do coeficiente de difusão efetiva, que pode ser entendido como medida da taxa de transferência de moléculas de água de uma região de alta concentração para uma de baixa concentração até atingir o equilíbrio. Este movimento molecular aleatório e lento é fundamental para a compreensão dos mecanismos de transferência de massa e da interação soluto-solvente.

A energia de ativação é outra grandeza determinada nos processos de secagem e representa a quantidade mínima de energia que as moléculas de água precisam absorver para quebrar suas ligações com o material e migrar para a superfície, permitindo sua evaporação. Sabe-se que quanto maior é o seu valor, mais difícil se torna a remoção da água, indicando uma forte ligação dela ao produto e que o processo é devagar.

Dito isto, objetiva-se obter curvas de secagem de fatias de pera nas temperaturas de 50 a 100 °C, modelar o processo e calcular o coeficiente de difusão efetiva e a energia de ativação a fim de obter informações para melhor controlar essa operação unitária que determina, em grande parte, a qualidade do produto final.

MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Operações Unitárias, localizado na Universidade Federal do Espírito Santo, Campus Alegre. Foram utilizadas peras maduras obtidas no mercado. Estas foram armazenadas em câmara BOD à temperatura de 25 ± 1 °C durante o período em que o experimento foi conduzido.

Foram cortadas fatias com aproximadamente 5,0 mm de espessura e 2,0 cm de diâmetro. Estas passaram pelo processo de branqueamento a 90 °C por 1,5 min e, em seguida, foram submetidas a banho de gelo por 5 min. Para a realização da secagem, utilizou-se um secador infravermelho com balança incorporada de precisão de 0,001 g, nas temperaturas de 50, 60, 70, 80, 90 e 100 °C. O secador fornece leituras da variação de massa em intervalos de tempo de 1 min. As fatias foram secas até massa constante.

Aos dados experimentais da secagem foram ajustados modelos matemáticos (Tabela 1).

TABELA 1. Modelos matemáticos para descrever o fenômeno da secagem.

Designação do modelo	Modelo
Aproximação da difusão	$RU = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-k b t)$ (1)
Dois termos	$RU = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$ (2)
Henderson e Pabis	$RU = a \exp(-k t)$ (3)
Logarítmo	$RU = a \exp(-k t) + b$ (4)
Newton	$RU = \exp(-k t)$ (5)
Page	$RU = \exp(-kt^n)$ (6)

Em que,

RU = razão de umidade, adimensional,

t = tempo de secagem, min,
k, k₀ e k₁ = constantes de secagem, min⁻¹
a, b e n = coeficientes dos modelos, adimensionais.

A razão de umidade foi determinada de acordo com a Equação 7. A simplificação se deve ao fato de que na secagem por infravermelho, as amostras podem ser secas, até que reste apenas o teor de matéria seca (U_e = 0) (TOĞRUL, 2006).

$$RU = \frac{U_t - U_e}{U_0 - U_e} = \frac{U_t}{U_0} \quad (7)$$

Em que,
U_t = teor de água num tempo t, kg_a kg_{ms}⁻¹,
U₀ = teor de água inicial, kg_a kg_{ms}⁻¹,
U_e = teor de água no equilíbrio, kg_a kg_{ms}⁻¹.

Os dados experimentais da secagem das fatias de pera foram submetidos à análise de regressão não linear pelo método Gauss-Newton, no software Statistica 12.0®.

Para análise do grau de ajuste de cada modelo, foram considerados a magnitude do coeficiente de determinação, o erro médio relativo (P) (Equação 8) e o erro médio estimado (SE) (Equação 9).

$$P = \frac{100}{n_{obs}} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_i - \hat{Y}_i|}{Y_i} \quad (8)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{GLR}} \quad (9)$$

Em que:
Y_i = valor observado, kg_a kg_{ms}⁻¹,
Ŷ_i = valor estimado, kg_a kg_{ms}⁻¹,
n_{obs} = número de dados observados,
GLR = graus de liberdade do resíduo.

O Critério de Informação de Akaike (AIC) (Equação 10) e o Critério de Informação Bayesiano (BIC) (Equação 11) também foram utilizados como indicadores estatísticos do melhor modelo que prediz a cinética de secagem de pera portuguesa.

$$AIC = -2 \log L + 2p \quad (10) \quad BIC = -2 \log L + p \ln(n_{obs}) \quad (11)$$

Em que:
L – a máxima verossimilhança, considerando as estimativas dos parâmetros,
p – número de parâmetros do modelo.

O coeficiente de difusão efetiva foi obtido por meio do ajuste do modelo matemático da difusão líquida, descrito pela Equação 12, aos dados experimentais das curvas de secagem das fatias de pera. Esta equação é a solução analítica da Segunda Lei de Fick e leva em consideração a forma geométrica plana, a condição de contorno de umidade na superfície do produto e desconsidera a contração volumétrica do mesmo.

$$RU = \frac{U_t - U_e}{U_0 - U_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{ef} t}{4L^2} \right] \quad (12)$$

Em que:

L = espessura do produto, m,

D_{ef} = coeficiente de difusão efetiva, $m^2 s^{-1}$,

n = número de termos da equação.

Para avaliar a influência da temperatura no coeficiente de difusão efetiva foi utilizada a equação de Arrhenius (Equação 13).

$$D_{ef} = D_0 \exp \left(-\frac{E_a}{RT_{abs}} \right) \quad (13)$$

Em que:

D_0 = fator pré-exponencial, $m^2 s^{-1}$,

E_a = energia de ativação, $kJ mol^{-1}$,

T_{abs} = temperatura absoluta; K.

As propriedades termodinâmicas do processo de secagem foram obtidas pelo método descrito por Jideani *et al.* (2002):

$$\Delta H = E_a - RT_{abs} \quad (14)$$

$$\Delta S = R \left(\ln D_0 - \ln \frac{k_B}{h_p} - \ln T_{abs} \right) \quad (15)$$

$$\Delta G = \Delta H - \Delta S T_{abs} \quad (16)$$

Em que:

ΔH = entalpia, $J mol^{-1}$,

ΔS = entropia, $J mol^{-1} K^{-1}$,

ΔG = energia livre de Gibbs, $J mol^{-1}$,

k_B = constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23} J K^{-1}$,

h_p = constante de Planck, $6,626 \times 10^{-34} J s^{-1}$.

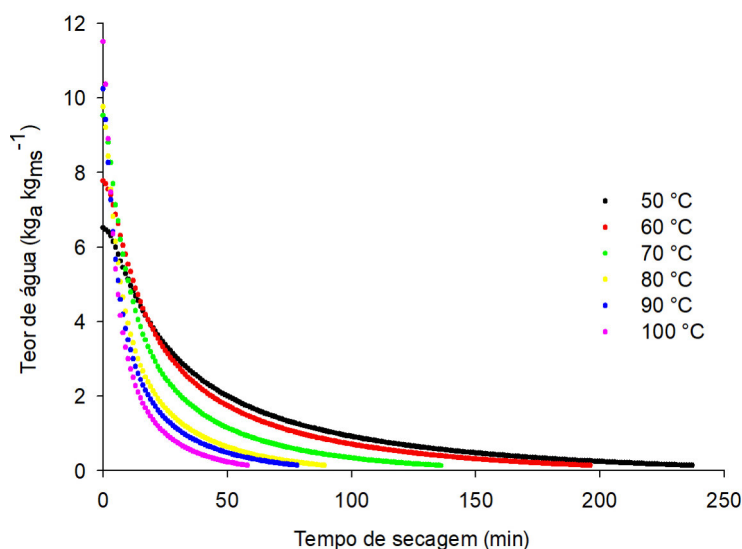
RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 1 apresenta as curvas de secagem de fatias de pera portuguesa nas diferentes temperaturas. É possível observar a influência da temperatura no tempo da secagem. Os tempos gastos para que o teor de água fosse reduzido a valores próximos de $0,1364 kg_a kg_{ms}^{-1}$ foram de 237, 196, 136, 89, 78 e 58 min, para as temperaturas de 50, 60, 70, 80, 90 e $100^\circ C$, respectivamente. À medida que a temperatura aumenta, o tempo de secagem diminui e as curvas adquirem maior inclinação, uma vez que há maior quantidade de calor transferido por radiação para o meio e, conseqüentemente, ocorre a elevação da velocidade de migração da água presente no interior do produto para a sua superfície.

Ainda analisando a Figura 1, é possível evidenciar os distintos períodos de secagem, período de taxa constante e o de taxa decrescente, em que, segundo Brooker *et al.* (1992), a transição ocorre entre teores de água de 2,33 a $3,00 kg_a kg_{ms}^{-1}$.

1. No período de taxa constante a água evapora-se como água livre, uma vez que sua pressão de vapor é constante e igual à pressão de vapor da água pura à temperatura do produto. A temperatura do produto também é constante e igual à temperatura de bulbo úmido, característica do fato de que as transferências de calor e de massa se compensam. Já no período de taxa de secagem decrescente, a transferência de calor não é compensada pela transferência de massa porque a resistência interna ao transporte de água torna-se maior do que a externa, dificultando a migração da água do interior do produto para a sua superfície; além disso, a temperatura do produto aumenta, podendo atingir a temperatura do ar de secagem.

FIGURA 1. Curvas de secagem de fatias de pera portuguesa nas temperaturas de 50, 60, 70, 80, 90 e 100 °C.



Na Tabela 2 encontram-se os valores dos coeficientes de determinação, dos erros médios relativos e dos erros médios estimados da modelagem da secagem de fatias de pera portuguesa na faixa de temperatura de 50 a 100 °C. Os mesmos critérios estatísticos foram utilizados por Souza *et al.* (2024), Andrade *et al.* (2025) e Mabasso *et al.* (2025).

TABELA 2. Coeficientes de determinação, erros médios relativos, erros médios estimados, critério de informação de Akaike e critério de informação de Bayesiano da modelagem de fatias de pera portuguesa na faixa de temperatura de 50 a 100 °C.

50°C					
Modelo	R ² (decimal)	P (%)	SE	AIC	BIC
(1)	0,9993	3,747	0,009	-1824,586	-1814,169
(2)	0,9998	1,914	0,005	-2092,661	-2078,772
(3)	0,9920	29,451	0,029	-1288,944	-1282,000
(4)	0,9972	19,044	0,017	-1495,470	-1485,053
(5)	0,9903	34,968	0,031	-1243,238	-1239,765
(6)	0,9973	10,787	0,017	-1526,593	-1519,649
60°C					
Modelo	R ² (decimal)	P (%)	SE	AIC	BIC
(1)	0,9989	4,774	0,011	-1422,492	-1412,643
(2)	0,9996	2,428	0,007	-1609,787	-1596,654

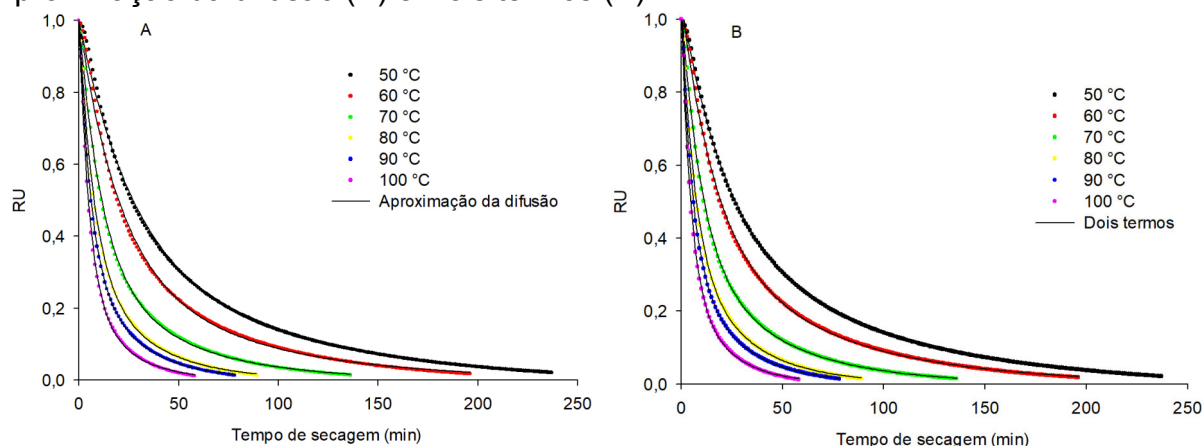
(3)	0,9901	36,904	0,031	-1038,665	-1032,099
(4)	0,9964	24,770	0,019	-1193,741	-1183,892
(5)	0,9887	41,820	0,033	-1015,699	-1012,416
(6)	0,9961	15,335	0,020	-1195,931	-1189,365
70°C					
Modelo	R ² (decimal)	P (%)	SE	AIC	BIC
(1)	0,9993	3,677	0,008	-1066,678	-1057,919
(2)	0,9997	1,701	0,005	-1169,590	-1157,911
(3)	0,9883	45,219	0,032	-718,288	-712,448
(4)	0,9955	32,283	0,020	-813,615	-804,855
(5)	0,9860	51,260	0,035	-695,389	-692,469
(6)	0,9961	18,480	0,019	-846,981	-841,141
80°C					
Modelo	R ² (decimal)	P (%)	SE	AIC	BIC
(1)	0,9994	4,179	0,008	-710,042	-702,543
(2)	0,9997	2,608	0,006	-762,894	-752,895
(3)	0,9886	44,308	0,033	-469,139	-464,139
(4)	0,9957	32,362	0,020	-533,053	-525,553
(5)	0,9862	50,308	0,036	-453,658	-451,158
(6)	0,9964	17,198	0,018	-558,529	-553,530
90°C					
Modelo	R ² (decimal)	P (%)	SE	AIC	BIC
(1)	0,9996	2,482	0,006	-744,199	-737,091
(2)	0,9998	1,331	0,004	-705,360	-695,882
(3)	0,9872	47,987	0,034	-407,459	-402,720
(4)	0,9951	35,288	0,021	-460,857	-453,749
(5)	0,9839	54,696	0,038	-390,652	-388,283
(6)	0,9966	17,661	0,017	-498,996	-494,257
100°C					
Modelo	R ² (decimal)	P (%)	SE	AIC	BIC
(1)	0,9992	5,790	0,009	-442,054	-435,821
(2)	0,9994	4,292	0,008	-463,454	-455,144
(3)	0,9900	49,285	0,031	-314,755	-310,600
(4)	0,9963	36,483	0,019	-354,164	-347,931
(5)	0,9890	52,936	0,033	-310,073	-307,995
(6)	0,9959	23,554	0,020	-356,199	-352,044

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 2, observa-se que os valores do coeficiente de determinação são maiores que 98%. Sabe-se que este varia de 0 a 100% e quanto mais elevado é seu valor, melhor o modelo estatístico consegue explicar a relação entre a variável dependente e a independente. O erro médio estimado é uma medida estatística que indica o afastamento entre os valores estimados por um modelo e os valores observados. Quanto mais próximo de zero, melhor o modelo. O erro médio relativo mede a precisão de uma estimativa. Diversos trabalhos consideraram que apenas modelos matemáticos que têm valores de erro médio relativo inferiores a 10% são adequados para representar os processos em estudo. O critério de informação de Akaike e o Bayesiano baseiam-se na maximização do logaritmo da função de verossimilhança, o que equivale a minimizar a soma dos quadrados dos erros. Quanto maiores seus valores absolutos, melhor o ajuste do

modelo aos dados experimentais. Desse modo, os modelos Aproximação da difusão e Dois termos são os mais indicados para descrever o fenômeno de secagem das fatias de pera portuguesa, uma vez que apresentam os melhores valores dos parâmetros estatísticos, em todas as condições de secagem.

Na Figura 2 estão apresentadas as curvas de razão de umidade observadas e estimadas pelos modelos Aproximação da difusão e Dois termos, validando o bom ajuste dos modelos. Uma vez que os modelos são funções exponenciais, assintotas em relação ao eixo do tempo, espera-se uma boa correlação na região de taxa de secagem decrescente.

FIGURA 2. Curvas de razão de umidade observadas e estimadas pelos modelos Aproximação da difusão (A) e Dois termos (B).



Na Tabela 3 encontram-se as estimativas dos parâmetros dos modelos Aproximação da difusão e Dois termos. Analisando-a, observa-se uma sutil elevação das constantes de secagem com o incremento da temperatura. À medida que a temperatura aumenta, as curvas de secagem adquirem maior inclinação, já que maior é a transferência de calor e conseqüentemente, maior é a transferência de massa. Além disso, as constantes a e b apresentaram valores entre 0 e 1, característicos da função exponencial decrescente.

TABELA 3. Estimativas dos parâmetros dos modelos de secagem de Aproximação da difusão e Dois termos.

Parâmetro	Aproximação da difusão					
	Temperatura (°C)					
	50	60	70	80	90	100
a	0,6109	0,6672	0,6761	0,6697	0,6673	0,7327
k	0,0382	0,0495	0,0873	0,1319	0,1688	0,1959
b	0,3006	0,2801	0,2506	0,2507	0,2327	0,2518
Parâmetro	Dois termos					
	Temperatura (°C)					
	50	60	70	80	90	100
a	0,4689	0,6483	0,3667	0,3649	0,3543	0,2986
k ₀	0,0125	0,0604	0,0233	0,0348	0,0406	0,0521
b	0,5791	0,4093	0,6746	0,6686	0,6694	0,7324
k ₁	0,0468	0,0153	0,0991	0,1464	0,1812	0,2135

Na Tabela 4 estão apresentados os valores dos coeficientes de difusão efetiva da secagem de fatias de pera portuguesa, nas temperaturas de 50, 60, 70, 80, 90 e 100 °C.

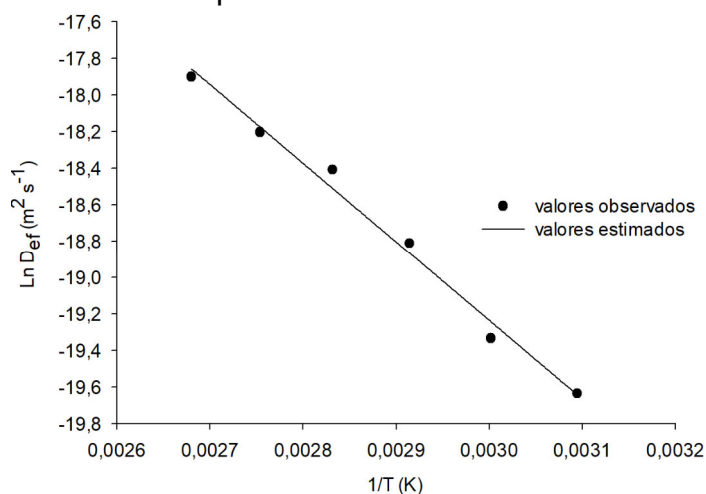
TABELA 4. Coeficientes de difusão efetiva da secagem de fatias de pera portuguesa, nas temperaturas de 50, 60, 70, 80, 90 e 100 °C.

Temperatura (°C)					
50	60	70	80	90	100
$2,970 \times 10^{-9}$	$4,012 \times 10^{-9}$	$6,775 \times 10^{-9}$	$1,014 \times 10^{-8}$	$1,243 \times 10^{-8}$	$1,682 \times 10^{-8}$
$D_{ef} = 2,796 \times 10^{-10} \times T - 1,211 \times 10^{-8}$					$R^2 = 0,9754$

Observa-se na Tabela 4 que os valores dos coeficientes de difusão efetiva para as fatias de pera portuguesa aumentaram com a elevação da temperatura de secagem. A mesma tendência foi relatada por Silva *et al.* (2024) e Souza *et al.* (2024). A mudança de temperatura interfere nas propriedades dos fluidos, como a viscosidade, a massa específica e a vibração das moléculas de água no produto e no ar, contribuindo para a variação do coeficiente de difusão efetivo. A primeira, definida como a resistência de um fluido ao escoamento, relaciona-se diretamente ao transporte de água e é causada pelas forças coesivas entre as moléculas nos líquidos e pelas colisões moleculares nos gases e varia consideravelmente com a temperatura. A última resulta na maior diferença de pressão de vapor, que facilita o transporte da água.

A variação do coeficiente de difusão efetiva em função da temperatura de secagem é descrita pela relação de Arrhenius (Figura 3).

FIGURA 3. Representação de Arrhenius do coeficiente de difusão efetiva de fatias de pera portuguesa na faixa de temperatura de 50 a 100 °C.



A inclinação desta curva fornece a relação E_a/R , e sua interseção com o eixo da ordenada indica o valor de D_0 . Logo, a relação de Arrhenius pode ser escrita:

$$D_{ef} = 1,816 \times 10^{-3} \exp\left(\frac{35,816}{E_a R}\right)$$

A energia de ativação, por definição, é a energia mínima que as moléculas precisam absorver para que uma reação química se inicie foi de 35,816 kJ mol⁻¹, dentro do intervalo de 12,7 a 110,0 kJ mol⁻¹, relatado em diversos trabalhos. Este valor foi próximo ao encontrado por Souza *et al.* (2024) na desidratação de casca de

jabuticaba. Ela fornece um indicativo da barreira energética a ser superada pelas moléculas de água, assim, o valor obtido neste trabalho evidencia que as ligações entre o solvente e o soluto são fracas e que o produto é rico em água, a exemplo de frutas como pera, morango, banana e outras. Além disso, sabe-se que a energia de ativação varia com as condições de secagem e com as propriedades físicas e químicas dos produtos.

Na Tabela 5 estão apresentados os valores das propriedades termodinâmicas da secagem de fatias de pera portuguesa, nas temperaturas de 50, 60, 70, 80, 90 e 100 °C.

TABELA 5. Propriedades termodinâmicas da secagem de fatias de pera portuguesa nas temperaturas de 50, 60, 70, 80, 90 e 100 °C.

Temperatura (°C)	ΔH (J mol ⁻¹)	ΔS (J mol ⁻¹ K ⁻¹)	ΔG (J mol ⁻¹)
50	32968,052	-244,107	111851,143
60	32879,912	-244,375	114293,560
70	32791,772	-244,636	116738,623
80	32703,632	-244,889	119186,256
90	32615,492	-245,135	121636,384
100	32527,352	-245,375	124088,940

A entalpia diminuiu com o aumento da temperatura de secagem. Quanto maior a temperatura da fonte de aquecimento, maior é a transferência de calor para as fatias de pera, alavancando a troca de energia térmica nas reações químicas. Observa-se também que esta propriedade termodinâmica apresentou valores positivos, indicando a absorção de calor do meio, o que ocorre em processos de secagem.

A entropia, em valores absolutos, aumentou com a elevação da temperatura de secagem. Isto era esperado. Com o aumento da transferência de calor, a energia cinética e a vibração das moléculas elevam-se, o que contribui para a desordem do sistema. O sinal negativo corrobora o fato de que a secagem ocorreu porque houve fornecimento de energia na forma de calor, caso contrário, ela não seria espontânea.

A energia livre de Gibbs aumentou com o incremento de calor fornecido, o que era previsto, uma vez que ela depende da variação da entalpia e da entropia. Seus valores positivos confirmam a não espontaneidade da secagem, mas sim do resultado do aumento da diferença na pressão parcial do vapor de água, especialmente em temperaturas mais elevadas, forçando a saída da água por meio da troca simultânea de calor e massa entre o ar de secagem e o produto.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostram que há uma relação inversa entre a temperatura e o tempo de secagem e os modelos Aproximação de difusão e Dois termos foram os que melhor se ajustaram aos dados experimentais da secagem de fatias de pera portuguesa em todas as condições. O coeficiente de difusão efetiva aumentou com a temperatura e esta relação pode ser representada pela Equação de Arrhenius, obtendo-se uma energia de ativação de 35,816 kJ mol⁻¹. As propriedades termodinâmicas apresentaram tendência esperada com a elevação da temperatura, visto que o processo de secagem não foi espontâneo.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, E. G.; RESENDE, O.; CABRAL, J. C. O.; MABASSO, G. A.; QUEQUETO, W. D.; et al.; Mathematical modeling of sunflower seed (*Helianthus annuus* L.). **Food Science and Technology**, 45, e00412, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.5327/fst.00412>.

BAPTESTINI, F. M; CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; ALMEIDA, L. F. J.; VARGAS-ELÍAS, G. A. Constant and decreasing periods of pineapple slices dried by infrared. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 11, n. 1, p. 53-59, 2016. Disponível em: 10.5039/agraria.v11i1a5160.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. 1992. **Drying and storage of grains and oilseeds**. The AVI Publishing Company, Westport, Connecticut, USA.

DU, K.; YUAN, F; HUO, M.; MAO, N.; ZHAO, S.; et al.; Nutrients, bioactives, health-promoting effects, and related products of pears: Different varieties, growth stages and parts. **Journal of Functional**, v. 129, June 2025, 106844. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jff.2025.106844>.

GEIGER, V.; GALBRAITH, P.; NISS, M.; SCHMID, M. Identifying and describing generic, specific, and catalytic enablers of mathematical modelling. **ZDM - Mathematics Education**, v. 57, p. 289-302, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11858-025-01653-8>

HAY, N.; HUY, L. Q.; KIEN, P. V.; **A Review of Drying Methods Assisted by Infrared Radiation, Microwave and Radio Frequency**. In: JOVANOVIĆ, J. D. (Org.). A Comprehensive Review of the Versatile Dehydration Processes. Belgrado, 2023, p. 1-16.

HONG, SY.; LANSKY, E.; KANG, SS.; YANG, M. A review of pears (*Pyrus* spp.), ancient functional food for modern times. **BMC Complementary Medicine and Therapies**, v. 21, n. 219, p. 1-14, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12906-021-03392-1>

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção de pera**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/pera/br>. Acesso em: 05 fev. 2026.

JIDEANI, V. A.; NKAMA, I.; AGBO, E. B.; JIDEANI, I. A. Mathematical modeling of odor deterioration of millet (*Pennisetum glaucum*) dough (fura) as affected by time-temperature and product packaging parameters. **Cereal Chemistry**, v. 79, n. 5, p. 710-714, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2002.79.5.710>.

MABASSO, G. A.; RESENDE, O.; AMADE, F. F.; SIQUEIRA, V. C.; SOUZA, D. G. Drying kinetics and properties of peanut seeds (*Arachis hypogaea* L.). **Food Science and Technology**, 45, e00405, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.5327/fst.00405%20>.

MOURA, H. V.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J.M.; SILVA, E.T.V.; ESMERO, J. A. D.; et al.; Mathematical modeling and thermodynamic properties of the drying

kinetics of tapiá residues. **Journal of Food Process Engineering**, 44(8), e13768, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/jfpe.13768>.

SILVA, L. C.M.; SOUZA, D. G.; MESQUITA, A. A.; MEDEIROS, E. C. N.; ROMANI, V. P.; et al.; Drying kinetics and thermodynamic properties of guava peel. **Ciência Rural**, v. 54, n. 8, p. e20230318-8, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20230318>.

SOUZA, D. G.; SILVA, L. C. M.; SILVA, E. C. N. M.; MESQUITA, A. A.; CALIARI, M.; et al.; Drying kinetics and thermodynamic properties of jabuticaba peel. **Food Science and Technology**, 4, e00255, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5327/fst.00255>.

TAITE, G.; Di NAPOLI, J. Perspectives on mathematical modeling education: conceptions and research. **Encyclopedia**, v. 5, n. 3, p. 1-19, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/encyclopedia5030138>.

TOĞRUL, H. Suitable drying model for infrared drying of carrot. **Journal of Food Engineering**, v. 77, n. 3, p. 610-619, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.07.020>.