

08 a 11 de Outubro de 2018
Instituto Federal Fluminense
Búzios - RJ

MODELAGEM MATEMÁTICA DAS CURVAS DE SECAGEM E A DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO PARA O MAMÃO FORMOSA (*Carica papaya L.*) EM SECADOR DE LEITO FIXO

Renan Carlos Freitas de Lima¹ – renandelima02@gmail.com

Sérgio Henriques Saraiva² – sergiohsaraiva@gmail.com

Emanuelly Zanotti Hoffman Peixoto³ – emanuely.zanotti@hotmail.com

¹ Universidade Federal do Espírito Santo, Graduação em Engenharia Química – Alegre, ES, Brasil;

² Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias, Departamento de Engenharia de Alimentos – Alegre, ES, Brasil;

³ Universidade Federal do Espírito Santo, Graduação em Nutrição – Alegre, ES, Brasil.

Resumo – O processo de secagem de alimentos é comumente utilizado em indústrias alimentícias, com a finalidade da preservação dos alimentos para seu uso direto ou como matérias primas para novos produtos. Os objetivos no presente trabalho foram validar diversos modelos matemáticos semi-empíricos ao processo de secagem do mamão formosa (*Carica papaya L.*) em camadas delgadas, determinar o coeficiente de difusividade efetiva, obter a energia de ativação, além de, determinar os teores de umidade finais para cada temperatura de secagem. A secagem do produto foi realizada sob variações controladas de temperatura (min. 42°C a máx. 70°C) e velocidade fixada do ar de aquecimento de 1 m.s⁻¹. Dentre os modelos ajustados aos dados experimentais, o que melhor representou as curvas de secagem do mamão formosa foi o modelo de Midilli, com o coeficiente de determinação ajustado (R^2_a) na faixa de 0,9976 – 0,9996. Os coeficientes de difusividade efetiva foram estimados matematicamente entre os valores de $1,0667 \times 10^{-9}$ e $3,3355 \times 10^{-9}$ m².s⁻¹ para as temperaturas propostas e a energia de ativação para o sistema foi de, aproximadamente, 34,421 KJ.mol⁻¹.

Palavras-chave: Mamão, cinética de secagem, modelagem matemática, estimativa de parâmetros.

1. INTRODUÇÃO

Segundo a Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2018), a produção mundial de mamão global está em torno de 12,5 milhões de toneladas, sendo o Brasil o segundo maior produtor de mamão do mundo com um total de 1,5 milhões de toneladas e uma área de 30,5 mil hectares no ano de 2016. O volume de exportação no ano de 2016 foi de 33,9 mil toneladas arrecadando 38,98 milhões de dólares (Hf Brasil, 2017).

Devido às grandes perdas do fruto nas etapas de colheita, armazenamento e transporte, algumas técnicas, como a secagem, visam aumentar a vida de prateleira desse produto e o consumo humano *in natura*, na forma de conserva ou desidratado, além da viabilidade da produção de farinhas nutricionais. A conservação por secagem tem fundamento no fato da atividade de água ser reduzida, inviabilizando a ação de microrganismos e enzimas no fruto (Morais *et al.*, 2013).

Na literatura são citados diversos modelos matemáticos que avaliam a secagem de produtos higroscópicos (Martinazzo *et al.*, 2007). Os estudos de cinética de secagem voltado para a modelagem matemática, com o objetivo de estudar os coeficientes de difusividade efetiva, a energia de ativação e os parâmetros dos modelos cinéticos, vem despertando interesse em inúmeros pesquisadores para os mais variados produtos: semente de abóbora (Sacilik, 2007), banana maçã (Silva *et al.*, 2009), café com pergaminho (Goneli, *et al.*, 2009), nabo forrageiro (Sousa *et al.*, 2011) e grãos de guandu (Silva, *et al.*, 2014).

Segundo Roca *et al.* (2008), os modelos de secagem, que por sua vez são baseados na segunda Lei de Fick, não são rigorosamente representativos dos diversos mecanismos que prevalecem no transporte de água em produtos agrícolas, e a difusividade varia conforme mudam as condições de secagem, não sendo própria para cada material, podendo ser convencionalmente chamada de difusividade efetiva.

Segundo Corrêa *et al.* (2006), a energia de ativação é definida como a facilidade com que as moléculas de água superam a barreira energética durante a migração no interior do produto, ou seja, quanto menor a energia de ativação maior será a velocidade com que a água será removida do produto, e conseqüentemente, maior a difusividade efetiva de água (Resende *et al.*, 2011).

Considerando a importância do estudo teórico do processo de secagem dos produtos agrícolas e a restrição nas informações teóricas para os processos de secagem do mamão formosa, este trabalho teve como objetivos validar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem de mamão formosa e selecionar o melhor modelo para o fenômeno, além de determinar o coeficiente de difusividade efetiva e obter a energia de ativação para o processo de secagem em secador de leito fixo.

2. METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Operações Unitárias do Curso de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) em Alegre – ES. Foram utilizados mamões nos estágios de maturação entre o nível 1 e 3 (de 15% a 50% de coloração amarela da casca). Em seguida foi cortado o mamão em camadas laminadas de, aproximadamente, 10 mm de espessura e colocadas em uma bandeja removível. Antes de cada experimento de secagem, mediu-se o teor de água inicial pelo método gravimétrico convencional por estufa (105 ± 3 °C) durante 48 horas, com três repetições, de acordo com as normas do Instituto Adolfo Lutz (2008).

A secagem do produto foi realizada nas temperaturas de 42; 49; 56; 63; 70 °C em secador de leito fixo (Figura 1) em três repetições para cada temperatura. A velocidade do ar (1 m.s^{-1}) foi determinada através de um anemômetro digital portátil (Homis mod 188).

O processo de pesagem das amostras foi realizado periodicamente com intervalos de tempo programados. A pesagem seguiu até a inalteração da massa em duas pesagens seguidas.

Para o ajuste das curvas de secagem, utilizou-se a razão de umidade, um valor adimensional em função do tempo, dado pela equação 1.

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

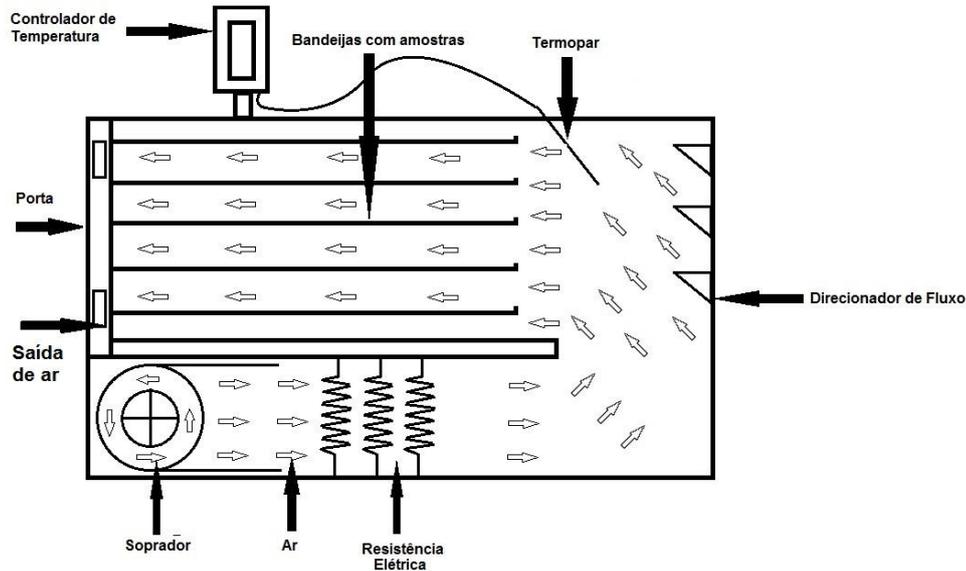


Figura 1 – Esboço lateral da vista do secador de leito fixo

Para o ajuste das curvas experimentais de secagem, utilizou-se os 4 modelos empíricos citados por Martinazzo (2007), listados na tabela 1. A determinação dos parâmetros dos modelos, foram obtidos por regressão não linear utilizando o software SigmaPlot 11.0.

Tabela 1 – Modelos empíricos de secagem

Modelo	Equação	Nº	Referência
Lewis	$RU = \exp(-k \cdot t)$	(2)	Bruce (1985)
Page	$RU = \exp(-k \cdot t^n)$	(3)	Page (1949)
Henderson e Pabis	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	(4)	Henderson e Pabis (1961)
Midilli	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	(5)	Midilli (2002)

Onde: RU é a razão de umidade (adimensional); t é o tempo de secagem (h); k são as constantes de secagem para cada modelo (h^{-1}) e a , b , e n são coeficientes dos modelos. Foram estimados os valores dos parâmetros dos modelos, em função da variável independente tempo, para cada temperatura.

O critério de escolha do melhor modelo foi com base nos maiores valores obtido do coeficiente de determinação ajustado (R_a^2) e no menor valor do erro padrão da regressão (SE). As equações 6 e 7 apresentam como foram calculados os valores de R_a^2 e SE respectivamente.

$$R_a^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (RU_{exp,i} - RU_{prev,i})^2}{\sum_{i=1}^N (RU_{exp,i} - \overline{RU})^2} \cdot \frac{N-1}{N-p} \quad (6)$$

$$SE = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (RU_{exp,i} - RU_{prev,i})^2}{N - p} \right)^{1/2} \quad (7)$$

Onde N é o tamanho da amostra, p é a quantidade de parâmetros do modelo proposto, $RU_{exp,i}$ é a razão de umidade experimental no termo i, $RU_{prev,i}$ é a razão de umidade prevista pelo modelo e \overline{RU} é a razão de umidade média do processo.

Para a determinação da difusividade efetiva utilizou-se a equação analítica de Crank (1975), expressa pela equação 8. A solução analítica é uma série infinita de termos que expressa a razão de umidade (RU) em função do tempo (t), espessura do material (L), considerado constante durante o experimento, e coeficiente de difusividade efetiva (D_{ef}).

$$RU = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i + 1)^2} \exp \left[-(2i + 1)^2 \pi^2 D_{ef} \frac{t}{4L^2} \right] \quad (8)$$

A partir da difusividade efetiva estimada para cada condição do processo, plotou-se uma curva de difusividade efetiva x temperatura de secagem e através da equação de Arrhenius (1889), conforme a equação 9, estimou-se, por regressão não-linear, a energia de ativação para as mesmas condições.

$$D_{ef} = D_{\infty} \exp \left(-\frac{E_a}{RT} \right) \quad (9)$$

Em que: D_{ef} é o coeficiente de difusão efetiva (m^2s^{-1}), D_{∞} é o fator pré-exponencial da equação de Arrhenius (m^2s^{-1}), R é a constante universal dos gases ($8,314 J.mol^{-1}K^{-1}$), T é a temperatura absoluta (K) e E_a a energia de ativação ($KJ.mol^{-1}$).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As umidades iniciais do mamão formosa para o processo de secagem estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores de umidade inicial antes de cada processo de secagem

Temperatura (°C)	Xbu (inicial)	Desvio padrão
42	90,37%	0,30%
49	89,52%	1,97%
56	90,38%	0,49%
63	89,45%	0,72%
70	89,10%	1,33%

Os valores do teor de umidade em base úmida encontrados no presente estudo variaram entre 89,10 – 90,37%. Segundo Taco (2011), o teor de umidade do mamão formosa cru é de 86,9%, confirmando uma boa qualidade do fruto para o processo de secagem.

Nas tabelas 3, 4, 5, 6 e 7, são apresentados os valores dos parâmetros estimados para cada modelo matemático da cinética de secagem do mamão formosa nas temperaturas de 42; 49; 56; 63; 70 °C.

Tabela 3 – Coeficientes dos modelos matemáticos ajustados para secagem do mamão formosa (Carica papaya L.) na temperatura de 42°C

Modelo	Coeficientes			
	a	b	n	k
(2)	-	-	-	0,1252
(3)	-	-	0,9825	0,1301
(4)	0,9828	-	-	0,1225
(5)	0,9981	-0,00227	0,8974	0,1418

Tabela 4 – Coeficientes dos modelos matemáticos ajustados para secagem do mamão formosa (Carica papaya L.) na temperatura de 49°C

Modelo	Coeficientes			
	A	b	n	k
(2)	-	-	-	0,1774
(3)	-	-	0,95757	0,1913
(4)	0,9746	-	-	0,1713
(5)	0,9972	-0,00257	0,8874	0,1998

Tabela 5 – Coeficientes dos modelos matemáticos ajustados para secagem do mamão formosa (Carica papaya L.) na temperatura de 56°C

Modelo	Coeficientes			
	a	b	n	k
(2)	-	-	-	0,2201
(3)	-	-	0,9777	0,2272
(4)	0,9861	-	-	0,2164
(5)	0,9931	-0,00277	0,9815	0,2301

Tabela 6 – Coeficientes dos modelos matemáticos ajustados para secagem do mamão formosa (Carica papaya L.) na temperatura de 63°C

Modelo	Coeficientes			
	a	b	n	k
(2)	-	-	-	0,2916
(3)	-	-	1,1232	0,2526
(4)	1,0216	-	-	0,3001
(5)	0,9793	-0,0027	1,1152	0,2376

Tabela 7 – Coeficientes dos modelos matemáticos ajustados para secagem do mamão formosa (Carica papaya L.) na temperatura de 70°C

Modelo	Coeficientes			
	a	B	n	k
(2)	-	-	-	0,3820
(3)	-	-	1,1220	0,3423
(4)	1,0232	-	-	0,3936
(5)	0,9838	-0,0022	1,1193	0,3270

Tabela 8 – Coeficientes de determinação ajustado (R^2_a) e o erro padrão da regressão (SE) para os 4 modelos ajustados para secagem do mamão formosa (Carica papaya L.).

Modelo	42		49		56		63		70	
	R^2_a	SE								
(2)	0,9966	0,0198	0,9961	0,0210	0,9939	0,0246	0,9926	0,0294	0,9937	0,0265
(3)	0,9966	0,0197	0,9969	0,0188	0,9967	0,0189	0,9963	0,0212	0,9971	0,0182
(4)	0,9970	0,0187	0,9970	0,0182	0,9947	0,0233	0,9930	0,0287	0,9942	0,0256
(5)	0,9994	0,0081	0,9992	0,0094	0,9987	0,0123	0,9980	0,0156	0,9981	0,0149

Na tabela 8, observa-se que em todas as temperaturas de secagem do mamão formosa, os modelos ajustados apresentaram valores do coeficiente de determinação ajustado superiores a 0,98, o que segundo, Akgun e Dowmaz (2005) indica um ajuste satisfatório para os modelos estudados. Atores como Martins et al. (2015), Chielle *et al.* (2015), também avaliaram o erro padrão da regressão (SE), parâmetro que está relacionado com o coeficiente de determinação ajustado e obteve valores satisfatórios à esses mesmos parâmetros.

Analisando os modelos estudados, observou-se que o modelo de Lewis apresentou ajustes matemáticos inferiores em todos os casos, com valores do erro padrão da regressão variando de 0,0198 a 0,0294, observado também por Chielle *et al.* (2015). Esta característica está relacionada ao número de parâmetros do modelo.

Ao analisar o desempenho das curvas de secagem, o modelo de Midilli (5) apresentou melhores ajustes aos dados experimentais. O coeficiente de determinação ajustado variou de 0,9980 a 0,9994, mostrando um ótimo ajuste e sendo o modelo recomendado para esse processo de secagem nessas condições experimentais.

Os modelos de Lewis, Page e Henderson e Pabis apresentam comportamentos assintóticos no eixo do tempo, implicando na dificuldade de estimativa do tempo de secagem quando a razão de umidade for zero. Tal comportamento não é observado no modelo de Midilli, o tornando mais prático na estimativa desse parâmetro.

Nobrega et al. (2013) ajustaram 4 modelos, avaliando a cinética de secagem e concluíram, usando como parâmetros para a seleção do modelo o coeficiente de determinação e o desvio quadrático médio, que o modelo de Midilli foi o que melhor se ajustou ao processo de secagem da manga Tommy Atkins pré-desidratada osmoticamente. O modelo de Midilli também foi o que melhor se ajustou à secagem de polpa de carambola estudado por Silva et al. (2016) e na secagem de banana prata para produção de banana-passa, estudado por Aquino (2013).

Observa-se nas tabelas 3, 4, 5, 6 e 7 que os valores do parâmetro k do modelo de Midilli, que representa o efeito das condições externas de secagem, aumentou com a elevação de temperatura, visto que quanto maior a temperatura de secagem, maior a facilidade do mamão formosa perder água livre. Em relação ao parâmetro n do modelo de Midilli, o mesmo comportamento foi observado com o aumento da temperatura. Resultados semelhantes em relação aos parâmetros k e n foram obtidos nos trabalhos de Silva et al. (2016) e Leite et al. (2015). Tais autores estudaram a secagem da polpa de carambola e banana da terra, respectivamente.

Na figura 2 são apresentados os dados experimentais para cada temperatura em estudo, ajustado ao modelo de Midilli e pode se observar que o tempo de secagem tem comportamento decrescente com o aumento da temperatura, obtendo-se valores de: $27,9 \pm 4,08$ horas, $21,24 \pm 4,42$ horas, $14,73 \pm 1,50$ horas, $11,24 \pm 1,1$ horas e $9,29 \pm 1,43$ horas, para 42, 49, 56, 63 e 70 °C, respectivamente.

Cinética de Secagem

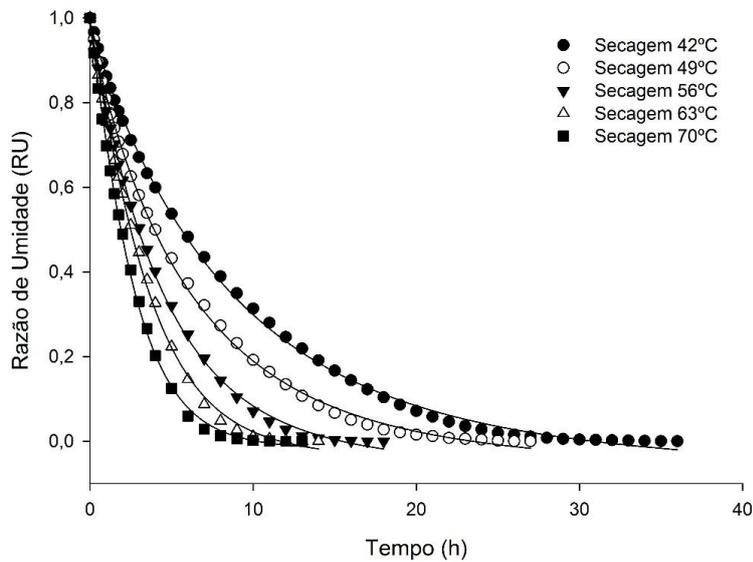


Figura 2 – Modelagem matemática da cinética de secagem do mamão formosa (Carica papaya L.) para o modelo de Midilli nas diferentes temperaturas.

Na tabela 9, são apresentados os valores do coeficiente de difusividade efetiva obtidos durante a secagem do mamão formosa nas diferentes condições de temperatura a partir da Eq. 8 com aproximação de oito termos, a partir do qual se observou que o valor de D_{ef} não variou.

Tabela 9: Coeficiente de difusividade efetiva (D_{ef}) ajustado as diferentes temperaturas e os desvios padrões para cada valor.

Temperatura (°C).	$D_{ef} \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	Desvio Padrão $\times 10^{-10}$
42	1,0667	1,15077
49	1,6219	3,49221
56	1,7910	3,42013
63	2,5411	3,41418
70	3,3355	4,19045

De acordo com a tabela 9, observa-se que os valores médios do coeficiente de difusividade efetiva aumentaram com o incremento da temperatura de secagem. Goneli et al. (2009) afirmam que com o aumento da temperatura, a viscosidade da água diminuiu e, sendo a viscosidade uma medida de resistência do fluido ao escoamento, as variações dessa propriedade implicam em alterações na difusão da água nos capilares dos frutos, tornando favorável o deslocamento de água do interior do produto até a superfície. Os mesmos autores ainda completam, que o aumento da temperatura favorece o aumento do nível vibrações das moléculas de água no interior do produto, o que contribui também para uma difusão mais rápida.

Os valores dos coeficientes de difusividade efetiva, para a secagem do mamão formosa, variaram entre os valores de 1,0667 e 3,3355 $\times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para temperaturas entre 42 e 70°C. De acordo com Madamba et al. (1996) os valores do coeficiente de difusão, para secagem de produtos agrícolas, apresentam-se na ordem de 10^{-9} a $10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, estando os valores da

difusividade efetiva calculados para camadas delgadas do mamão formosa de acordo com a faixa descritas por esses autores.

Na figura 3 são apresentados os valores médios da difusividade efetiva (D_{ef}) em função da temperatura absoluta (T) obtidos no processo de secagem do mamão formosa.

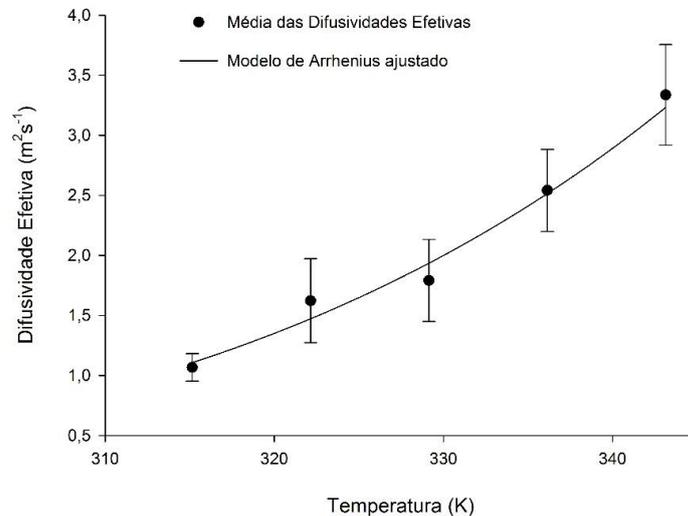


Figura 3 – Relação da equação de Arrhenius com o coeficiente de difusividade efetiva em função das diferentes temperaturas.

Na equação 10, são apresentados os coeficientes da equação ajustada para os coeficientes de difusividade efetiva médio do mamão formosa, calculados de acordo com a equação 9.

$$D_{ef} = 5,61119 \times 10^{-4} \exp\left(-\frac{34421,26}{RT}\right) \quad (10)$$

A energia de ativação para difusão líquida, para o intervalo de temperatura de 42 a 70°C, durante a secagem do mamão formosa em camada delgada foi de, aproximadamente, 34,421 KJ.mol⁻¹. Segundo Kashaninejad et al. (2007) a energia de ativação é uma barreira que deve ser ultrapassada para que o processo de difusão aconteça no produto. Para produtos agrícolas a energia de ativação varia entre 12,7 – 110 KJ.mol⁻¹ (Zogzas et al., 1996).

4. CONCLUSÃO

Foram analisados os modelos de Lewis; Page; Henderson e Pabi; e Midilli. Ajustes satisfatório foram observados para todos os modelos propostos, sendo o modelo de Midilli, por apresentar ajustes precisos em toda as faixas de temperatura e maior simplicidade na estimativa do tempo de secagem, o modelo selecionado para representar as curvas de secagem do mamão formosa.

O coeficiente de difusividade efetiva teve aumento gradativo conforme o aumento da temperatura do ar de secagem, apresentando valores entre 1,0667 e 3,3355 x 10⁻⁹ m².s⁻¹, estando de acordo com o que a literatura propõe para secagem de produtos agrícolas.

A energia de ativação, para a faixa de temperatura de 42 a 70°C, teve sua magnitude dentro da faixa proposta pela literatura, com valor aproximado de 34,421 KJ mol⁻¹.

REFERENCES

- AKGUN, N. A.; DOYMAZ, I. Modelling of olive cake thin-layer drying process. *Journal of Food Engineering*, v. 68, n. 4, p.455 – 461, 2005.
- ARRHENIUS, S. Ober die reaktionsgeschwindigkeit bei der inversion von rohrzucker durch sauren. *Z. Physik. Chem.*, v. 4, p. 226 – 248, 1889.
- BRUCE, D. M. Exposed-layer barley drying, three models fitted to new data up to 150 C. *Journal of Agricultural Engineering*, v. 32, p. 337–347, 1985.
- CHIELLE, D. P.; JUNIOR, D. L. O.; MORCELIN, B.; VENTURINI, T. TANABE, E. H.; MEILI, L. *Análise da fluidodinâmica de sementes de mamão em um secador de leito de jorro*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 2013, Maceió – AL. Anais. Maceió: Edufal, 2015. v. 2, p. 990 – 996.
- CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M.; NOGUEIRA, B.L. Determinação do coeficiente de difusão líquida dos grãos de feijão. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v.8, n.2, p.117-126, 2006.
- CRANK, J. *The Mathematics of Diffusion*, 2ª ed. S.I Claredon Press Oxford, 414p., 1975.
- FAO. Agricultural production: primary crops. Disponível em: <<http://www.fao.org>>. Acesso em: 14 jul. 2018.
- GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; AFONSO JÚNIOR, P.C.; OLIVEIRA, G.H.H. Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. *Revista Brasileira de Armazenamento*, n.11, p.64-73, 2009. Anuário 2017-2018. *Hortifruti Brasil*. São Paulo, ed. Especial, ano 16, nº 174, dez 2017/ jan 2018.
- HENDERSON, S. M., S. PABIS. 1961. Grain drying theory. II. Temperature effects on drying coefficients. *Journal of Agricultural*, v. 44, p. 1111–1122, 1961.
- INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz. Métodos físico-químicos para análises de alimentos. 4ª ed. (1ª Edição digital), 2008. 1020 p.
- KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L.G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. *Journal of Food Engineering*, v.78, n.1, p.98-108, 2007.
- LEITE, A. L. M. P.; SILVA, F. S.; PORTO, A. G.; PIASSON, D.; SANTOS, P.; Contração volumétrica e cinética de secagem de fatias de banana variedade Terra. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 45, n. 2, p. 155 – 162, 2015.
- MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. The Thin-layer Drying Characteristics of Garlic Slices. *Journal of Food Engineering*, v.29, n.1, p.75-97, 1996.
- MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MELO, E. C.; Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. *Revista Brasileiro de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande, v.11, n.3, p.301–306, 2007.
- MARTINS, E. A. S.; LAGE, E. Z.; GONELI, A. L. D.; FILHO, C. P. H.; LOPES, J. G. Cinética de secagem de folhas de timbó. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, n. 3, p. 238-244, 2015.
- MIDILLI, A.; KUCUK, H.; VAPAR, Z. A new model for single-layer drying. *Drying Technology*, v. 20, n. 7, p. 1503-1513, 2002.
- MORAIS, S. J. S.; DEVILLA, I. A.; FERREIRA, D. A.; TEIXEIRA, I. R. Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (Vigna unguiculata (L.) Walp.). *Revista Ciências Agrônômica*, v. 44, n. 9, p. 455-463, 2013.
- NOBREGA, A. M. M.C.; DUARTE, M. E. M.; ALMEIDA, R. D.; NUNES, L. S.; PEREIRA, K. B.; ANDRÉ, S.R. *Secagem da Manga Tommy Atkins pré-desidratada osmoticamente: cinética e avaliação de modelos*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 2013, Maceió – AL. Anais. Maceió: Edufal, 2015. v. 3, p. 1729 – 1735.
- PAGE, G. E. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. M.Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Purdue University. 1949.
- RESENDE, O.; ULLMANN, R.; SIQUEIRA, V. C.; CHAVES, T. H.; FERREIRA, L. U. Modelagem matemática e difusividade efetiva das sementes de pinhão-mansão (*Jatropha curcas* L.) durante a secagem. *Revista de Engenharia Agrícola*, v. 31, n. 6, p. 1123-1135, 2011.
- ROCA, E.; GUILLARD, V.; BROYART, B.; GUILBERT, S.; GONTARD, N. Effective moisture diffusivity modeling food structure and hygroscopicity. *Food Chemistry*, v. 106, n. 4, p. 1428-1437, 2008.
- SACILIK, K. Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). *Journal of Food Engineering*, v. 79, p. 23-30, 2007.
- SILVA, A. S.; MELO, K. S.; ALVES, N. M. C.; GOMES, J. P. Cinética de secagem em camada fina da banana maçã em secador de leito fixo. *Revista brasileira e ciências da terra*, v. 9, n. 2, p. 107-115, 2009.
- SILVA, L. M. M.; SOUSA, F. C.; SOUSA, E. P.; MOREIRA, M. E. R.; MATA, C. 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.

- SILVA, R. B.; SILVA, F. S.; PORTO, A. G.; ALVES, A. P.; Estudo da cinética de secagem de polpa de carambola. *Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial*, Ponta Grossa, v. 10, n. 2, p. 2069 – 2080, 2016.
- SOUSA, K. A.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H.; COSTA, L. M. Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). *Revista Ciência Agronômica*, v.42, p.883-892, 2011.
- TACO - Tabela brasileira de composição de alimentos. 4. ed. rev. e ampl. Campinas: UNICAMP/NEPA, 2011. 161 p. Disponível em: <<http://www.unicamp.br/nepa/taco/tabela.php?ativo=tabela>>. Acesso em: 14 jul. 2018.
- ZOGZAS, N. P.; MAUROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying Technology*, v. 14, n. 10, p. 2225-2253, 1996.

MATHEMATICAL MODELING OF DRYING CURVES AND DIFFUSION COEFFICIENT OF FORMOSA PAPAYA (*Carica papaya* L.) IN FIXED BED DRYER

Abstract – *The process of drying food is commonly used in food industries, for the purpose of preserving food for its direct use or as raw material for new products. The objectives of the present work were to validate several semi-empirical mathematical models for the drying process of papaya formosa (*Carica papaya* L.) in thin layers, to determine the effective diffusivity coefficient, to obtain the activation energy, besides to determine the contents of moisture content for each drying temperature. Product drying was performed under controlled temperature variations (min 42°C to max 70°C) and fixed speed of heating air of 1 m.s⁻¹. Among the models fitted to the experimental data, it was the Midilli model, with the adjusted coefficient of determination (R^2_a) in the range of 0.9976 - 0.9996 that best represented the drying curves of the papaya. The coefficients of effective diffusivity were estimated mathematically between the values of 1.0667×10^{-9} and $3.3355 \times 10^{-9} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ for the proposed temperatures and the activation energy for the system was approximately 34,421 KJ.mol⁻¹.*

Keywords: *Papaya, drying kinetics, mathematical modeling, parameter estimation.*