



DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n7p686-692>

Modelagem matemática da secagem convectiva com radiação infravermelha de grãos de *Moringa oleifera*

Vânia R. G. Nascimento¹, João D. Biagi¹ & Rafael A. de Oliveira¹

¹ Faculdade de Engenharia Agrícola/Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP. E-mail: vania_rosal@yahoo.com.br; biagi@feagri.unicamp.br; augustus@feagri.unicamp.br

Palavras-chave:

difusividade efetiva
segunda lei de Fick de difusão
modelo de Page
modelo de Midilli
modelo de Newton

RESUMO

Os modelos matemáticos aplicados à secagem auxiliam no dimensionamento de secadores, na previsão da taxa de secagem, melhoram as condições de secagem e avaliam a qualidade do processo; assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o ajuste dos modelos de Page, Midilli, Newton e da segunda lei de Fick aos dados experimentais da secagem convectiva com aplicação de radiação infravermelha de grãos de *Moringa oleifera* L. Avaliaram-se, também, o efeito dos fatores temperatura do ar (30-60 °C), a velocidade do ar (0,55-1,05 m s⁻¹), o tempo de aplicação da radiação infravermelha (120-300 s) e a intensidade da radiação infravermelha (1500-4500 W) sobre a difusividade efetiva, teor de água, atividade de água e tempo de secagem. Os modelos explicaram mais de 98% do comportamento da secagem destacando-se que o modelo de Midilli apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais. A difusividade efetiva foi calculada com equação proposta pela Segunda Lei de Fick, solução para formato esférico e os valores obtidos variaram entre 6,44x10⁻¹⁰ e 9,89x10⁻¹⁰ m² s⁻¹. Os fatores temperatura do ar e tempo de aplicação da radiação infravermelha foram significativos sobre todas as respostas estudadas considerando-se 90% de confiança.

Key words:

effective diffusivity
Fick's second law of diffusion
Page model
Midilli model
Newton model

Mathematical modeling of convective drying with infrared radiation of *Moringa oleifera* grains

ABSTRACT

Mathematical models applied to drying assists in sizing dryers, predicting drying rate, improvement of drying conditions and assessment of process quality. Thus, the aim of this study was to evaluate the fitting of Page, Midilli, Newton and second law of Fick models to the experimental data of convective drying with application of infrared radiation of *Moringa oleifera* L. grains. The effects of factors - air temperature (30-60 °C), air velocity (0.55 to 1.05 m s⁻¹), infrared radiation application time (120-300 s) and infrared radiation intensity (1500-4500 W) on the effective diffusivity, moisture content, water activity and drying time was also evaluated. The models explained more than 98% of the drying behavior and the Midilli model showed the best fit for the experimental data. The effective diffusivity was calculated using the equation proposed by the solution of second law of Fick, for spherical shape, and the values ranged from 6.44x10⁻¹⁰ to 9.89x10⁻¹⁰ m² s⁻¹. The factors air temperature and infrared radiation application time were significant for all studied variables, considering 90% of confidence.

INTRODUÇÃO

Moringa oleifera L. é uma planta tropical originária da Índia introduzida no Brasil na década de 50. Trata-se de uma planta com diversas possibilidades de utilização, as folhas e frutos têm valor alimentar sendo as folhas ricas em vitaminas A e C, cálcio, ferro e fósforo e os frutos apresentam altos teores de proteína. O óleo extraído dos grãos é utilizado industrialmente para lubrificar relógios, maquinarias delicadas e na fabricação de perfumes.

Dentre as formas de uso dos grãos de *Moringa oleifera* L., sua utilização se destaca como coagulante natural no tratamento de águas. Em geral, a clarificação de águas é realizada com o extrato dos grãos em processos de coagulação/floculação, sedimentação e/ou filtração. Na etapa de preparo da solução coagulante à base de grãos de *Moringa oleifera* L. diversos autores relataram a realização de secagem dos grãos antes do processo de moagem para obtenção do pó. Katayon et al. (2006) secaram os grãos em estufa durante 24 h sob temperatura de 50 °C. Arantes (2010) manteve os grãos em dessecador durante o período de 2 a 3 dias para redução do teor de água. Franco (2010) colheu vagens secas da árvore e manteve os grãos em dessecador durante 24 h.

Ndabigengesere et al. (1995) constataram que somente grãos obtidos de vagens de *Moringa oleifera* L. secas apresentam atividade coagulante. A utilização de grãos secos também facilita a operação de moagem, etapa realizada na extração do coagulante. Considerando ainda que a quantidade de grãos colhidos seja superior à demanda momentânea, esses grãos devem ser armazenados e, para tal, um dos cuidados que se deve ter é mantê-los fora da faixa favorável ao desenvolvimento de microrganismos, ou seja, com baixo teor de água; desta forma, a secagem deve ser realizada; no entanto, a literatura específica carece de informações sobre recomendações de secagem para conservação deste produto.

O processo de secagem consiste na remoção de água de determinado material visando redução do seu metabolismo, da atividade enzimática, fúngica e bacteriana. A prática pós-colheita visa, portanto, manter a qualidade de produtos agrícolas durante o período de armazenamento além de oferecer as vantagens de redução de massa e volume.

A execução de operações de secagem envolve, em geral, a aplicação de calor, o método de secagem convectiva é amplamente difundido e empregado na secagem de alimentos; entretanto, sua característica de transferência de calor indireta para o condicionamento do ar de secagem (temperatura e umidade relativa) reduz a eficiência energética desta operação elevando seu custo.

A energia eletromagnética dos comprimentos de onda do infravermelho pode ser utilizada em operações de secagem, por se tratar de radiação térmica. Nindo & Mwithiga (2011) afirmam que para este fim são utilizados, comumente, comprimentos de onda de infravermelho de 2,5 a 2000 μm .

São inúmeras as vantagens da radiação infravermelha na transferência de calor que a torna adequada em processos de secagem; dentre elas se destaca que esta energia é transmitida diretamente para o produto de acordo com as leis da óptica reduzindo o tempo de processamento e o custo com energia.

Além disto pode-se obter altas taxas de transferência de calor com emissores compactos e apresenta a possibilidade de utilização combinada com a secagem convectiva. A convecção de ar aquecido atua removendo a umidade evaporada e substituindo o ar saturado por ar seco, com maior volume específico (Sakai & Mao, 2006; Nindo & Mwithiga, 2011).

Sakai & Mao (2006) alertam, porém, que um controle exato do aquecimento é requerido porque existe o perigo de superaquecimento devido às altas taxas de aquecimento. Sandu (1986) recomenda a aplicação de radiação intermitente para a secagem de produtos alimentícios.

A modelagem matemática da secagem é complexa haja vista que além de considerar que ocorrem simultaneamente processos de transferência de calor e massa, os mesmos devem ser ajustados para o formato do produto e tipo de secagem. O estudo desses modelos é importante para o dimensionamento de secadores, previsão da taxa de secagem, melhoria das condições de secagem e avaliação da qualidade do processo.

Processos de secagem de produtos biológicos ocorrem principalmente no período de taxa decrescente, como observado por Sharma et al. (2005), Markowski et al. (2007) Celma et al. (2009), Doymaz (2011) e Supmoon & Noomhorm (2013) em secagem de fatias de cebola, cevada, resíduos de uva, fatias de batata doce e batata frita, respectivamente. Neste período de secagem a difusão da água representa os mecanismos de transferência de água, tais como: fluxo capilar (difusão em fase líquida); migração de umidade da camada adsorvida; vaporização-condensação e difusão de vapor no ar.

A equação de balanço de massa de água no interior do produto proposta pela lei de Fick, que expressa o fluxo de massa por unidade de área como sendo proporcional ao gradiente de concentração de água, tem sido amplamente utilizada para descrever processos de secagem durante o período de taxa decrescente para a maioria dos materiais biológicos (Srikiatden & Roberts, 2006; Hassini et al., 2007; Oliveira, 2009; Celma et al., 2009; Puente-Díaz et al., 2013).

Abe & Afzal (1997), Afzal & Abe (1998), Sharma et al. (2005), Celma et al. (2009), Ponkham et al. (2011) e Puente-Díaz et al. (2013) realizaram secagem com aplicação da radiação no infravermelho distante de arroz, batata, cebola, resíduos de uva, abacaxi e murta, respectivamente e utilizaram a segunda lei de Fick para estimar o coeficiente de difusividade da água.

Quando a teoria difusional não é adequada para descrever o comportamento da taxa de secagem devido a interferências no efeito de resistência interna do material, pode-se aplicar os modelos empíricos e verificar o que melhor representa o processo de secagem (Oliveira, 2009).

O modelo empírico de Page é utilizado frequentemente na representação de curvas de secagem. Resende et al. (2011) avaliaram o ajuste de onze modelos matemáticos para descrever a secagem de sementes de pinhão-manso. Os modelos analisados, Page e Henderson e Pabis Modificado apresentaram os melhores ajustes aos dados experimentais sendo o modelo de Page selecionado para a descrição das curvas de secagem do pinhão-manso em razão da sua simplicidade; Togrul (2005) aplicou várias equações de secagem, dentre elas Newton, Page e Midilli e verificou

que o modelo de Midilli foi o que melhor caracterizou o comportamento da secagem de fatias de maçã.

Ante o exposto e considerando que diversos autores constataram que os modelos de Page, Midilli, Newton e da segunda lei de Fick descreveram o comportamento da secagem de materiais biológicos satisfatoriamente, o objetivo deste trabalho foi avaliar o ajuste desses modelos ao comportamento da secagem convectiva com aplicação de radiação infravermelha de grãos de *Moringa oleifera* L, além de estudar o efeito dos fatores temperatura e velocidade do ar de secagem, tempo de aplicação da radiação infravermelha e intensidade dessa radiação sobre as respostas difusividade efetiva, teor de água, atividade de água e tempo de secagem.

MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Secagem da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP. Os grãos de *Moringa oleifera* L. utilizados foram colhidos no Campo Experimental da Universidade e no Núcleo de Produção de Mudas da CATI de Marília, SP, cujas características físicas eram: comprimento de 10,97 mm, largura de 10,94 mm, espessura de 10,85 mm, diâmetro equivalente de 10,92 mm, área projetada de 93,65 mm², esfericidade de 0,99 mm, volume de 681,73 mm³, massa específica de 224,33 mm e ângulo de repouso de 47,50°.

Os ensaios de secagem foram realizados com secador apresentado na Figura 1, o qual consiste em uma câmara cilíndrica com diâmetro de 0,5 m e extensão de 1,20 m,

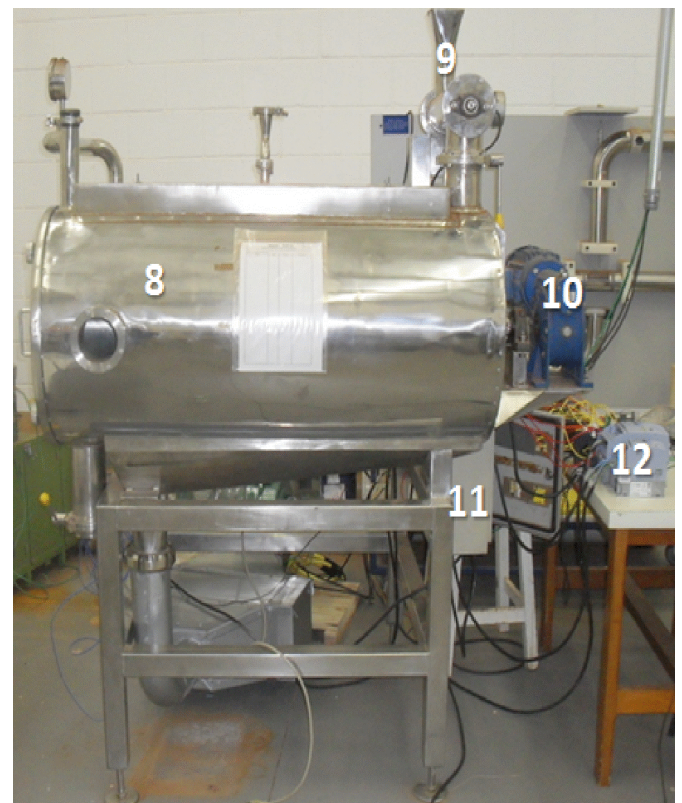
dotado de eixo rotativo em forma de pás, possível de realizar transporte e movimentação de material sólido no interior da câmara (Figura 1).

Para a realização de secagem em batelada remove-se o eixo do secador e se acrescenta uma bandeja perfurada no interior da câmara para se obter uma superfície plana e conter as amostras de produto a ser secado.

Um ventilador centrífugo, da marca WEG de alto rendimento, com potência de 2200 W realiza a insuflação do ar ambiente para a câmara de secagem. Desde o ventilador até a câmara de secagem o ar é aquecido por uma bateria de resistências elétricas, com potência total de 6000 W; posteriormente, penetra no plenum que, finalmente, o distribui através de uma placa perfurada para o interior da câmara de secagem.

Unidades radiantes infravermelhas com tubo de quartzo (modelo CQZ 10, Corel Aquecimento Industrial) de potência total 4500 W estão posicionadas na parte superior da câmara do secador encobrendo todo o leito de secagem.

Nos ensaios de secagem convectiva com aplicação de radiação infravermelha de grãos de *Moringa oleifera* L. foram seguidos os parâmetros operacionais definidos pelo planejamento experimental fatorial fracionado 2⁴⁺¹ com adição de três pontos centrais, totalizando 11 ensaios. As variáveis independentes (fatores) estudadas foram: temperatura (T) e velocidade do ar de secagem (V), tempo de aplicação da radiação infravermelha (t) e intensidade da radiação infravermelha (I). As variáveis dependentes (respostas) estudadas foram: difusividade efetiva, teor de água, atividade de água e tempo de secagem. Avaliou-se também o ajuste dos



(1) Tampa da câmara de secagem; (2) Ventilador centrífugo; (3) Resistências elétricas; (4) Sistema de aquisição de dados de temperatura; (5) Medidor de energia; (6) Caixa de controle de acionamento; (7) Bomba de vácuo; (8) Corpo do secador; (9) Sistema de alimentação; (10) Movimentação de sólidos; (11) Caixa com inversor de frequência do ventilador (ABB, ACS150) e (12) Inversor de frequência do sistema de movimentação de sólidos (WEG, CFW08)

Figura 1. Imagem frontal (A) e lateral (B) do secador com seus componentes

modelos de Page, Midilli, Newton e da segunda lei de Fick de difusão aos dados experimentais de secagem.

Na Tabela 1 se apresenta o planejamento dos ensaios de secagem com as variáveis codificada e real. Definiu-se a temperatura do ar de secagem variando entre baixa (30 °C) e média (60 °C) intensidade, não foi possível trabalhar com alta intensidade por restrição do equipamento de secagem. A velocidade do ar variou entre 0,55 e 1,05 m s⁻¹, sendo inferior à velocidade terminal dos grãos de *Moringa oleifera* L. (4,62 m s⁻¹). O tempo de aplicação da radiação infravermelha foi definido em secagens preliminares quando então foi observado que tempos inferiores a 120 s não eram suficientes para aquecer o produto, mas apenas para iniciar o processo e como esta radiação atinge altas taxas de aquecimento, o tempo de 300 min foi suficiente para que o produto alcançasse altas temperaturas. Os níveis da intensidade da radiação infravermelha foram definidos pela potência do emissor da radiação.

O ajuste da temperatura do ar foi realizado com controlador on/off, enquanto que a velocidade do ar foi ajustada por um inversor de frequência. Os diferentes tempos de aplicação da radiação infravermelha (Tabela 1) foram acionados manualmente e de forma intermitente em intervalos de 900 s, com auxílio de cronômetro. O tempo entre as aplicações da radiação foi necessário para permitir a transferência de massa dos grãos para o ar e seu transporte pelo fluxo de ar. A intensidade da radiação infravermelha foi fixada com a utilização de 1, 2 ou 3 unidades de emissores de radiação infravermelha, as quais forneciam potência de 1500, 3000 e 4500 W, respectivamente.

Em intervalos de 900 s foram realizadas pesagens para acompanhamento da redução do teor de água das amostras. A secagem foi encerrada quando alcançado o teor de água de equilíbrio com as condições do ar.

Com auxílio do software Statistica 9.0 foram analisados os efeitos principais e da interação dos fatores sobre as respostas estudadas com nível de significância de 90%.

A difusividade efetiva foi calculada com a equação proposta pela Segunda Lei de Fick, com solução para formato esférico. Os parâmetros dos modelos de Page, Midilli e Newton foram determinados por regressão não linear com

Tabela 1. Planejamento dos ensaios de secagem de acordo com os níveis das variáveis codificada e real: temperatura do ar (T), velocidade do ar (V), tempo de aplicação da radiação infravermelha (t) e intensidade da radiação infravermelha (I)

Ensaio	Variável codificada				Variável real			
	T	V	t	I	T (°C)	V (m s ⁻¹)	t (s)	I (W)
Pontos fatoriais	1	-1	-1	-1	30	0,55	120	1500
	2	1	-1	-1	60	0,55	120	4500
	3	-1	1	-1	30	1,05	120	4500
	4	1	1	-1	60	1,05	120	1500
	5	-1	-1	1	30	0,55	300	4500
	6	1	-1	1	60	0,55	300	1500
	7	-1	1	1	30	1,05	300	1500
	8	1	1	1	60	1,05	300	4500
Pontos centrais	9	0	0	0	45	0,80	210	3000
	10	0	0	0	45	0,80	210	3000
	11	0	0	0	45	0,80	210	3000

auxílio do software Statistica 9.0 (Tabela 2). Avaliou-se o ajuste dos modelos aos dados experimentais pelo coeficiente de determinação (R²), qui-quadrado reduzido (χ^2) e raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE). Referidos parâmetros foram calculados com as Eqs. 1 e 2.

Tabela 2. Modelos utilizados na análise da secagem de grãos de *Moringa oleifera* L.

Nome do modelo	Modelo
Page	$Y = \exp(-kt^y)$
Midilli	$Y = a \exp(-kt^c) + bt$
Newton	$Y = \exp(-kt)$
Fick	$Y = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[-n^2 \pi^2 D_{ef} \frac{t}{r^2} \right]$

Y - Razão de umidade; y, c, a, b e k - Coeficientes dos modelos; t - Tempo de secagem (h); D_{ef} - Difusividade efetiva (m² s⁻¹); r - Raio do produto (m)

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{\text{exp},i} - Y_{\text{pred},i})^2}{N - Z} \quad (1)$$

$$\text{RMSE} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_{\text{pred},i} - Y_{\text{exp},i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

em que:

- Y_{exp,i} - razão de umidade experimental, adimensional;
- Y_{pred,i} - razão de umidade experimental, adimensional;
- N - número de observações; e
- Z - número de coeficientes e constantes.

O teor de água foi determinado gravimetricamente no início e no final dos ensaios de secagem, a partir do método-padrão da estufa a 105 ± 3 °C durante 24 h (Brasil, 2009), em triplicata. Os resultados foram expressos em porcentagem.

A atividade de água (a_w) foi medida com equipamento específico (marca Decagon, modelo Pawkit), com resolução de 0,01 a 25,1 °C. As amostras foram colocadas na cápsula do equipamento de leitura e o resultado final foi expresso como a média entre três leituras consecutivas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de difusividade efetiva (m² s⁻¹), teor de água (% b.u.), atividade de água e tempo de secagem (s), obtidos dos ensaios de secagem de grãos de *Moringa oleifera* L. relativos ao planejamento fatorial fracionado 2⁴⁺¹, realizado com as variáveis independentes: temperatura do ar (T em °C), velocidade do ar (V em m s⁻¹), tempo de aplicação da radiação infravermelha (t em min) e intensidade da radiação infravermelha (I em W) estão apresentados na Tabela 3.

Verifica-se, na Tabela 3, que o ensaio 8 foi o que apresentou maior difusividade efetiva (9,89x10⁻¹⁰ m² s⁻¹) indicando que o processo de secagem nessas condições (T = 60 °C, V = 1,05 m s⁻¹, t = 300 s e I = 4500 W) foi mais rápido que nas demais. Este resultado é coerente uma vez que neste ensaio os níveis de temperatura, velocidade do ar, tempo e intensidade da radiação infravermelha foram os mais elevados; ao contrário, os ensaios 1 e 3 foram os que apresentaram os menores valores

Tabela 3. Temperatura do ar (T), velocidade do ar (V), tempo de aplicação da radiação infravermelha (t) e intensidade da radiação infravermelha (I) utilizados nos ensaios e resultados obtidos da difusividade efetiva (D_{ef}), teor de água (TA), atividade de água (a_w) e tempo de secagem (t_s) de grãos de *Moringa oleifera* L

Ensaio	Variáveis independentes				Variáveis dependentes			
	T (°C)	V (m s ⁻¹)	t (s)	I (W)	D_{ef} (m ² s ⁻¹)	TA (% b.u.)	a_w	t_s (s)
1	30	0,55	120	1500	$6,68 \times 10^{-10}$	6,94	0,54	9900
2	60	0,55	120	4500	$8,91 \times 10^{-10}$	3,09	0,38	10800
3	30	1,05	120	4500	$6,44 \times 10^{-10}$	7,40	0,57	10800
4	60	1,05	120	1500	$9,70 \times 10^{-10}$	3,36	0,35	10800
5	30	0,55	300	4500	$8,52 \times 10^{-10}$	3,95	0,36	12312
6	60	0,55	300	1500	$8,74 \times 10^{-10}$	2,50	0,27	12312
7	30	1,05	300	1500	$8,77 \times 10^{-10}$	6,96	0,54	9900
8	60	1,05	300	4500	$9,89 \times 10^{-10}$	2,40	0,31	13500
9	45	0,8	210	3000	$7,31 \times 10^{-10}$	3,50	0,37	14400
10	45	0,8	210	3000	$7,92 \times 10^{-10}$	4,25	0,38	13500
11	45	0,8	210	3000	$7,05 \times 10^{-10}$	3,99	0,41	14400

de difusividade efetiva ($6,68 \times 10^{-10}$ e $6,44 \times 10^{-10}$ m² s⁻¹) fato este obtido devido aos menores níveis dos fatores utilizados.

A análise estatística, apresentada na Tabela 4, confirma a observação citada anteriormente de vez que a temperatura do ar e o tempo de aplicação da radiação infravermelha foram significativos e apresentaram efeito positivo sobre a difusividade efetiva, ou seja, o aumento desses fatores provocou aumento proporcional da resposta. A interação entre temperatura do ar e tempo de aplicação da radiação infravermelha também foi significativa, mas com efeito negativo sobre a difusividade efetiva. Ponkham et al. (2011) realizaram secagem de abacaxi em rodela e observaram que a difusividade efetiva aumentou com a elevação da intensidade da radiação infravermelha (1-5 kW m⁻²) e da temperatura do ar (40-60 °C).

O teor de água e a atividade de água dos grãos ao final das secagens foram maiores nos ensaios 1, 3 e 7, os quais também apresentaram secagens mais rápidas. Isso ocorreu devido aos baixos níveis dos fatores estudados. Por outro lado, os menores teores de água e atividade de água foram verificados nos ensaios 6 e 8, nos quais os níveis dos fatores eram maiores também provocando aumento do tempo de secagem (Tabela 3).

Estatisticamente, apenas a temperatura do ar e o tempo de aplicação da radiação infravermelha foram significativos ($p \leq 0,10$) e com efeito negativo sobre o teor de água. Para a atividade de água, entretanto, além do efeito significativo da temperatura do ar e do tempo de aplicação da radiação infravermelha, a velocidade do ar, a interação entre temperatura e velocidade do ar, assim

Tabela 4. Efeitos principais e interação de primeira ordem dos fatores significativos sobre as respostas difusividade efetiva (m² s⁻¹), teor de água (% b.u.) e atividade de água com nível de confiança de 90%

	Fator	Efeito	Erro padrão	p-valor
D_{ef}	Média	$8,18 \times 10^{-10}$	$2,20 \times 10^{-11}$	0,0000
	T	$1,71 \times 10^{-10}$	$5,17 \times 10^{-11}$	0,0130
	t	$1,05 \times 10^{-10}$	$5,17 \times 10^{-11}$	0,0822
	T x t	$-1,04 \times 10^{-10}$	$5,17 \times 10^{-11}$	0,0849
TA	Média	1,000	0,269	0,0000
	T	-3,475	0,631	0,0006
	t	-1,244	0,631	0,0840
a_w	Média	0,406	0,009	0,0000
	T	-0,176	0,021	0,0004
	V	0,054	0,021	0,0507
	t	-0,085	0,021	0,0104
	T x V	-0,051	0,021	0,0634
	T x I	0,056	0,021	0,0475

D_{ef} - Difusividade efetiva; TA - Teor de água; a_w - Atividade de água

como a interação entre temperatura do ar e intensidade da radiação infravermelha, também foram significativos ($p \leq 0,10$) (Tabela 4). O tempo de secagem dos grãos de *Moringa oleifera* L. variou entre 9900 e 14400 s. Considerou-se que os fatores estudados não apresentaram efeito significativo (90% de confiança) sobre esta resposta, pela análise estatística apresentada na Tabela 4.

A Figura 2 apresenta as curvas de secagem experimentais e preditas pelo modelo de Fick com solução para esfera utilizando-se 10 termos da série.

Verifica-se ajuste satisfatório das curvas preditas pelo modelo de Fick aos dados experimentais, tanto para os pontos fatoriais, como axiais e centrais do planejamento. O êxito no

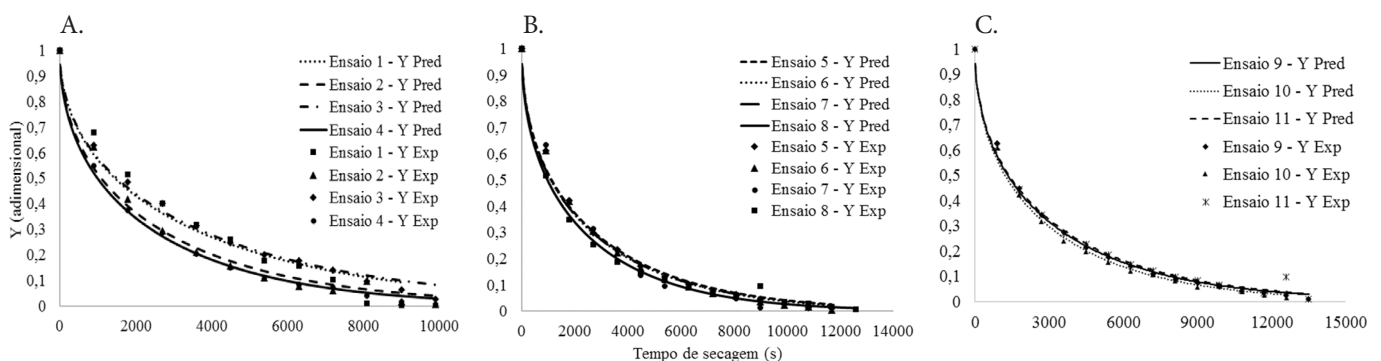


Figura 2. Curvas experimentais (Exp) de secagem e curvas preditas (Pred) pelo modelo de Fick para os pontos fatoriais - ensaios 1 a 4 (A), pontos fatoriais - ensaios 5 a 8 (B) e pontos centrais - ensaios 9 a 11 (C) do planejamento experimental

Tabela 5. Coeficientes dos modelos de Page, Midilli e Newton para os ensaios de secagem de grãos de *Moringa oleifera* L.

Ensaio	Page		Midilli				Newton
	k	y	a	k	n	b	k
1	0,0287	0,9158	1,0010	0,0638	0,6526	-1,25 x10 ⁻⁰³	0,0203
2	0,0505	0,8354	1,0011	0,0505	0,8344	-2,42x10 ⁻⁰⁵	0,0268
3	0,0535	0,7610	1,0002	0,0918	0,5854	-7,70x10 ⁻⁰⁴	0,0198
4	0,0761	0,7492	1,0001	0,0986	0,6651	-2,76x10 ⁻⁰⁴	0,0292
5	0,0572	0,7960	1,0010	0,0641	0,7609	-8,93x10 ⁻⁰⁵	0,0257
6	0,0530	0,8193	1,0005	0,0592	0,7855	-8,43x10 ⁻⁰⁵	0,0262
7	0,0432	0,8723	1,0004	0,0454	0,8567	-5,04x10 ⁻⁰⁵	0,0263
8	0,1138	0,6530	1,0007	0,1193	0,6382	-3,40x10 ⁻⁰⁵	0,0308
9	0,0604	0,7545	1,0009	0,0697	0,7118	-1,03x10 ⁻⁰⁴	0,0222
10	0,0694	0,7357	1,0015	0,0746	0,7141	-5,23x10 ⁻⁰⁵	0,0242
11	0,0725	0,7053	1,0002	0,0743	0,6982	-1,73x10 ⁻⁰⁵	0,0217

Tabela 6. Coeficientes de determinação (R²), qui-quadrado reduzido (χ^2) e raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE) dos modelos de Page, Midilli e Newton para os ensaios de secagem de grãos de *Moringa oleifera* L.

Ensaio	Fick			Page			Midilli			Newton		
	R ²	χ^2	RMSE	R ²	χ^2	RMSE	R ²	χ^2	RMSE	R ²	χ^2	RMSE
1	0,9798	0,0034	0,0582	0,9983	0,0012	0,0318	0,9989	0,0003	0,0139	0,9929	0,0013	0,0346
2	0,9911	0,0014	0,0378	0,9983	0,0003	0,0165	0,9983	0,0004	0,0164	0,9950	0,0009	0,0544
3	0,9935	0,0009	0,0306	0,9970	0,0005	0,0274	0,9996	0,0001	0,0294	0,9854	0,0001	0,0294
4	0,9968	0,0005	0,0220	0,9989	0,0002	0,0214	0,9998	0,0001	0,0210	0,9895	0,0017	0,0516
5	0,9953	0,0007	0,0264	0,9997	0,0001	0,0262	0,9999	0,0000	0,0256	0,9936	0,0010	0,0523
6	0,9946	0,0008	0,0285	0,9998	0,0000	0,0287	1,0000	0,0000	0,0282	0,9953	0,0008	0,0515
7	0,9898	0,0017	0,0412	0,9990	0,0002	0,0393	0,9991	0,0002	0,0392	0,9968	0,0006	0,0567
8	0,9960	0,0005	0,0227	0,9986	0,0002	0,0180	0,9986	0,0002	0,0176	0,9803	0,0027	0,0461
9	0,9967	0,0005	0,0212	0,9996	0,0001	0,0216	0,9999	0,0000	0,0206	0,9890	0,0016	0,0538
10	0,9968	0,0004	0,0208	0,9996	0,0001	0,0197	0,9997	0,0001	0,0191	0,9877	0,0018	0,0528
11	0,9956	0,0006	0,0237	0,9979	0,0003	0,0176	0,9979	0,0004	0,0172	0,9809	0,0026	0,0549

ajuste obtido pelo modelo de Fick ocorreu devido a secagem de grãos de *Moringa oleifera* L. ter ocorrido no período de taxa decrescente no qual a maior resistência à transferência de calor e massa ocorre do interior do produto para a superfície sendo, portanto, a difusão o principal mecanismo a governar o movimento de água.

O modelo da segunda lei de Fick tem sido utilizado para determinar a difusividade efetiva em processos de secagem com a aplicação da radiação infravermelha de diversos produtos, como: fatias de maçã (Togrul, 2005), subprodutos industriais de uva (Celma et al., 2009), fatias de batata doce (Doymaz, 2011).

Os dados experimentais da secagem também foram usados para prever as características da secagem de grãos de *Moringa oleifera* L. utilizando-se os modelos de Page, Midilli e Newton. Na Tabela 5 se encontram os coeficientes desses modelos obtidos para as condições de secagem de cada ensaio.

Os resultados estatísticos para análise do ajuste dos modelos estão apresentados na Tabela 6, sendo que a seleção do melhor modelo foi baseada no maior R² e menor χ^2 e RMSE. Desta forma, os modelos de Page e Midilli explicaram mais de 99% da variação dos dados experimentais, o modelo de Newton apresentou R² entre 98,03 e 99,68% e o modelo da segunda lei de Fick obteve coeficiente de determinação (R²) de 98% para o ensaio 1 e de 99% para os demais ensaios; assim, considera-se que os quatro modelos estudados apresentaram ótimos coeficientes de determinação.

Dentre os quatro modelos o ajuste aos dados experimentais obtido pelo modelo de Midilli foi o melhor para a secagem de grãos de *Moringa oleifera* L., de vez que apresentou os maiores valores de R² e os menores valores de χ^2 e RMSE.

CONCLUSÕES

1. A temperatura do ar e o tempo de aplicação da radiação infravermelha apresentaram efeito significativo sobre a difusividade efetiva, teor de água e atividade de água de grãos de *Moringa oleifera* L.

2. A difusividade efetiva obtida na secagem de grãos de *Moringa oleifera* L. variou entre 6,44x10⁻¹⁰ e 9,89x10⁻¹⁰ m² s⁻¹.

3. O modelo da segunda lei de Fick apresentou ótimo desempenho para descrever o comportamento da secagem de grãos de *Moringa oleifera* L. sob as condições estudadas.

4. O modelo de Midilli apresentou melhor ajuste aos dados experimentais sendo recomendado na representação de processos de secagem de grãos de *Moringa oleifera* L. nas condições estudadas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à CAPES, ao FAEPEX e à CPG/FEAGRI, pelo auxílio financeiro, CATI de Marília, SP, e ao Eng. Agrônomo Eduardo Gazola.

LITERATURA CITADA

- Abe, T.; Afzal, T. M. Thin-layer infrared radiation drying of rough rice. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v.67, p.289-297, 1997. <http://dx.doi.org/10.1006/jaer.1997.0170>
- Afzal, T. M.; Abe, T. Diffusion in potato during far infrared radiation drying. *Journal of Food Engineering*, v.37, p.353-365, 1998. [http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00111-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00111-3)

- Arantes, C. C. Utilização de coagulantes naturais à base de sementes de *Moringa oleifera* e tanino como auxiliares da filtração em mantas não tecidas. Campinas: UNICAMP, 2010. 109p. Dissertação Mestrado
- Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para análise de sementes. Secretaria de Defesa Agropecuária, Brasília: MAPA/ACS, 2009. 398p.
- Celma, A. R.; López-Rodríguez, F.; Blázquez, F. C. Experimental modeling of infrared drying of industrial grape by-products. *Food and Bioproducts Processing*, v.87, p.247-253, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fbp.2008.10.005>
- Doymaz, I. Thin-layer drying characteristics of sweet potato slices and mathematical modelling. *Heat Mass Transfer*, v.47, p.277-285, 2011. <http://dx.doi.org/10.1007/s00231-010-0722-3>
- Franco, M. Uso de coagulante extraído de sementes de *Moringa oleifera* como auxiliar no tratamento de água por filtração em múltiplas etapas. Campinas: UNICAMP, 2010. 90p. Dissertação Mestrado
- Hassini, L.; Azzouz, S.; Peczalski, R.; Belghith, A. Estimation of potato moisture diffusivity from convective drying kinetics with correction for shrinkage. *Journal of Food Engineering*, v.79, p.47-56, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.025>
- Katayon, S.; Noor, M. J. M. M.; Asma, M.; Ghani, L. A. A.; Thamer, A. M.; Azni, I.; Ahmad, J.; Khor, B. C.; Suleyman, A. M. Effects of storage conditions of *Moringa oleifera* seeds on its performance in coagulation. *Bioresource Technology*, v.97, p.1455-1460, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2005.07.031>
- Markowski, M.; Sobieski, W.; Konopka, I.; Tanska, M.; Białobrzewski, I. Drying characteristics of barley grain dried in a spouted-bed and combined ir-convection dryers. *Drying Technology*, v.25, p.1621-1632, 2007. <http://dx.doi.org/10.1080/07373930701590715>
- Ndabigengesere, A.; Narasiah, K. S.; Talbot, B. G. Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*. *Water Research*, v.29, p.703-710, 1995. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)00161-Y](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1354(94)00161-Y)
- Nindo, C.; Mwithiga, G., Infrared drying. In: Pan, Z.; Atungulu, G. G. *Infrared heating for food and agricultural processing*. New York: CRC Press, Cap. 5, 2011. p.89-97.
- Oliveira, R. A. Estudo da secagem em dois tipos de secadores: Avaliação dos parâmetros operacionais e comportamento do material seco. Campinas: UNICAMP, 2009. 218p. Tese Doutorado
- Ponkham, K.; Meeso, N.; Soponronnarit, S.; Siriamornpun, S. Modeling of combined far-infrared radiation and air drying of a ring shaped-pineapple with/without shrinkage. *Food and Bioproducts Processing*, v.90, p.155-164, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fbp.2011.02.008>
- Puente-Díaz, L.; Ah-Hen, K.; Vega-Gálvez, A.; Lemus-Mondaca, R.; Di Scala, K. Combined infrared-convective drying of murta (*Ugni molinae* Turcz) berries: Kinetic modeling and quality assessment. *Drying Technology*, v.31, p.329-338, 2013. <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2012.736113>
- Resende, O.; Ullmann, R.; Siqueira, V. C.; Chaves, T. H.; Ferreira, L. U. Modelagem matemática e difusividade efetiva das sementes de pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) durante a secagem. *Engenharia Agrícola*, v.31, p.1123-1135, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162011000600010>
- Sakai, N.; Mao, W. Infrared heating. In: Sun, D. (ed.) *Thermal food processing: New technologies and quality issues*. New York: CRC Press, Cap.16, 2006. p.493-522.
- Sandu, C. Infrared radiative drying in food engineering: A process analysis. *Blotechnology Progress*, v.2, p.109-119, 1986. <http://dx.doi.org/10.1002/btpr.5420020305>
- Sharma, G. P.; Verma, R. C.; Pathare, P. B. Thin-layer infrared radiation drying of onion slices. *Journal of Food Engineering*, v.67, p.361-366, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.002>
- Srikiatden, J.; Roberts, J. S. Measuring moisture diffusivity of potato and carrot (core and cortex) during convective hot air and isothermal drying. *Journal of Food Engineering*, v.74, p.143-152, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.02.026>
- Supmoon, N.; Noomhorm, A. Influence of combined hot air impingement and infrared drying on drying kinetics and physical properties of potato chips. *Drying Technology*, v.31, p.24-31, 2013. <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2012.711792>
- Togrul, H. Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices. *Journal of Food Engineering*, v.71, p.311-323, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.03.031>