

CINÉTICA DE SECAGEM DE GRÃOS DE ABÓBORA

ADELINO DE MELO GUIMARÃES DIÓGENES², ALEXANDRE JOSÉ DE MELO QUEIROZ³, ROSSANA MARIA FEITOSA DE FIGUEIRÉDO^{3*}, DYEGO DA COSTA SANTOS³

RESUMO - O objetivo do trabalho foi estudar a secagem de grãos inteiros de abóbora, grãos de abóbora sem tegumento e farinha de grãos de abóbora, em estufa com circulação forçada de ar, nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C e ajustar os modelos matemáticos de Aproximação da Difusão, Exponencial, Dois Termos, Henderson e Pabis, Logarítmico e Page, aos dados experimentais. O ajuste dos modelos matemáticos aos dados das cinéticas de secagem foi realizado através de análise de regressão não-linear, pelo método Quasi-Newton, utilizando-se o programa computacional *Statistica 5.0*. Como critério de ajuste dos modelos utilizou-se o coeficiente de determinação e o desvio quadrático médio. Observou-se que o processamento influenciou nos tempos de secagens, onde as amostras de farinha de grãos de abóbora demoraram menor intervalo de tempo para atingir o equilíbrio. Para as amostras de grãos inteiros e sem tegumento, o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais foi o de Aproximação da Difusão, em todas as temperaturas estudadas; quanto às amostras de farinha de grãos, o modelo Logarítmico foi o que melhor se ajustou às curvas de secagem.

Palavras-chave: *Cucurbita moschata*. Subproduto. Desidratação. Modelagem matemática.

DRYING KINETIC OF PUMPKINS GRAINS

ABSTRACT - The objective this work was to study the drying of integers grains of pumpkin, grains without tegument and grain flour of pumpkin in an oven with forced air circulation at temperatures of 40, 50, 60, 70 and 80 °C and adjust the mathematical models of the Diffusion Approximation, Two Term Exponential, Henderson and Pabis, Logarithmic and Page, to the experimental values. The fit of the mathematical models to data from the drying kinetics was performed using analysis of nonlinear regression, through Quasi-Newton method, using the software *Statistica 5.0*. As a criterion for adjustment of the models the coefficient of determination and mean-square deviation were used. It was observed that processing influenced the time of drying, where the samples of grain flour of pumpkin demanded a shortest time to reach equilibrium. For samples of integers grains of pumpkin and grains without tegument, the model that best fitted the experimental data was of the Diffusion Approximation at all temperatures studied; for samples of grain flour, the logarithmic model was the best fit to drying curve.

Keywords: *Cucurbita moschata*. Subproduct. Dehydration. Mathematical modeling.

* Autor para correspondência.

Recebido para publicação em 17/04/2012; aceito em 05/11/2013

Parte da Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola do primeiro autor.

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, *Campus Afogados da Ingazeira*. Sítio Campinhos, s/n, 56800-000, Afogados da Ingazeira, PE, Brasil; adelinoguimaraes@hotmail.com

³Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, UFCG. Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, 58429-970, Campina Grande, PB, Brasil; alex@deag.ufcg.edu.br; rossana@deag.ufcg.edu.br; dyego.csantos@gmail.com

INTRODUÇÃO

No intuito de diminuir perdas de alimentos, partes não convencionais de frutas e hortaliças, como sementes e casca, têm sido introduzidas como ingredientes em algumas formulações, com a finalidade de enriquecer a dieta habitual. Isto faz com que sementes ou grãos de várias espécies vegetais se tornem fontes alternativas de proteínas e de outros nutrientes para a alimentação humana como, por exemplo, as de abóbora.

Os grãos de abóbora podem ser utilizados para consumo na forma de farinha ou simplesmente torrados; também podem ser destinados a produção de óleo e como ingrediente culinário. Além do gosto agradável são ricos em nutrientes, especialmente ferro (10,9 mg/100 g), proteínas (320 g/kg) e óleo (450 g/kg), sendo incorporados mundialmente à conhecida “multimistura” (BRASIL, 2005; DVOR-KIN; SONG, 2002).

A exploração comercial dos grãos de abóbora exige conhecimentos sobre a armazenabilidade e cuidados na secagem para garantir a qualidade do produto. A secagem é uma forma de minimizar perdas, possibilitando o transporte, o armazenamento e aumentando a vida útil, garantindo a viabilidade econômica e segurança microbiológica pela eliminação da água do material, através da evaporação. Park et al. (2001) relataram que as vantagens de se utilizar o processo de secagem são várias, dentre as quais se tem: facilidade na conservação do produto, estabilidade dos componentes aromáticos a temperatura ambiente por longos períodos de tempo, proteção contra degradação enzimática e oxidativa, redução do seu peso e economia de energia.

Vários trabalhos já foram desenvolvidos para avaliar a secagem de diversos tipos de grãos e sementes: Sacilik (2007) estudaram a secagem de grãos de abóbora (*C. pepo* L.); Corrêa et al. (2007) investigaram a secagem de grãos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.); Hacıhafizoglu et al. (2008) pesquisaram a cinética de secagem em camada fina de grãos de arroz (*Oryza sativa* L.); Costa et al. (2011) e Faria et al. (2012) estudaram a modelagem matemática da secagem de sementes de crambe (*Crambe abyssinica*); Sousa et al. (2011) pesquisaram a cinética de secagem de sementes de nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). Apesar da grande diversidade de pesquisas envolvendo grãos e sementes, na literatura não estão disponíveis trabalhos que abordem o efeito da temperatura na cinética de secagem de grãos de abóbora processados para consumo direto e indireto, o que torna importante o presente estudo.

Considerando a importância da redução do desperdício de alimentos e o aproveitamento dos grãos de abóbora, ressalta-se a necessidade de se estudar métodos de conservação dos mesmos através da secagem. Ante o exposto, objetivou-se com este trabalho estudar a secagem de grãos de abóbora em

diferentes temperaturas e ajustar modelos matemáticos aos dados experimentais da cinética de secagem.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizadas abóboras (*Cucurbita moschata* Duchesne), variedade jacarezinho, adquiridas na Empresa Paraibana de Abastecimento e Serviços Agrícolas (EMPASA), em Campina Grande, PB. Os frutos foram transportados ao laboratório, onde foram selecionados, higienizados, e em seguida abertos para remoção dos grãos, juntamente com a mucilagem que os envolve. Os grãos foram lavados em água corrente para retirada da mucilagem, após esta etapa foi eliminado o excesso de água superficial dos grãos deixando-os expostos ao ambiente em bancada de laboratório, a seguir foram acondicionados em sacos de polietileno de baixa densidade, contendo aproximadamente 100 g em cada embalagem, e armazenados em freezer a -22 °C onde permaneceram até o momento da realização dos ensaios.

Os grãos de abóbora foram estudados em três diferentes tipos de amostras: grãos inteiros (designados de GI), grãos sem tegumento (designados de GST) e farinha de grãos (designado de FG). As amostras GST foram obtidas mediante retirada do tegumento com auxílio de espátula de aço inoxidável, e as amostras FG obtidas por trituração dos grãos em moinho de facas. As amostras avaliadas neste estudo são as apresentações mais prováveis de comercialização dos grãos de abóbora.

As amostras GI, GST e FG foram secadas em quadruplicata, em camada fina, utilizando-se estufa com circulação forçada de ar, nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C, e velocidade do ar de secagem de aproximadamente 1 m s⁻¹.

Na cinética de secagem, aproximadamente 47 g de amostra foram pesadas e conduzidas à secagem em estufa, onde se acompanhou a perda de massa durante o processo de desidratação até que as amostras atingissem massa constante; as pesagens das amostras foram realizadas em intervalos regulares de 5, 10, 15, 30, 60, 120 e 180 min. Quando as amostras atingiram massa constante determinou-se o teor de água de equilíbrio em estufa a 105 °C por 24 h (BRASIL, 2005).

A partir dos dados de perda de massa das amostras durante as secagens e dos teores de água de equilíbrio, foram calculadas as razões de água (Equação 1) e construídas as curvas de razão de água em função do tempo de secagem.

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e}$$

Em que:

RX – razão de água do produto (adimensional),

X – teor de água do produto,

X_i – teor de água inicial do produto,
 X_e – teor de água de equilíbrio do produto.

Os modelos matemáticos de Aproximação da Difusão, Exponencial Dois Termos, Henderson e Pabis, Logarítmico e Page (Tabela 1) foram ajusta-

dos aos dados experimentais da cinética de secagem das amostras GI, GST e FG. Para o ajuste dos diferentes modelos, utilizou-se o programa computacional *Statistica 5.0* por meio de análise de regressão não linear.

Tabela 1. Modelos matemáticos ajustados à cinética de secagem dos grãos de abóbora.

Designação do modelo matemático	Equação	Referência
Aproximação da Difusão	$RX = a.exp(-k.t) + (1 - a).exp(-k.b.t)$	Hacihafizoglu et al. (2008)
Exponencial Dois Termos	$RX = a.exp(-k.t) + (1 - a).exp(-k.a.t)$	Faria et al. (2012)
Henderson e Pabis	$RX = a.exp(-k.t)$	Sousa et al. (2011)
Logarítmico	$RX = a.exp(-k.t) + c$	Costa et al. (2011)
Page	$RX = exp(-k.t^n)$	Sacilik (2007)

em que: RX - razão de água (adimensional); a, b, c, k, n - constantes do modelo; t - tempo (min).

Para avaliar a qualidade dos ajustes dos diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais, utilizaram-se como critérios de ajuste a análise do coeficiente de determinação (R^2) e do desvio quadrático médio (DQM), conforme descrito na Equação 2.

$$DQM = \sqrt{\frac{\sum(RX_{pred} - RX_{exp})^2}{n}}$$

em que:

- DQM – desvio quadrático médio,
- RX_{pred} – razão de água predito pelo modelo,
- RX_{exp} – razão de água experimental,
- n – número de observações.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresentam-se, na Figura 1, os pontos experimentais da secagem dos grãos de abóbora inteiros (GI) nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C, expressos através da razão de água em função do tempo de secagem. Pode-se observar correlação entre a temperatura e a velocidade de secagem, onde as maiores velocidade de remoção de água foram detectadas nas amostras desidratadas nas maiores temperaturas, fato normalmente observado em outros produtos agrícolas (BABALIS; BELESSIOTIS, 2004; MOHAPATRA; RAO, 2005; ANDRADE et al., 2006; SACILIK, 2007; COSTA et al., 2011; SANTOS et al., 2013).

Os tempos decorridos para a cinética de secagem foram de 1260, 1230, 1110, 960 e 725 min para as temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C, respectivamente. O valor médio do teor de água inicial foi de

24,79 ± 0,02% b.u. (32,99% b.s.) e o teor água ao final da secagem foi de 2,80 ± 0,01% b.u. (2,94% b.s). Sacilik (2007) encontraram tempos de secagens inferiores aos observados no presente trabalho, ao desidratarem grãos de abóbora (*Cucurbita pepo* L.) em secador convencional nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C e velocidade do ar de secagem de 0,8 m s⁻¹. Os tempos encontrados foram de 540, 450 e 360 min para as secagens nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C, respectivamente. Essas diferenças nos tempos de secagem podem estar relacionadas com as características físicas e químicas dos produtos, que variam em função das variedades, condições de cultivo e clima e também com o teor de água inicial.

Na Tabela 2 têm-se os parâmetros de ajuste

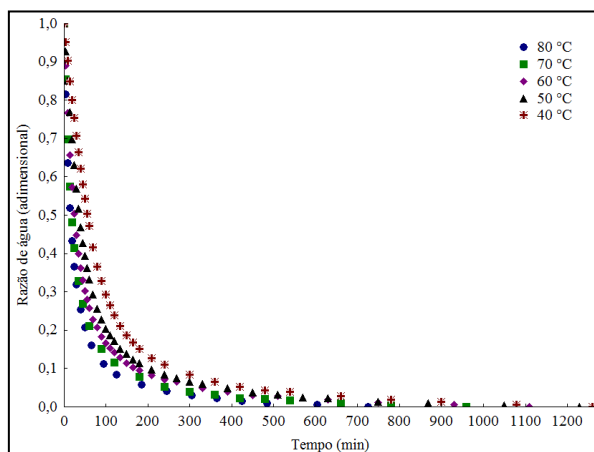


Figura 1. Curvas de secagem de grãos inteiros (GI) de abóbora nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C.

dos modelos de Aproximação da Difusão, Exponencial Dois Termos, Henderson e Pabis, Logarítmico e Page aos dados da cinética de secagem dos grãos inteiros de abóbora (GI), os seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos

Tabela 2. Parâmetros dos diferentes modelos matemáticos, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM), na predição da cinética de secagem dos grãos inteiros de abóbora (GI) nas temperaturas de 80, 70, 60, 50 e 40 °C.

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetro					R^2	DQM
		a	b	c	k	n		
Aproximação da Difusão	80	0,7745	0,1239	-	0,0583	-	0,9995	0,0073
	70	0,7678	0,1185	-	0,0492	-	0,9993	0,0081
	60	0,7725	0,1259	-	0,0369	-	0,9994	0,0061
	50	0,8266	0,1404	-	0,0234	-	0,9990	0,0089
	40	0,895	0,143	-	0,0139	-	0,9986	0,0118
Exponencial Dois Termos	80	0,2712	0,1011	-	-	-	0,9896	0,0292
	70	0,2737	0,0825	-	-	-	0,9883	0,0321
	60	0,2771	0,0607	-	-	-	0,9819	0,0348
	50	0,3258	0,0372	-	-	-	0,9914	0,0262
	40	0,0062	1,8765	-	-	-	0,9937	0,0246
Henderson e Pabis	80	0,9518	-	-	0,0353	-	0,9805	0,0399
	70	0,9569	-	-	0,0296	-	0,9798	0,0422
	60	0,9267	-	-	0,0207	-	0,9678	0,0465
	50	0,9677	-	-	0,0163	-	0,9832	0,0366
	40	0,9983	-	-	0,0117	-	0,9937	0,0246
Logarítmico	80	0,9301	-	0,0388	0,0397	-	0,9890	0,0299
	70	0,9352	-	0,0389	0,0334	-	0,9885	0,0319
	60	0,9097	-	0,0574	0,0258	-	0,9860	0,0306
	50	0,948	-	0,0458	0,0189	-	0,9929	0,0237
	40	0,9768	-	0,0356	0,0129	-	0,9974	0,0159
Page	80	-	-	-	0,0878	0,7350	0,9922	0,0253
	70	-	-	-	0,0754	0,7339	0,9906	0,0288
	60	-	-	-	0,0663	0,7186	0,9880	0,0284
	50	-	-	-	0,0346	0,8227	0,9902	0,0280
	40	-	-	-	0,0152	0,9396	0,9945	0,0230

Observa-se que todos os modelos apresentaram bons ajustes aos dados experimentais de secagem, com R^2 superiores a 0,96, podendo ser utilizados na predição da cinética de secagem dos grãos inteiros de abóbora. Dentre os modelos, o de Aproximação da Difusão foi considerado o melhor para estimar as curvas de cinética de secagem das amostras de grãos inteiros (GI) de abóbora em todas as temperaturas, apresentando os menores valores de DQM ($< 0,002$) e os maiores R^2 ($> 0,99$). Corrêa et al. (2007), Hacıhafızoglu et al. (2008) e Costa et al. (2011) também verificaram coeficientes de determinação superiores a 0,99 ao estudarem a secagem de grãos de feijão, grãos de arroz e sementes de crame, respectivamente.

O parâmetro “k” dos modelos Aproximação da Difusão, Henderson e Pabis, Logarítmico e Page, aumentou com o aumento da temperatura de seca-

gem, comportamento também verificado por Doy-maz (2005), para a secagem em camada fina de feijão verde a 50, 60 e 70 °C, e por Corrêa et al. (2001) ao secarem milho-pipoca nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C. Segundo Corrêa et al. (2007), a constante de secagem “k” representa o efeito das condições externas de secagem e a constante “n” reflete a resistência interna do produto à secagem. Então, baseado neste entendimento, constata-se que a constante n do modelo de Page na temperatura de 40 °C apresentou a maior resistência do produto à secagem.

Na Tabela 3 estão apresentadas as tendências de distribuição de resíduos para os diferentes modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais da cinética de secagem de grãos de abóbora inteiros (GI). Observa-se que o modelo de Aproximação da Difusão apresentou distribuição aleatória dos resí-

duos para a faixa de temperatura de 50 a 80 °C, resultando assim em melhor ajuste aos dados experimentais da secagem e confirmando a análise feita através do R^2 e DQM. Faria et al. (2012) constataram comportamento aleatório para o modelo de Aproximação da Difusão, ao estudarem a secagem de sementes de crambe com teor de água de 28% b.s., para a faixa de temperatura de 40 a 70 °C. Os demais mo-

delos matemáticos avaliados apresentaram distribuição tendenciosa dos resíduos. Segundo Goneli (2011), um modelo é considerado aleatório se os valores residuais não formarem figuras definidas, não indicando tendenciosidade dos resultados. Se apresentar distribuição tendenciosa, o modelo é considerado como inadequado para representar o fenômeno em questão.

Tabela 3. Tendência de distribuição de resíduos para os modelos ajustados aos pontos experimentais da cinética de secagem dos grãos de abóbora inteiros (GI).

Modelo matemático	Temperatura (°C)				
	80	70	60	50	40
Aproximação da Difusão	Aleatório	Aleatório	Aleatório	Aleatório	Tendencioso
Exponencial Dois Termos	Tendencioso	Tendencioso	Tendencioso	Tendencioso	Tendencioso
Henderson e Pabis	Tendencioso	Tendencioso	Tendencioso	Tendencioso	Tendencioso
Logarítmico	Tendencioso	Tendencioso	Tendencioso	Tendencioso	Tendencioso
Page	Tendencioso	Tendencioso	Tendencioso	Tendencioso	Tendencioso

A Figura 2 apresenta os dados de razão de água (RX), experimentais e estimados, construída empregando-se o modelo de Aproximação da Difusão para as temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C. Observa-se bom ajuste do modelo ajustado aos dados experimentais da secagem de grãos de abóbora inteiros (GI), onde os dados experimentais encontram-se próximos à reta que passa pela origem, que teoricamente representa a igualdade entre os valores

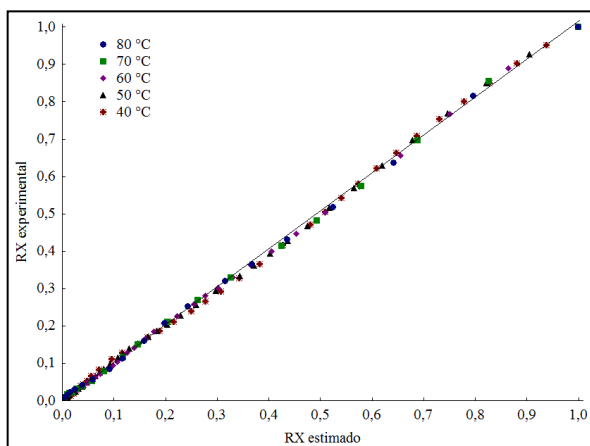


Figura 2. Relação entre os valores experimentais e estimados da razão de água pelo modelo de Aproximação da Difusão para a cinética de secagem de grãos inteiros de abóbora (GI) nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C.

Estão apresentados, na Figura 3, os pontos experimentais da cinética de secagem das amostras de grãos de abóbora sem tegumento (GST) nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C, expressos através da razão de água em função do tempo de secagem.

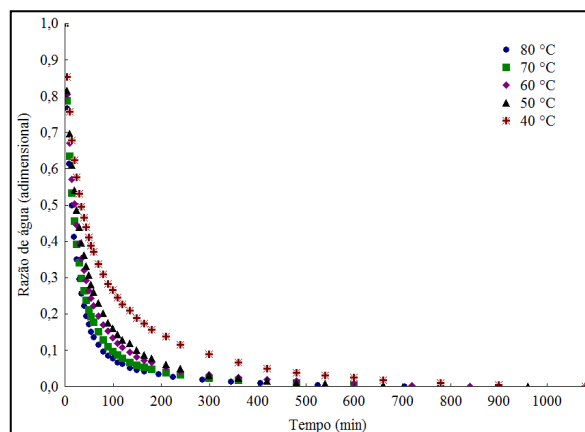


Figura 3. Curvas de secagem em estufa de grãos sem tegumento (GST) nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C.

Conforme observado para as amostras de GI, observa-se que os grãos de abóbora sem tegumento (GST) desidratados nas maiores temperaturas demoraram menor intervalo de tempo para atingirem o teor de água de equilíbrio. Os tempos de secagem das amostras GST foram de 1080, 960, 840, 780 e 705 min para as temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C, respectivamente, onde o teor de água inicial médio foi de $21,48 \pm 0,02\%$ b.u. (27,34% b.s.) e o do teor de água final de $2,55 \pm 0,01\%$ b.u. (2,64% b.s.).

Constata-se que os tempos de secagem das amostras GST foram inferiores aos das amostras GI, quando comparados na mesma temperatura de secagem, ficando evidente que a retirada do tegumento facilitou a transferência de massa, acelerando a perda de água.

Silva e Marsaioli Júnior (2004), Carneiro et al. (2005), Carlesso et al. (2007) e Santos et al. (2013), estudaram a secagem de amêndoas de castanhas do Brasil (*Bertholletia excelsa*), grãos de trigo, sementes de maracujá amarelo e farinha de grãos

residuais de urucum, respectivamente, e evidenciaram que o teor de água e o tempo de secagem diminuem consideravelmente com o aumento da temperatura de secagem.

Apresentam-se, na Tabela 4, os parâmetros de ajuste dos modelos Aproximação da Difusão, Expo-

nencial Dois Termos, Henderson e Pabis, Logarítmico e Page, aos dados experimentais da cinética de secagem das amostras de GST, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM).

Tabela 4. Parâmetros dos diferentes modelos matemáticos, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM), na predição da cinética de secagem dos grãos sem tegumento (GST) nas temperaturas de 80, 70, 60, 50 e 40 °C.

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetro					R^2	DQM
		a	b	c	k	n		
Aproximação da Difusão	80	0,7589	0,1824	-	0,0624	-	0,9994	0,0062
	70	0,6790	0,1828	-	0,0627	-	0,9992	0,0070
	60	0,6071	0,1697	-	0,0613	-	0,9989	0,0081
	50	0,5402	0,1698	-	0,0603	-	0,9991	0,0076
	40	0,5175	0,1243	-	0,0484	-	0,9990	0,0084
Exponencial Dois Termos	80	0,2707	0,1197	-	-	-	0,9911	0,0229
	70	0,2550	0,1004	-	-	-	0,9876	0,0272
	60	0,2405	0,0881	-	-	-	0,9834	0,0317
	50	0,2315	0,0793	-	-	-	0,9848	0,0311
	40	0,2123	0,0575	-	-	-	0,9697	0,0451
Henderson e Pabis	80	0,9270	-	-	0,0360	-	0,9809	0,0335
	70	0,9086	-	-	0,0300	-	0,9758	0,0380
	60	0,8870	-	-	0,0238	-	0,9717	0,0414
	50	0,8797	-	-	0,0203	-	0,9746	0,0402
	40	0,8441	-	-	0,0123	-	0,9635	0,0495
Logarítmico	80	0,9141	-	0,0383	0,0417	-	0,9916	0,0222
	70	0,8953	-	0,0438	0,0356	-	0,9885	0,0261
	60	0,8738	-	0,0459	0,0286	-	0,9844	0,0308
	50	0,8666	-	0,0413	0,0238	-	0,9837	0,0323
	40	0,8230	-	0,0541	0,0152	-	0,9752	0,0407
Page	80	-	-	-	0,0952	0,7379	0,9959	0,0155
	70	-	-	-	0,0945	0,7057	0,9963	0,0148
	60	-	-	-	0,0906	0,6774	0,9971	0,0133
	50	-	-	-	0,0807	0,6798	0,9984	0,0101
	40	-	-	-	0,0747	0,6238	0,9981	0,0114

Observa-se que o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais foi o de Aproximação da Difusão, revelando os maiores valores de R^2 (> 0,99) e os menores valores de DQM (<0,009). No entanto, todos os outros modelos ajustados também podem ser usados para estimar as curvas de cinética de secagem das amostras GST, em razão de terem apresentado $R^2 > 0,96$ e DQM < 0,05. Silva et al. (2008) obtiveram valores de R^2 superiores a 0,99 ao ajustarem o modelo de Aproximação da Difusão às

curvas de secagem do feijão sempre-verde nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C.

Pode-se observar que os valores de “k” aumentaram com o aumento da temperatura em todos os modelos avaliados, assim como os valores de “a” e “n”; no entanto, os parâmetros “b” e “c” não tiveram o mesmo comportamento. Kingsly e Singh (2007), Nishiyama et al. (2006), e Tarigan et al. (2007) também constataram que os valores de “k” aumentaram com o aumento da temperatura, apontando-a como o principal fator de influência na

cinética de secagem de sementes de romã, trigo, arroz e nozes, respectivamente.

Brooker (1992) relata que, em geral, o parâmetro “k” representa o efeito das condições externas de secagem enquanto os parâmetros “a”, “b”, “c” e “n” refletem a extensão da resistência interna do produto à secagem, para determinadas condições externas.

Podem-se observar na Tabela 5, as tendências de distribuição de resíduos para os diferentes mode-

los matemáticos ajustados aos dados experimentais da cinética de secagem de grãos de abóbora sem tegumento (GST). Constatou-se que o modelo de Aproximação da Difusão revelou distribuição aleatória dos resíduos para todas as temperaturas estudadas, resultando assim em melhor ajuste aos dados experimentais da secagem. Costa et al. (2011) secaram sementes de crambe e verificaram comportamento aleatório, para o modelo de Aproximação da Difusão, apenas para as temperaturas de 30 e 40 °C.

Tabela 5. Tendência de distribuição de resíduos para os modelos ajustados aos pontos experimentais da cinética de secagem dos grãos de abóbora sem tegumento (GST).

Modelo matemático	Temperatura (°C)				
	80	70	60	50	40
Aproximação da Difusão	Aleatório	Aleatório	Aleatório	Aleatório	Aleatório
Exponencial Dois Termos	Aleatório	Tendencioso	Tendencioso	Tendencioso	Tendencioso
Henderson e Pabis	Tendencioso	Tendencioso	Tendencioso	Tendencioso	Tendencioso
Logarítmico	Aleatório	Tendencioso	Tendencioso	Tendencioso	Tendencioso
Page	Aleatório	Tendencioso	Aleatório	Aleatório	Aleatório

Na Figura 4 podem-se observar os dados de razão de água (RX), experimentais e estimados, dos grãos de abóbora sem tegumento (GST) construída empregando-se o modelo de Aproximação da Difusão para as temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C. Constata-se ajuste adequado do modelo aos dados experimentais da secagem de grãos de abóbora sem tegumento (GST).

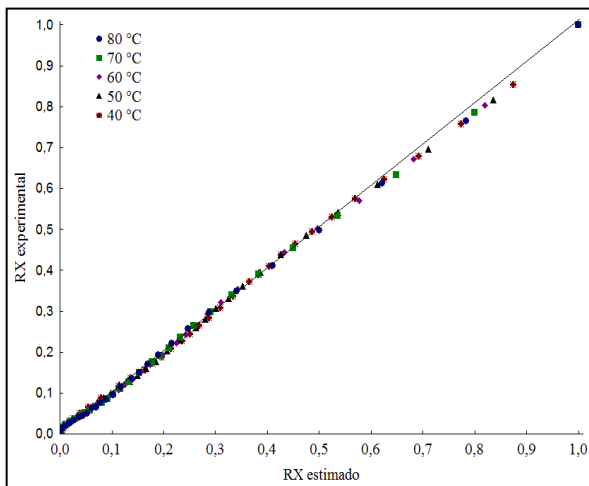


Figura 4. Relação entre os valores experimentais e estimados de razão de teor de água pelo modelo de Aproximação da Difusão para a cinética de secagem de grãos de abóbora sem tegumento (GST) nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C.

Na Figura 5 são apresentados os pontos experimentais da razão de água em função do tempo de secagem das amostras de farinha de grãos de abóbora (FG) nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C. Observa-se que a velocidade de secagem se acentua com o aumento da temperatura, concordando com os

inúmeros resultados relatados na literatura (MOHAPATRA; RAO, 2005; ABALONE et al., 2006; LUZ et al., 2006; KASHANINEJAD et al., 2007; ALMEIDA et al., 2009).

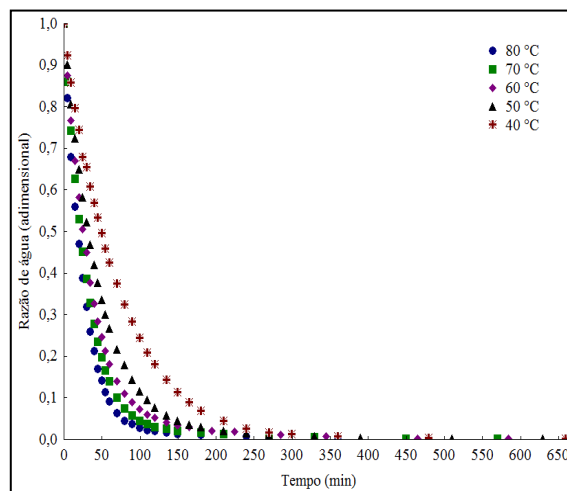


Figura 5. Curvas de secagem em estufa da farinha de grãos de abóbora (FG) nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C.

Os teores de água ao final da secagem de $0,76 \pm 0,03\%$, $1,6 \pm 0,02\%$, $1,64 \pm 0,03\%$, $2,28 \pm 0,04\%$ e $3,76 \pm 0,04\%$ (b.s.) atingidos nos tempos de 660, 630, 585, 570 e 480 min, para as temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C, respectivamente.

Comparando-se os tempos de secagem das amostras FG com os tempos das amostras GI e GST, ratifica-se que o processamento influenciou diretamente na secagem, onde quanto maior a intensidade do processo efetuado no grão de abóbora, menor o tempo de secagem.

Apresentam-se, na Tabela 6, os parâmetros de ajuste dos modelos de Aproximação da Difusão, Exponencial Dois Termos, Henderson e Pabis, Logarítmico e Page, aos dados da cinética de secagem em

estufa das amostras de farinha de grãos de abóbora (FG) e seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM).

Tabela 6. Parâmetros dos diferentes modelos matemáticos, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM), na predição da cinética de secagem da farinha dos grãos de abóbora (FG) nas temperaturas de 80, 70, 60, 50 e 40 °C.

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetro					R^2	DQM
		a	b	c	k	n		
Aproximação da Difusão	80	-0,0156	0,4505	-	0,0866	-	0,9995	0,0060
	70	-0,0218	0,1121	-	0,2917	-	0,9996	0,0060
	60	-0,0091	0,0886	-	0,3138	-	0,9989	0,0094
	50	0,9885	0,1045	-	0,0222	-	0,9999	0,0024
	40	0,0109	0,0372	-	0,3787	-	0,9997	0,0055
Exponencial Dois Termos	80	0,8519	0,0396	-	-	-	0,9995	0,0061
	70	1,0000	0,0320	-	-	-	0,9994	0,0069
	60	0,0001	255,2103	-	-	-	0,9989	0,0095
	50	0,0001	204,1650	-	-	-	0,9998	0,0043
	40	0,0103	1,3717	-	-	-	0,9997	0,0055
Henderson e Pabis	80	0,9994	-	-	0,0386	-	0,9995	0,0061
	70	1,0087	-	-	0,0323	-	0,9995	0,0065
	60	1,0041	-	-	0,0276	-	0,9989	0,0094
	50	1,0004	-	-	0,0217	-	0,9998	0,0043
	40	0,9926	-	-	0,0142	-	0,9997	0,0057
Logarítmico	80	0,9966	-	0,0051	0,0392	-	0,9996	0,0052
	70	1,0052	-	0,0061	0,0328	-	0,9996	0,0054
	60	0,9979	-	0,0112	0,0286	-	0,9994	0,0068
	50	0,9970	-	0,0061	0,0221	-	0,9999	0,0026
	40	0,9953	-	-0,0042	0,0140	-	0,9997	0,0054
Page	80	-	-	-	0,0383	1,0024	0,9995	0,0061
	70	-	-	-	0,0297	1,0206	0,9995	0,0064
	60	-	-	-	0,0274	1,0007	0,9989	0,0095
	50	-	-	-	0,0222	0,9941	0,9998	0,0042
	40	-	-	-	0,0147	0,9928	0,9996	0,0062

O modelo Logarítmico foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais da cinética de secagem das amostras FG, para todas as temperaturas, apresentando os maiores valores de R^2 e alguns dos menores valores de DQM. Todos os outros modelos ajustados também podem ser usados para estimar as curvas de cinética de secagem das amostras FG, em razão de terem apresentado $R^2 > 0,99$ e $DQM < 0,0096$. O parâmetro “k” dos modelos de Henderson e Pabis, Logarítmico e Page aumentaram com a elevação da temperatura de secagem, fenômeno também observado Hacıhafizoglu et al. (2008) na secagem de arroz.

Estão apresentadas, na Tabela 7, as tendências de distribuição de resíduos para os diferentes modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais da cinética de secagem de grãos de abóbora sem tegumento (GST). Nota-se que todos os modelos avaliados apresentaram distribuição aleatória dos resíduos para todas as temperaturas de 40 a 80 °C, confirmando que todos os modelos se ajustaram bem aos dados experimentais.

O modelo Logarítmico foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais da cinética de secagem das amostras FG, para todas as temperaturas, apresentando os maiores valores de R^2 e alguns dos menores valores de DQM. Todos os outros modelos ajustados também podem ser usados para estimar as curvas de cinética de secagem das amostras FG, em razão de terem apresentado $R^2 > 0,99$ e $DQM < 0,0096$. O parâmetro “k” dos modelos de Henderson e Pabis, Logarítmico e Page aumentaram com a elevação da temperatura de secagem, fenômeno também

observado Hacıhafızoglu et al. (2008) na secagem de arroz.

Estão apresentadas, na Tabela 7, as tendências de distribuição de resíduos para os diferentes modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais da cinética de secagem de grãos de abóbora sem tegumento (GST). Nota-se que todos os modelos avaliados apresentaram distribuição aleatória dos resíduos para todas as temperaturas de 40 a 80 °C, confirmando que todos os modelos se ajustaram bem aos dados experimentais.

Tabela 7. Tendência de distribuição de resíduos para os modelos ajustados aos pontos experimentais da cinética de secagem de farinhas de grãos de abóbora (FG).

Modelo matemático	Temperatura (°C)				
	80	70	60	50	40
Aproximação da Difusão	Aleatório	Aleatório	Aleatório	Aleatório	Aleatório
Exponencial Dois Termos	Aleatório	Aleatório	Aleatório	Aleatório	Aleatório
Henderson e Pabis	Aleatório	Aleatório	Aleatório	Aleatório	Aleatório
Logarítmico	Aleatório	Aleatório	Aleatório	Aleatório	Aleatório
Page	Aleatório	Aleatório	Aleatório	Aleatório	Aleatório

Os dados de razão de água (RX), experimentais e estimados, de farinhas de grãos de abóbora (FG) foram usados para construir a Figura 6, empregando-se o modelo Logarítmico nas temperaturas de secagem de 40, 50, 60, 70 e 80 °C. Observa-se ajuste adequado do modelo aos dados experimentais da secagem de farinha de grãos de abóbora (FG), com valores experimentais próximos aos valores estimados pelo modelo.

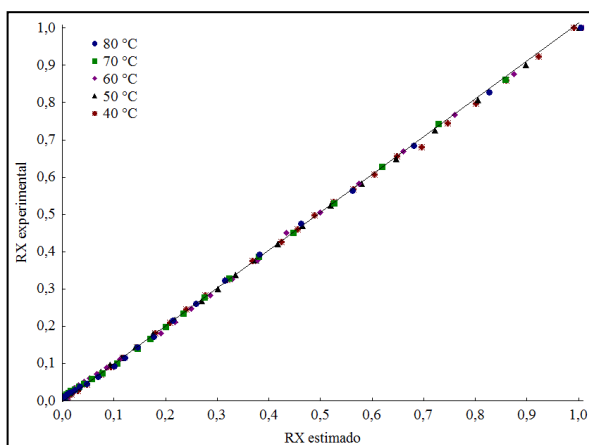


Figura 6. Relação entre os valores experimentais e estimados de razão de água pelo modelo Logarítmico para a cinética de secagem de farinhas de grãos de abóbora (FG) nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C.

CONCLUSÕES

O processamento afetou nos tempos de secagem, onde quanto maior foi o grau de processamento

da amostra menor foi o tempo para atingir o teor de água de equilíbrio;

Todos os modelos matemáticos avaliados apresentaram bom ajuste às curvas de secagem dos grãos de abóbora inteiros (GI), grãos sem tegumento (GST) e das farinhas de abóbora (FG), apresentando valores de R^2 superiores a 0,96 e baixos valores de DQM;

Dentre os modelos investigados, o de Aproximação da Difusão apresentou os melhores parâmetros de ajuste para as amostras de grãos de abóbora inteiros (GI) e sem tegumento (GST) e o modelo Logarítmico revelou os melhores parâmetros de ajuste para as amostras de farinha de grãos de abóbora (FG).

REFERÊNCIAS

- ABALONE, R. et al. Thin layer drying of amaranth seeds. **Biosystems Engineering**, v. 93, n. 2, p. 179-188, 2006.
- ALMEIDA, D. P. et al. Cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Global Science and Technology**, Rio Verde, v. 2, n. 1, p. 72-83, 2009.
- ANDRADE, E. T. et al. Cinética de secagem e qualidade de sementes de feijão. **Engvista**, Niterói, v. 8, n. 2, p. 83-95, 2006.
- BABALIS, S. J.; VELESSIOTIS, V. G. Influence conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. **Journal of Food Engineering**, v. 65, n. 3, p. 449-458, 2004.

- BRASIL. Ministério da saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. Brasília: Ministério da saúde, 2005. 1017 p.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: The AVI Publishing Company, 1992. 450 p.
- CARLESSO, V. O. E. et al. Avaliação de modelos de secagem em camada fina de sementes de maracujá amarelo. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 29, n. 2, p. 28-37, 2007.
- CARNEIRO, L. M. T. A. et al. Diferentes épocas de colheita, secagem e armazenamento na qualidade de grãos de trigo comum e duro. **Bragantia**, Campinas, v. 64, n. 1, p. 127-137, 2005.
- CORRÊA, P. C.; MACHADO, P. F.; ANDRADE, E. T. Cinética de secagem e qualidade de grãos de milho-pipoca. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 25, n. 1, p. 134-142, 2001.
- CORRÊA, P. C. et al. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 501-510, 2007.
- COSTA, L. M. et al. Coeficiente de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 10, p. 1089-1096, 2011.
- DOYMAZ, I. Drying behaviour of green beans. **Journal of Food Engineering**, v. 69, n. 2, p. 161-165, 2005.
- DVORKIN, L., SONG, K. Y. Herbs for benign prostatic hyperplasia. **Annals of Pharmacotherapy**, v. 36, n. 9, p. 1443-1452, 2002.
- FARIA, R. Q. et al. Cinética de secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 5, p. 573-583, 2012.
- GONELI, A.L.D. et al. Contração volumétrica e forma dos frutos de mamona durante a secagem. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 1, p. 1-8, 2011.
- HACIHAFIZOGLU, O.; CIHAN, A.; KAHVECI, K. Mathematical modelling of drying of thin layer rough rice. **Food and Bioproducts Processing**, v. 86, n. 4, p. 268-275, 2008.
- KASHANINEJAD, M. et al. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v. 78, n. 1, p. 98-108, 2007.
- KINGSLEY, A. R. P.; SINGH, D. B. Drying kinetics of pomegranate arils. **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 2, p. 741-744, 2007.
- LUZ, G. R. et al. Análise energética da secagem de farelo de soja em secador rotativo indireto. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, v. 28, n. 2, p. 173-180, 2006.
- MOHAPATA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v. 66, n. 4, p. 513-518, 2005.
- NISHIYAMA, Y.; CAO, W.; LI, B. Grain intermittent drying characteristics analyzed by a simplified model. **Journal of Food Engineering**, v. 76, n. 3, p. 272-279, 2006.
- PARK, K. J.; BIN, A.; BROD, F. P. R. Obtenção das isotermas de sorção e modelagem matemática para a pêra bartlett (*Pyrus* sp.) com e sem desidratação osmótica. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 21, n. 1, p. 73-77, 2001.
- SACILIK, K. Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 1, p. 23-30, 2007.
- SANTOS, D. C. et al. Cinética de secagem de farinha de grãos residuais de urucum. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 2, p. 223-231, 2013.
- SILVA, F. A.; MARSAIOLI JÚNIOR, A. estudo comparativo da conservação de castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa*) seca por microondas e convencionalmente. **Boletim do Centro de Pesquisas de Processamento de Alimentos**, Curitiba, v. 22, n. 2, p. 387-404, 2004.
- SILVA, W. P. et al. Determinação da difusividade e da energia de ativação para feijão macassar (*Vigna unguiculata* (L.) walp.), variedade sempre-verde, com base no comportamento da secagem. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 2, p. 325-333, 2008.
- SOUSA, K. A. et al. Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 42, n. 4, p. 883-892, 2011.
- TARIGAN, E. et al. Drying characteristics of unshelled kernels of candle nuts. **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 3, p. 828-823, 2007.