

Modelos de predição da cinética de secagem dos grãos de guandu

Prediction models of kinetic drying of pigeon pea grains

Autores | Authors

✉ **Luzia Marcia de Melo SILVA**

Universidade Federal de Campina Grande
(UFCG)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
Rua Aprígio Veloso, 309, Apto. C, Bairro
Universitário
CEP: 58429-170
Campina Grande/PB - Brasil
e-mail: dluziamarcia@yahoo.com

Francinalva Cordeiro de SOUSA

Elisabete Piancó de SOUSA

Mário Eduardo Rangel Moreira

Cavalcanti MATA

Maria Elita Martins DUARTE

Universidade Federal de Campina Grande
(UFCG)
Programa de Pós-Graduação de Engenharia Agrícola
Campina Grande/PB - Brasil
e-mail: francis_nalva@yahoo.com.br
elisabete_pianco@yahoo.com.br
mmata@pq.cnpq.br
melitamd@gmail.com

✉ Autor Correspondente | Corresponding Author

Recebido: Jun. 02, 2014

Aprovado: Dez. 10, 2014

Resumo

O objetivo deste trabalho foi estudar a cinética de secagem em camada fina dos grãos de guandu submetidos a diversas condições de secagem, por meio de diferentes modelos matemáticos. Com o modelo de Fick, determinou-se a difusividade efetiva e a energia de ativação. Para tal, foram utilizadas amostras de 200 g de grãos de guandu com teor de água inicial de 25% (b.u.), as quais foram secas em um secador experimental de leito fixo, ajustado para operar nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C e velocidade do ar de secagem a 1,0 m s⁻¹. A secagem, para cada temperatura, foi realizada até o teor de água de equilíbrio dinâmico. Os valores médios da temperatura e da umidade relativa do ar ambiente foram, respectivamente, 26 °C e 68%. A difusividade efetiva do produto foi determinada, para cada temperatura, pressupondo o grão de guandu como uma esfera de igual volume do grão. A difusividade efetiva do produto em função da temperatura foi expressa por uma equação semelhante à proposta por Arrhenius. A análise dos resultados possibilita concluir que as equações de Cavalcanti Mata com seis constantes e Midilli et al. representam, de forma satisfatória, o processo de secagem em todas as condições estudadas; e que utilizando o modelo de Fick a difusividade dos grãos de guandu variou de 2,1x10⁻¹⁰ até 6,8x10⁻¹⁰ m².s⁻¹ para as temperaturas entre 40 e 70 °C, respectivamente; e a energia de ativação obtida é igual a 34,51kJ.mol⁻¹.

Palavras-chave: *Curvas de secagem; Grãos esféricos; Energia de ativação.*

Summary

The objective of this research was to study the kinetics of the thin-layer drying of pigeon peas subjected to different drying conditions, using different mathematical models. The effective diffusivity and activation energy were determined with the Fick model. For this purpose, 200g samples of pigeon peas with an initial moisture content of 25% (w.b.) were dried in an experimental fixed bed dryer, adjusted to operate at temperatures of 40, 50, 60 and 70 °C, and a drying air rate of 1.0m s⁻¹. For each temperature, drying was continued until the water content reached dynamic equilibrium. The average values for the temperature and relative humidity of the air were, respectively, 26 °C and 68%. For each temperature the effective diffusivity of the product was determined assuming the pigeon pea to be a sphere of equal volume. The effective diffusivity of the product in relation to the temperature was expressed by an equation similar to that proposed by Arrhenius. An analysis of the results allows for the conclusion that the equations of Cavalcanti Mata with six constants and of Midilli et al. satisfactorily represented the drying process under all conditions studied; and that using the Fick model the diffusivity of the pigeon peas ranged from 2.1x10⁻¹⁰ to 6.8x10⁻¹⁰ m².s⁻¹ at temperatures between 40 and 70 °C, respectively, with an activation energy equal to 34.51 kJ.mol⁻¹.

Key words: *Drying curves; Spherical grains; Activation energy.*

Modelos de predição da cinética de secagem dos grãos de guandu

Silva, L. M. M. et al.

1 Introdução

O feijão guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.) é uma espécie da família das leguminosas, nativa da África Tropical Ocidental, com porte arbustivo ereto de 2 a 3 metros de altura, utilizado amplamente na adubação verde e com potencial produtivo de massa seca para a cobertura do solo (FERNANDES et al., 1999). A espécie tem rápido crescimento, cobrindo o solo e aumentando a biomassa no estágio inicial (restauração física), com importante papel na adubação por meio da fixação de nitrogênio (restauração química) e tem ciclo de vida de aproximadamente três anos, o que dificulta uma ação invasora (BELTRAME; RODRIGUES, 2008).

A cultura do guandu tem muita importância para diversos países, principalmente os asiáticos e africanos, sendo encontrada com frequência em todo o Brasil, podendo ser observada principalmente nos quintais domésticos de muitas cidades do interior. Com utilização bastante diversificada, a cultura do feijão guandu pode ser usada para os mais diversos fins: como planta melhoradora de solos, na recuperação de áreas degradadas, como planta fitorremediadora, renovação de pastagens, na alimentação de animais domésticos e da pecuária e também na alimentação humana (AZEVEDO et al., 2007).

O guandu é uma espécie que se desenvolve bem em condições tropicais e subtropicais, entre as latitudes 30° N e 30° S. A temperatura média que lhe é mais favorável varia de 18 a 29 °C, tolerando temperaturas médias de até 35 °C (MAIOR JÚNIOR et al., 2009). Por esses aspectos, possui enorme potencial para exercer múltiplas funções nos sistemas de produção agrícola, além de gerar produtos de elevado valor biológico para melhoria do meio ambiente em geral. Por seu valor nutritivo, pode ser amplamente usado na alimentação humana, como também para uso na alimentação animal, mas necessita ser mais bem explorado em locais onde seu uso ainda é limitado (AZEVEDO et al., 2007).

A secagem de produtos é o processo mais utilizado para assegurar a qualidade de alguns materiais agrícolas, considerando que a diminuição da quantidade de água do material reduz a atividade biológica e as mudanças químicas e físicas que ocorrem durante o armazenamento (RESENDE et al., 2008). O estudo do processo de secagem fornece informações relativas ao comportamento do fenômeno de transferência de calor e massa entre o material biológico e o elemento de secagem, normalmente o ar atmosférico, aquecido ou não; essas informações são fundamentais para a elaboração de projeto, e operação e simulação de sistemas de secagem e secadores (CORRÊA et al., 2003).

Os estudos da cinética de secagem têm despertado o interesse de vários pesquisadores para os mais diferentes produtos. Na literatura, diversos modelos matemáticos têm sido utilizados para descrever a cinética de secagem em camada fina para produtos agrícolas: sementes de crambe (FARIA et al., 2012), sementes de abóbora (SACILIK, 2007), sementes de amaranto (ABALONE et al., 2006), grãos de trigo parboilizados (MOHAPATRA e RAO, 2005), dentre outros.

Apesar de várias teorias terem sido propostas para prever o comportamento da secagem de grãos e sementes, na maioria das vezes as relações semiempíricas e empíricas têm se mostrado como melhores opções para prever o processo de secagem, apesar de sua validade estar restrita às condições sob as quais os dados experimentais foram obtidos (BROOKER et al., 1992). Esses modelos, geralmente, baseiam-se em variáveis externas ao produto, como a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem. Entretanto, não fornecem indicações sobre os fenômenos de transporte de energia e de água no interior dos grãos e consideram que todo o processo de secagem ocorre no período de taxa decrescente (RESENDE et al., 2008).

A difusão de água em produtos agrícolas durante a secagem é um processo complexo que pode envolver diferentes mecanismos, como a difusão molecular, difusão capilar, difusão de superfície, fluxo hidrodinâmico, difusão de vapor e a energia de ativação da difusão (GONELI et al., 2009).

Considerando-se a importância do estudo teórico do processo de secagem dos produtos agrícolas e a limitação de informações teóricas a respeito dos fenômenos que ocorrem durante a secagem de guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp), este trabalho teve como objetivo estudar a cinética de secagem em camada fina dos grãos de guandu submetidos a diferentes temperaturas de secagem investigando-se, também, a difusividade efetiva e a energia de ativação do produto.

2 Material e métodos

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (Lappa) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Os grãos de guandu utilizados são da variedade flavus DC (plantas de porte baixo, produção precoce de sementes, flores de cor amarela, vagens de cor verde com duas a três sementes), os quais foram adquiridos no município do Crato, CE, em meados de janeiro de 2012.

O teor de água inicial foi determinado pelo método padrão da estufa a $105 \pm 3^\circ \text{C}$, por um período de 24 h, utilizando quatro subamostras de 10 g de grãos de

Modelos de predição da cinética de secagem dos grãos de guandu

Silva, L. M. M. et al.

guandu, dispostos em recipientes metálicos conforme descrito pelas Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 2009). As pesagens das amostras foram realizadas por meio de uma balança analítica (ANALYTICAL Standard – OHAUS) com precisão de 0,0001 g. A porcentagem de teor de água foi calculada em base úmida aplicando-se a Equação 1, sendo o resultado final expresso pela média aritmética das subamostras.

$$\text{Teor de Água (\%)} = \frac{100(M - m)}{M - t} \quad (1)$$

Em que:

M = massa inicial, massa do recipiente e sua tampa mais a massa dos grãos úmidos;

m = massa final, massa do recipiente e sua tampa mais a massa da semente seca;

t = tara, massa do recipiente com sua tampa.

As amostras com teor de água inicial de 25% (b.u) foram secas em camada fina em um secador experimental de leito fixo (Figura 1), disponível na dependência do Laboratório de Secagem de Produtos Agrícolas, sendo

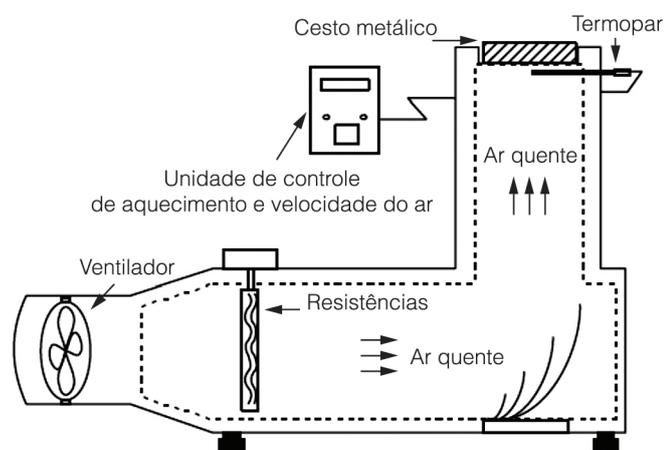


Figura 1. Secador de leito fixo empregado na secagem.

este ajustado para operar nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C e velocidade do ar de secagem a 1,0 m.s⁻¹, determinado por meio de um anemômetro luxímetro digital (mod. ITTHAL-300 da Instrutemp).

A temperatura e a umidade relativa do ar ambiente foram medidas durante o período de cada secagem por meio de thermohygrometer digital (mod. MTH – 1362W Minipa). O experimento foi realizado em quadruplicata (Figura 2), com secagem simultânea, sendo as pesagens dos grãos realizadas em balança semianalítica (mod. BS 3000A) com precisão de 0,001 g até se obter peso constante, que equivale a determinar o teor de água de equilíbrio para as específicas condições termodinâmicas do ar de secagem.

Durante a operação de secagem foram realizadas pesagens repetitivas de forma contínua das amostras, até que estas atingissem o teor de água final preestabelecido. As curvas de secagem foram obtidas pela conversão dos dados referentes à perda de água no parâmetro adimensional razão de teor de água (RX). Para determinação da razão de teor de água dos grãos de guandu para as diferentes condições de secagem, foi utilizada a seguinte relação (Equação 2):

$$RX = \frac{X_{bs} - X_e}{X_{bs\text{ inicial}} - X_e} \quad (2)$$

Em que:

RX = razão de teor de água (adimensional);

X_e = teor de água de equilíbrio (base seca);

X_{bs} = teor de água (base seca);

$X_{bs\text{ inicial}}$ = teor de água inicial (base seca).

Os dados experimentais da secagem de grãos de guandu foram ajustados para seis equações (Equações 3-8) (teórica, semiempíricas e empíricas), frequentemente utilizadas para representação da secagem de produtos agrícolas e que estão apresentadas na Tabela 1.



Figura 2. Peneiras metálicas com os grãos utilizados no experimento.

Modelos de predição da cinética de secagem dos grãos de guandu

Silva, L. M. M. et al.

Tabela 1. Modelos para prever o fenômeno de secagem de produtos agrícolas.

Modelo	Designação do modelo
Teórica	
Fick – com dois termos da série	$RX = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp(-n^2 At)$ (BROOKER et al., 1992) (3)
Semiempírica	
Cavalcanti Mata	$RX = a_1 \cdot \exp(-(k_1 \cdot t)^{n_1}) + a_2 \cdot \exp(-(k_1 \cdot t)^{n_2}) + a_3$ (CAVALCANTI MATA et al., 2006) (4)
Henderson; Pabis	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t)$ (HENDERSON; PABIS, 1961) (5)
Page	$RX = \exp(-k \cdot t^n)$ (PAGE, 1949) (6)
Empírica	
Exponencial de dois termos	$RX = a \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$ (HENDERSON, 1974) (7)
Midilli et al.	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$ (MIDILLI et al., 2002) (8)

Em que:

t = tempo de secagem, s;

k, k_0 e k_1 = constantes de secagem – a mesma não apresenta unidade (adimensional);

a, a_1 , a_2 , a_3 , b, n, n_1 , n_2 = coeficientes dos modelos;

r = raio do produto, m;

Para o ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais, realizou-se análise de regressão não linear, pelo método Quasi-Newton, empregando-se o programa computacional STATISTICA 7.0®. Estimaram-se os valores dos parâmetros em função da variável independente temperatura do ar de secagem e teor de água de equilíbrio da amostra.

Como critério de seleção, para o modelo que melhor representou o processo de secagem utilizou-se o coeficiente de determinação (R^2) e o desvio quadrático médio (DQM), sendo calculado por meio da Equação 9:

$$DQM = \sqrt{\frac{\sum (RX_{exp} - RX_{pre})^2}{N}} \quad (9)$$

Em que:

RX_{exp} = razão de água obtida experimentalmente;

RX_{pre} = razão de água predita pelo modelo matemático;

N = número de observações ao longo do experimento.

A difusividade efetiva (D_{ef}) da água no interior do produto foi determinada pressupondo um modelo esférico para os grãos, com valores constantes para o volume, bem como para as temperaturas e para o teor de água inicial, sendo calculada por meio da Equação 10:

$$RX = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp(-n^2 At) \quad (10)$$

Em que:

$$A = \frac{\pi^2}{r^2} D_{ef}$$

Em que:

D_{ef} = difusividade efetiva, $m^2 \cdot s^{-1}$;

r = raio da esfera equivalente ao grão, m;

n = número de termos;

t = tempo de secagem, s.

Para o cálculo do raio equivalente utilizado no modelo da difusão líquida, fez-se a medição dos três eixos ortogonais dos grãos: comprimento (a), largura (b) e espessura (c), com o auxílio de um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm, escolhendo-se 30 sementes aleatoriamente. O raio equivalente é definido como o raio de uma esfera cujo volume é igual ao do grão. O volume de cada grão (V), considerado uma esfera, foi calculado com base nos diâmetros perpendiculares, segundo a Equação 11, descrita por Moshenin (1986):

$$V = \frac{\pi(a \cdot b \cdot c)}{6} = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^3}{3} \quad (11)$$

Em que:

a = maior eixo do grão (comprimento), mm;

b = eixo intermediário do grão (largura), mm;

c = menor eixo do grão (espessura), mm.

Para avaliar a influência da temperatura na difusividade efetiva, foi utilizada a equação do tipo Arrhenius (Equação 12):

$$D_{ef} = D_o \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (12)$$

Modelos de predição da cinética de secagem dos grãos de guandu

Silva, L. M. M. et al.

Em que:

D_0 = constante chamada de fator pré-exponencial, $m^2 s^{-1}$;

E_s = energia de ativação, $J mol^{-1}$;

R = constante universal dos gases, $8,314 J mol^{-1} K^{-1}$;

T = temperatura absoluta, K.

3 Resultados e discussão

A temperatura e a umidade relativa médias do ar ambiente durante o processo de secagem foram, respectivamente, de 26° C e 68%. Os valores médios de teor de água de equilíbrio (X_{eq}), obtidos para cada temperatura, foram de 8,73; 7,35; 5,98 e 3,29% b.s. para as temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, respectivamente. Dessa forma, pode-se notar que os valores X_{eq} foram

opostos ao aumento da temperatura de secagem, conforme o previsto e também já observado em outras leguminosas como, por exemplo, no crambe (FARIA et al., 2012). A influência da temperatura é bastante significativa, pois à medida que esta é aumentada o tempo de secagem é reduzido. A estabilidade do produto é atingida de acordo com teor de água de equilíbrio. Em relação ao tamanho do material percebe-se um encolhimento no decorrer do processo de secagem, não havendo variação de cor.

Na Tabela 2, encontram-se os valores estatísticos dos coeficientes de determinação (R^2) e do desvio quadrático médio (DQM) para os modelos ajustados à cinética de secagem dos grãos de guandu em diferentes temperaturas.

Tabela 2. Coeficientes dos seis modelos analisados, coeficientes de determinação (R^2) e desvio quadrático médio (DQM), da secagem dos grãos de guandu, para as diferentes temperaturas.

		Parâmetros					R^2 (%)	DQM	
Fick		D_{ef}							
	40°C	0,00000000021					98,65	0,0016	
	50°C	0,00000000033					98,55	0,0017	
	60°C	0,00000000046					98,30	0,0025	
	70°C	0,00000000068					98,03	0,0028	
Cavalcanti Mata		a_1	k_1	n_1	a_2	n_2	a_3	R^2 (%)	DQM
	40°C	0,5675	0,0027	0,4697	0,5675	0,4697	-0,1450	99,94	0,0001
	50°C	0,5945	0,0037	0,4807	0,5945	0,4807	-0,1957	99,96	0,0001
	60°C	0,5469	0,0071	0,5527	0,5469	0,5527	-0,0990	99,98	0,0001
	70°C	0,5260	0,0126	0,5454	0,5260	0,5454	-0,0507	99,99	0,0001
Henderson; Pabis		A			k		R^2 (%)	DQM	
	40°C	0,7752			0,0030		98,29	0,0012	
	50°C	0,7934			0,0050		98,51	0,0009	
	60°C	0,8232			0,0073		98,73	0,0011	
	70°C	0,8094			0,0105		97,93	0,0022	
Page		K			n		R^2 (%)	DQM	
	40°C	0,0559			0,5417		99,67	0,0010	
	50°C	0,0587			0,5803		99,58	0,0012	
	60°C	0,0576			0,6214		99,79	0,0010	
	70°C	0,0845			0,5888		99,93	0,0005	
Exponencial de dois termos		a	k_0	b		k_1	R^2 (%)	DQM	
	40°C	0,3127	0,0652	0,6632		0,0023	99,89	0,0001	
	50°C	0,2995	0,0964	0,6860		0,0040	99,93	0,0001	
	60°C	0,2862	0,1030	0,7035		0,0058	99,94	0,0001	
	70°C	0,3695	0,0884	0,6117		0,0071	99,88	0,0001	
Midilli et al. (2002)		a	K	n	b		R^2 (%)	DQM	
	40°C	0,9818	0,0633	0,5033	-0,00004		99,92	0,0001	
	50°C	0,9877	0,0735	0,5155	-0,00009		99,94	0,0001	
	60°C	0,9912	0,0665	0,5771	-0,00008		99,97	0,0001	
	70°C	1,0003	0,0935	0,5589	-0,00006		99,99	0,0001	

Modelos de predição da cinética de secagem dos grãos de guandu

Silva, L. M. M. et al.

Verifica-se, na Tabela 2, a magnitude da constante de secagem (k), que, de acordo com Goneli et al. (2009), representa o efeito das condições externas de secagem, e tende a aumentar com a elevação da temperatura do ar de secagem, embora para a equação de Page tenha sido sensivelmente menor na temperatura de 60 °C em relação à de 50 °C. Os coeficientes do modelo de Henderson e Pabis (a), exponencial de dois termos (a, b), e Midilli et al. (n) não apresentaram uma tendência clara em função da temperatura de secagem.

Com relação ao coeficiente (n) do modelo de Page e Midilli et al. não se observou uma tendência definida dos seus valores em relação à temperatura de secagem. Resultados semelhantes foram encontrados por Goneli et al. (2009), para a cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. Normalmente, com a elevação da temperatura do ar de secagem, menor é o valor de n, uma vez que há maior diferença entre a pressão de vapor do ar e do grão, promovendo maior remoção de água.

Em todos os tratamentos, os modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais apresentaram coeficientes de determinação (R^2) superiores a 97,93% e valores de DQM inferiores a 0,0022, estes, semelhantes aos de Resende et al. (2010), que determinando a cinética de secagem do feijão adzuki encontrou valores de (R^2) superiores a 98% constituindo uma representação satisfatória do fenômeno em estudo.

Em geral, verificou-se que dentre as equações testadas as de Cavalcanti Mata com seis constantes e Midilli et al. (2002) aproximaram-se mais dos pontos experimentais que os demais modelos, constatado por meio do coeficiente de determinação (R^2), estando para todos os tratamentos acima de 99,92%, e os menores valores de DQM, para todas as temperaturas (40 a 70 °C) na velocidade do ar de secagem de 1 m s⁻¹ em que quanto menor o valor de DQM melhor é a representação do modelo empregado. Os resultados encontrados estão de acordo com os obtidos por Gouveia et al. (2011) que, estudando a cinética de secagem do feijão preto, observaram que o modelo matemático de Cavalcanti Mata et al. (2006) com seis constantes foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais para a faixa de temperatura de 40 a 80 °C.

Verificou-se que, com o aumento da temperatura do ar de secagem, ocorre maior taxa de remoção de água do produto, evidenciando o aumento da taxa de secagem, fato este observado por outros pesquisadores para inúmeros produtos agrícolas (GONELI et al., 2007; RESENDE et al., 2008; PESSOA et al., 2011). Contudo, o encolhimento dos grãos foi observado no decorrer do processo com o aumento da temperatura, mas sem alteração da cor. Os tempos médios necessários para completar o processo de secagem foram 1900, 1060,

760 e 580 minutos para as temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, sendo diretamente proporcional ao teor de água dos grãos, cujos resultados se assemelham aos estudos de Gouveia et al. (2011).

Na Figura 3 estão as curvas de secagem dos grãos de guandu estimadas pelos modelos de Fick (3), Cavalcanti Mata (4) com seis constantes, Henderson e Pabis (5), Page (6), Exponencial de Dois Termos (7) e Midilli et al. (8). Verifica-se o melhor ajuste do modelo de Cavalcanti Mata, com seis constantes, e Midilli et al. pela correspondência entre os valores experimentais e estimados.

Para a determinação da difusividade efetiva fez-se o ajuste dos dados experimentais da secagem do guandu ao modelo matemático da difusão líquida para a forma geométrica esférica, por meio de regressão não linear, utilizando-se a Equação 4 com dois termos da série e se considerando, ainda, os grãos de guandu como uma esfera de raio equivalente igual a 0,30 cm. Verifica-se na Figura 4 que, durante a secagem, a difusividade efetiva apresentou valores entre 2,1x10⁻¹⁰ e 6,8x10⁻¹⁰ m².s⁻¹, para o intervalo de temperatura de 40 a 70 °C, aumentando com o incremento da temperatura do ar de secagem. Como já descrito por vários pesquisadores (ALMEIDA et al., 2009; CORRÊA et al., 2006; GONELI et al., 2007), a difusividade efetiva aumenta com a elevação da temperatura de secagem.

A equação de difusividade efetiva é a solução analítica para a segunda lei de Fick, desconsiderando-se a contração volumétrica dos grãos e a condição de contorno de teor de água conhecida na superfície do grão (BROOKER et al., 1992). Uma vez que os modelos baseados na segunda Lei de Fick não são rigorosamente representativos dos diversos mecanismos que prevalecem no transporte de água em produtos agrícolas, o coeficiente de difusão determinado é considerado aparente ou efetivo (ROCA et al., 2008).

A curva do tipo Arrhenius fornece a relação E_a/R , enquanto o valor independente indica o valor de D_o . A Equação 13 apresenta os coeficientes da equação ajustada para o coeficiente de difusão do guandu, calculados de acordo com a Equação 12.

$$D_{ef} = 12,1293 \exp \left[-\frac{34511}{R.T} \right] \quad (13)$$

Como pode ser observado na Equação 13, a energia de ativação para a difusão líquida do guandu foi de aproximadamente 34,51 kJ.mol⁻¹. Durante a determinação da energia de ativação, as condições externas de secagem apresentaram condições favoráveis, resultando num coeficiente de determinação no valor de 99,81%. Termodinamicamente, a energia de ativação é definida como a facilidade com que as moléculas de

Modelos de predição da cinética de secagem dos grãos de guandu

Silva, L. M. M. et al.

água superam a barreira de energia durante a migração no interior do produto (CORRÊA et al., 2006). Sendo assim, quanto menor a energia de ativação maior será a velocidade com que a água será removida dos grãos.

O valor da energia de ativação encontrado no presente estudo foi ligeiramente inferior ao encontrado por

Corrêa et al. (2006) que, trabalhando com grãos de feijão do grupo vermelho, cultivar vulgarmente denominado de “vermelhinho”, encontraram valores da ordem de 40,08 kJ.mol⁻¹. Na literatura pesquisada, foram encontrados valores da energia de ativação para diversos produtos agrícolas, conforme apresentados na Tabela 3.

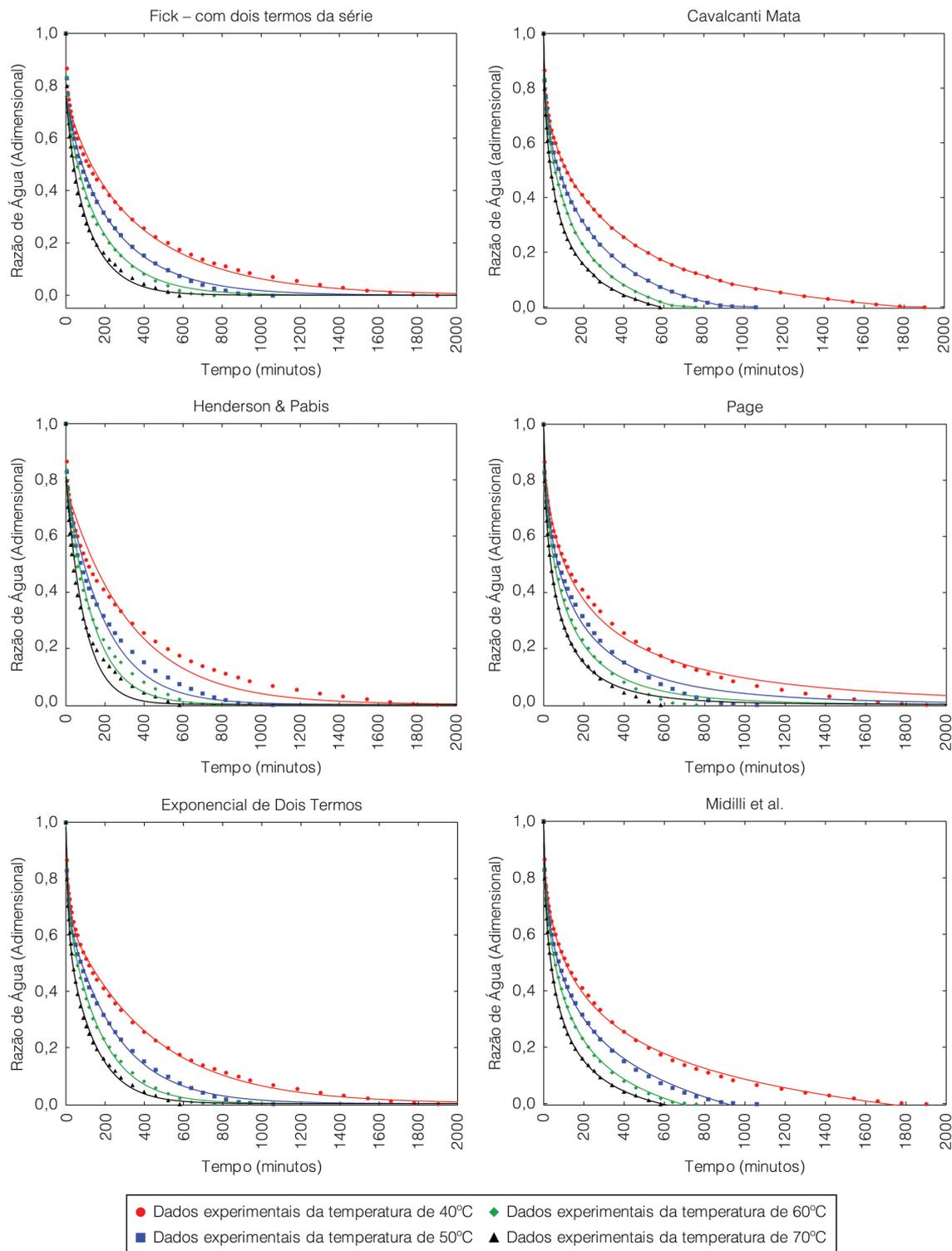


Figura 3. Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem dos grãos de guandu às temperaturas de secagem de 40 a 70 °C, de acordo com os seis modelos propostos.

Modelos de predição da cinética de secagem dos grãos de guandu

Silva, L. M. M. et al.

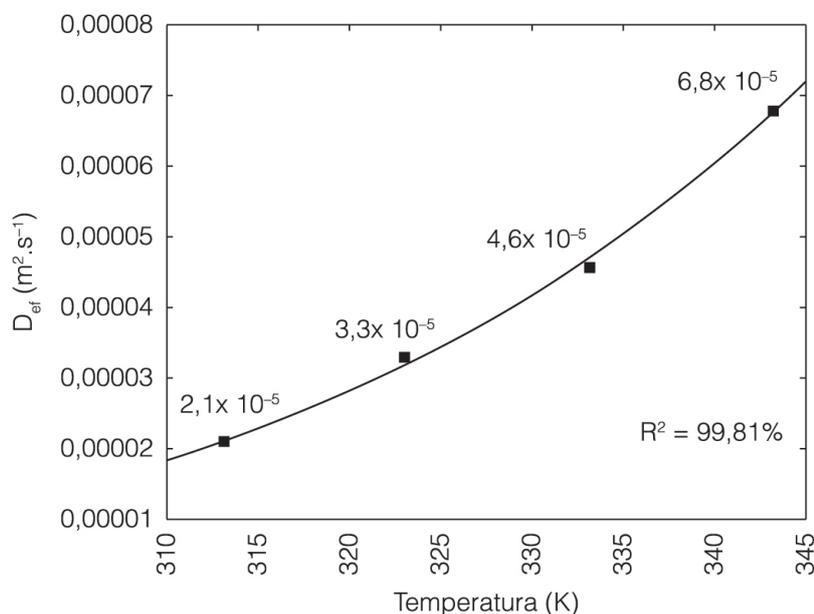


Figura 4. Difusividade efetiva do guandu, em função da temperatura do ar de secagem.

Tabela 3. Energia de ativação para alguns produtos biológicos.

Produto	E _a (kJ.mol ⁻¹)	Referências
Feijão verde	35,4	Doymaz (2005)
Trigo	42,0	Goneli et al. (2007)
Feijão macassar	26,9	Silva et al. (2008)
Feijão adzuki	38,94	Resende et al. (2010)
Nabo forrageiro	24,78	Sousa et al. (2011)
Crambe	37,07	Costa et al. (2011)

Analisando-se os resultados indicados na Tabela 3, verifica-se que a energia de ativação para a difusão de água nos grãos de guandu está na mesma ordem de grandeza dos valores encontrados na literatura para secagem de diversos produtos agrícolas, constatando-se que a energia de ativação do guandu está muito próxima do feijão verde, que é 35,4 kJ.mol⁻¹, na faixa de temperatura analisada.

4 Conclusões

Nas condições em que foi desenvolvido o presente trabalho, conclui-se que os valores médios de teor de água de equilíbrio (X_{eq}) foram de 8,73; 7,35; 5,98; e 3,29 % b.s. para as temperaturas de 40; 50; 60; e 70 °C, nas quais os valores X_{eq} foram opostos ao da temperatura de secagem.

A difusividade efetiva dos grãos de guandu variou de $2,1 \times 10^{-10}$ a $6,8 \times 10^{-10}$ m².s⁻¹, para o intervalo de temperatura de 40 a 70 °C, e sua energia de ativação foi de 34,51 kJ.mol⁻¹.

Referências

- ABALONE, R.; GASTÓN, A.; CASSINERA, A. Thin layer drying of amaranth seeds. **Biosystems Engineering**, London, v. 93, p. 179-188, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.11.010>.
- ALMEIDA, D. P.; RESENDE, O.; COSTA, L. M.; MENDES, U. C.; SALES, J. F. Cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Global Science and Technology**, Rio Verde, v. 2, n. 1, p. 72-83, 2009.
- AZEVEDO, L. R.; RIBEIRO, G. T.; AZEVEDO, C. L. L. Feijão guandu: uma planta multiuso. **Revista da Fapese**, v. 3, n. 2, p. 81-86, jul./dez. 2007.
- BELTRAME, T. P.; RODRIGUES, E. Comparação de diferentes densidades de feijão guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.) na restauração florestal de uma área de reserva legal no Pontal do Paranapanema, SP. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 80, p. 317-327, dez. 2008.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2009. 398 p.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: The AVI Van Nostrand Reinhold, 1992. 450 p.
- CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; ALMEIDA, F. A. C.; DUARTE, M. E. M. Secagem de sementes. In: ALMEIDA, F. A. C.; DUARTE, M. E. M.; CAVALCANTI MATA, M. E. R. M. (Ed.). **Tecnologia de armazenamento em sementes**. Campina Grande: UFCG, 2006. p. 271-370.

Modelos de predição da cinética de secagem dos grãos de guandu

Silva, L. M. M. et al.

- CORRÊA, P. C.; ARAÚJO, E. F.; AFONSO JÚNIOR, P. C. Determinação dos parâmetros de secagem em camada delgada de sementes de milho doce (*Zea mays* L.). **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 2, n. 2, p. 110-119, 2003.
- 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.
- COSTA, L. M.; RESENDE, O.; SOUSA, K. A.; GONÇALVES, D. N. Coeficiente de difusão efetivo para a secagem de sementes de crambe (*Crambeabyssinica*). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 10, p. 1089-1096, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662011001000014>.
- DOYMAZ, I. Drying behaviour of green beans. **Journal of Food Engineering**, v. 69, n. 2, p. 161-165, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.08.009>.
- FARIA, R. Q.; TEIXEIRA, I. R.; DEVILLA, I. A.; ASCHERI, D. P. R.; RESENDE, O. Cinética de secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 5, p. 57-583, 2012.
- FERNANDES, M. F.; BARRETO, A. C.; EMÍDIO FILHO, J. Fitomassa de adubos verdes e controle de plantas daninhas em diferentes densidades populacionais de leguminosas. **Revista Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 9, p. 1593-1600, 1999.
- 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**, Viçosa, n. 11, p. 64-73, 2009.
- GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; REIS NETO, S. A. Estudo da difusão de umidade em grãos de trigo durante a secagem. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 27, n. 1, p. 135-140, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0101-20612007000100024>.
- GOUVEIA, D. S.; UGULINO, S. M. P.; DUARTE, M. E. M.; CAVALCANTI MATA, M. E. R. M. Cinética de feijão preto (*Phaseolus vulgaris*, L.) em secador de bandeja. **Revista Holos**, Mossoró, v. 1, n. 1, p. 38-48, 2011.
- HENDERSON, S. M. Progress in developing the thin layer drying equation. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 17, n. 6, p. 1167-1168, 1974.
- HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory. I. Temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agriculture Engineering Research**, v. 6, n. 3, p. 169-174, 1961.
- MAIOR JÚNIOR, S. G. S.; SOUTO, J. S.; SANTOS, R. V.; SOUTO, P. C. Produção de fitomassa do feijão guandú em diferentes arranjos populacionais. **Tecnologia & Ciência Agropecuária**, João Pessoa, v. 3, n. 1, p. 1-5, fev. 2009.
- MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A new model for single-layer drying. **Drying Technology**, Philadelphia, v. 20, n. 7, p. 1503-1513, 2002. <http://dx.doi.org/10.1081/DRT-120005864>.
- MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, Oxford, v. 66, n. 4, p. 513-518, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.04.023>.
- MOSHENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841 p.
- PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum of air drying shelled corn in thin layer**. 1949. Dissertação (Master's Thesis)-Department of Mechanical Engineering, Purdue University, Purdue.
- PESSOA, T.; GALDINO, P. O.; GURJÃO, G. C.; GURJÃO, F. F.; CAVALCANTI MATA, M. E. R. M. Secagem convectiva de grãos de sorgo em camada fina por secador de leito fixo. **Revista Verde**, v. 6, n. 1, p. 247-255, jan./mar. 2011.
- RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 10, n. 1 p. 17-28, 2008.
- RESENDE, O.; FERREIRA, L. U.; ALMEIDA, D. P. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão adzuki (*Vignaangularis*). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 12, n. 2, p. 171-178, 2010.
- 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.03.078>.
- SACILIK, K. Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). **Journal of Food Engineering**, Oxford, v. 79, n. 1, p. 23-30, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.023>.
- SILVA, W. P.; CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; SILVA, C. D. P. S.; GUEDES, M. A.; LIMA, A. G. B. 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, abr./jun. 2008.
- 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, n. 4, p. 883-892, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-66902011000400009>.