

**CINÉTICA DE SECAGEM DE GRÃOS DE SOJA: INFLUÊNCIA VARIETAL**Fernando Mendes Botelho¹, Renata Henrique Hoscher², Michele Rosemari Hauth³ & Sílvia de Carvalho Campos Botelho⁴

1- Engenheiro Agrícola e Ambiental, Professor na UFMT/Sinop-MT, fernando_eaa@yahoo.com.br

2- Engenheira Agrícola e Ambiental, Mestranda em Engenharia Agrícola pela UFGD/Dourados-MS, renatahoscher@hotmail.com

3- Engenheira Agrícola e Ambiental, Mestranda em Engenharia Agrícola pela UFGD/Dourados-MS, michele.r.hauth@hotmail.com

4- Agrônoma, Pesquisadora na Embrapa Agrossilvipastoril/Sinop-MT, silvia.campos@embrapa.br

Palavras-chave:

Glycine max L. Merrill
Modelos matemáticos
Teor de água.

RESUMO

Objetivou-se, com o presente trabalho, ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem de grãos de quatro variedades de soja, selecionando aquele que melhor descreve as curvas de secagem. Além disso, buscou-se determinar o coeficiente de difusão efetivo e a energia de ativação para a secagem de grãos de soja das variedades analisadas. Foram utilizados grãos de soja de variedades precoces (NS7901RR e TMG1180RR) e de ciclo médio (TMG132RR e P98Y70). Os grãos foram submetidos à secagem em estufa de convecção mecânica (ar forçado) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C. Verificou-se que, de todos os modelos ajustados, o de Midilli foi o único que apresentou ajuste adequado para todas as variedades e em todas as condições de secagem testadas. Os valores dos coeficientes de difusão efetivos de todas as variedades aumentaram com a elevação da temperatura do ar de secagem, sendo que a maior diferença foi observada quando as variedades foram comparadas segundo o seu ciclo reprodutivo (precoce e médio). Essa observação também foi pertinente para a energia de ativação.

Keywords:

Glycine max L. Merrill
Mathematical Models
Moisture Content.

SOYBEAN GRAIN DRYING KINETS: VARIETAL INFLUENCE**ABSTRACT**

This work aimed to adjust different mathematical models to experimental data collected in grains drying from four distinct soybeans varieties, selecting the one that best describes the drying curves. Besides that, it sought to determine the effective diffusion coefficient and the activation energy for the drying of soybeans from analyzed varieties. It was used early cycle soybeans varieties (NS7901RR and TMG1180RR) and medium cycle (TMG132RR and P98Y70). The grains were dried in a forced air circulation oven, at temperatures of 40, 50, 60 and 70 °C. It was verified that, from all adjusted models, the Midilli model variety was the only one that presented satisfactory adjustment for all the varieties and in all the drying conditions tested. The values of effective diffusion coefficients of all varieties increased with the elevation of drying air temperature, that the biggest difference was observed when varieties were compared according to their reproductive cycle (early and medium). This observation was also relevant to the activation energy.

INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* L. Merrill) é uma das mais importantes culturas produzidas no mundo. Esse produto é muito usado na agroindústria para a produção de óleo vegetal e rações para alimentação animal, na indústria química e na indústria de alimentos (Costa Neto & Rossi, 2000).

No estado de Mato Grosso, geralmente, praticam-se duas safras anuais, sendo que, normalmente, a soja é plantada na primeira safra. A consequência disso é que a soja é colhida num período de altos índices pluviométricos, exigindo que o produto seja pré-processado rapidamente. As principais etapas do pré-processamento de grãos são a limpeza, a secagem e a armazenagem do produto.

A secagem é o processo mais utilizado para assegurar a qualidade e a estabilidade de grãos e sementes durante o armazenamento. A diminuição da quantidade de água contida nos grãos reduz a atividade biológica e as mudanças químicas e físicas que ocorrem durante o período de pós-colheita. A conservação pela secagem baseia-se no fato de que tanto os microrganismos como as enzimas e todo o mecanismo metabólico necessitam de água para suas atividades. Com a redução da quantidade de água disponível até níveis seguros para armazenagem, são reduzidas a atividade de água, a velocidade das reações químicas no produto e o desenvolvimento de microrganismos (Goneli *et al.*, 2007).

No desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamentos utilizados para a secagem de grãos, é de fundamental importância a simulação e a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto durante a remoção de água (Goneli *et al.*, 2007). A simulação da secagem ou mesmo a obtenção de variáveis físicas que visam explicar este processo, usualmente é feita por meio do ajustamento de modelos matemáticos que descrevam a variação do teor de água em relação ao tempo. Segundo Maskan (2002), esses modelos são enquadrados, de acordo com sua fundamentação física, em três tipos a saber: teóricos, empíricos e semiteóricos.

Na predição do processo de secagem, mesmo este sendo dependente das condições sob as quais os dados experimentais foram obtidos, várias teorias têm sido propostas, porém, na maioria das vezes, as relações semiempíricas e empíricas se mostraram como melhores opções (Brooker *et al.*, 1992).

Dentre os diferentes índices usados para avaliar a cinética de secagem dos produtos agrícolas, o coeficiente de difusão é um dos mais importantes. Esse índice possibilita avaliar e comparar a velocidade de secagem de produtos com tamanhos, formas e texturas diferentes. Além disso, por meio de análise da dependência do coeficiente de difusão com a temperatura, pode-se determinar alguns índices termodinâmicos que possibilitam analisar energeticamente o processo de secagem (Botelho *et al.*, 2015).

Diferentes fatores podem influenciar na taxa de secagem de grãos e sementes, e é, evidentemente, o que diferencia as curvas de secagem entre eles, como o tamanho da partícula, a constituição química, o teor de água inicial ou mesmo a vazão de ar. Todavia, vários trabalhos (Guarienti *et al.*, 2000; Silva *et al.*, 2002; Maehler *et al.*, 2003; Franceschi *et al.*, 2009; Pinnow *et al.*, 2013) já mostraram que fatores edafoclimáticos, o manejo do solo, a rotação de cultura, o uso de irrigação, o espaçamento entre plantas, dentre outros, podem influenciar aspectos físicos e químicos dos grãos produzidos, podendo esses fatores influenciar também a sua velocidade de secagem e, conseqüentemente, a curva de secagem descrita. Somando-se a isso, não necessariamente um mesmo modelo ajustado para descrever as curvas de secagem de uma mesma espécie pode ser utilizado para todas as suas variedades, como observou Resende *et al.* (2008) que verificaram que não foi possível utilizar um único modelo de secagem para descrever as curvas de secagem de grãos de feijão preto e de feijão vermelho.

Diante do exposto, objetivou-se, com o presente trabalho, ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados coletados experimentalmente na secagem da soja, selecionando aquele que melhor descreva as curvas de secagem. Além disso, buscou-se determinar o coeficiente de difusão efetivo e a energia de ativação para a secagem de grãos de soja das variedades analisadas.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido no laboratório de Pós-colheita da Universidade Federal de Mato Grosso – *Campus Sinop*, Sinop, Mato Grosso, Brasil.

Para a realização do experimento foram utilizados grãos de soja de variedades precoces, sendo NS7901RR com ciclo de produção (de acordo com as empresas produtoras de sementes) de 110 a 132 dias; TMG1180RR com ciclo de 110 a 115 dias, a variedade semiprecoce; TMG132RR com ciclo de 118 a 122 dias e a variedade de ciclo médio; e P98Y70 com ciclo de 135 a 140 dias, cultivadas na safra 2014/2015. Visando agrupar características, as variedades NS7901RR e TMG1180RR foram consideradas precoces, e as variedades TMG132RR e P98Y70 de ciclo médio.

Os grãos foram adquiridos de produtores do município de Sinop. Inicialmente os grãos foram limpos manualmente, sendo separados os grãos avariados e as impurezas. Os teores iniciais de água das amostras foram, respectivamente, 0,28 e 0,30 (b.s) para as variedades precoces NS7901RR e TMG1180RR, e 0,23 e 0,19 (b.s) para as variedades de ciclo médio TMG132RR e P98Y70. O teor de água foi determinado pelo método gravimétrico, utilizando-se uma estufa com circulação forçada de ar a 105 °C por 24 h em

três repetições de, aproximadamente, 30 g (Brasil, 2009, com adaptações).

Para a determinação da cinética de secagem, as amostras de grãos foram submetidas à secagem numa estufa de circulação forçada de ar, com resolução de 0,1 °C da marca Nova Ética® nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, sendo as mesmas dispostas em bandejas de chapas de aço galvanizado, perfuradas ($\varnothing = 2,5$ mm), com dimensões médias de 320 × 260 × 50 mm contendo, aproximadamente, 750 g de produto em duas repetições.

Iniciada a secagem, a massa das amostras foi medida periodicamente, em intervalos de 20 à 90 min (sendo menores no início da secagem) por meio de uma balança analítica com resolução de 0,01 g. O teor de água durante a secagem foi determinado por diferença de massa, conhecendo-se o teor inicial de água até que se atingisse o teor final de pelo menos 0,15 (b.s), que é o teor de água usual para comercialização da soja. Os dados experimentais da secagem dos grãos de soja foram ajustados por diferentes modelos matemáticos (Tabela 1) tradicionalmente utilizados em trabalhos científicos para a descrição da cinética de secagem de produtos agrícolas (Botelho, 2012; Santos et al., 2013; Goneli et al., 2014; Corrêa Filho et al., 2015).

Tabela 1. Modelos matemáticos utilizados para estimar as curvas de secagem de produtos agrícolas

Descrição do modelo	Modelo	
Aproximação da Difusão	$RU = d \exp(-kt) + (1 - d) \exp(-kft)$	(1)
Dois Termos	$RU = d \exp(-kt) + f \exp(-gt)$	(2)
Logaritmo	$RU = d \exp(-kt) + f$	(3)
Midilli	$RU = d \exp(-kt^n) + ft$	(4)
Page	$RU = \exp(-kt^n)$	(5)
Verma	$RU = d \exp(-kt) + (1 - d) \exp(-gt)$	(6)

em que,

RU = razão de umidade, adimensional;

t = tempo de secagem, min;

k = constante de secagem, min^{-1} ; e

d, f, g e n = coeficientes de ajustes dos modelos, adimensionais.

A razão de umidade do produto durante a secagem, para as diferentes temperaturas do ar, foi determinada por meio da Eq. 7.

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

em que,

U_t = teor de água do produto num dado instante de tempo, % (b.s.);

U_e = teor de água do produto em equilíbrio, % (b.s.); e

U_o = teor inicial de água do produto, % (b.s.).

O teor de água de equilíbrio foi obtido a partir do modelo Oswin com seus coeficientes ajustados para o processo de dessecção, de acordo com a Eq. 8 (Aviara *et al.*, 2004).

$$U_e = (19,024 + (-0,151T) \left[\frac{UR}{1-UR} \right]^{3,72}) \quad (8)$$

em que,

T = temperatura absoluta (K); e

UR = umidade relativa, (decimal).

Para o ajuste dos modelos matemáticos foi feita a análise de regressão não-linear pelo método de Gauss Newton. O grau de ajuste do modelo foi avaliado por meio das magnitudes do desvio padrão da estimativa (SE) e do erro médio relativo (P), sendo que, de modo geral, quanto menores forem as magnitudes desses índices, melhor o ajuste do modelo aos dados observados. Os valores de SE e P para cada modelo foram calculados pelas Eq. 9 e 10, respectivamente:

$$SE = \sqrt{\frac{\sum(Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (9)$$

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (10)$$

em que,

Y = valor observado experimentalmente, adimensional;

\hat{Y} = valor estimado pelo modelo, adimensional;

n - número de observações experimentais; e

GLR = graus de liberdade do modelo (número de observações menos o número de parâmetros do modelo).

Além do erro médio relativo e do desvio padrão da estimativa, foram considerados ainda a magnitude do coeficiente de determinação (R^2) e a tendência da distribuição dos resíduos (aleatório ou tendencioso).

O coeficiente de difusão efetivo foi obtido por meio do ajuste do modelo matemático da difusão líquida (Eq. 11) aos dados experimentais da secagem dos grãos de soja. Essa equação é a solução, pela série de Fourier, para a segunda lei de Fick, desconsiderando a variação volumétrica do produto, considerando a forma geométrica esférica e a condição de contorno de teor de água conhecido na superfície do produto (Botelho, 2012).

$$RU = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[-\frac{n^2 \pi^2 D_{ef} t_s}{r_e^2} \right] \quad (11)$$

em que,

r_e = raio equivalente do produto, m;

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

n = número de termos em série; e

t_s = tempo, s.

O raio equivalente foi obtido por meio de avaliação das dimensões características principais de uma amostra de doze grãos para cada variedade, utilizando-se um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm.

Conhecendo as dimensões características dos grãos de soja, o raio equivalente foi então calculado por meio da Eq. 12 (Araujo *et al.*, 2014; Camicia *et al.*, 2015; Smaniotto *et al.*, 2015).

$$r_e = \sqrt[3]{(abc)}/2 \quad (12)$$

em que,

a = maior dimensão característica do produto, m;

b = dimensão característica intermediária do produto, m; e

c = menor dimensão característica do produto, m.

A dependência da cinética de secagem, usualmente medida pelo coeficiente de difusão efetivo, com temperatura, normalmente é avaliada por meio da Eq. 13, conhecida como Equação de Arrhenius. Por sua estrutura, torna-se possível

verificar que a relação de $\ln(D_{ef})$ em função do inverso da temperatura (T_a^{-1}), fornece uma reta cujo coeficiente angular permite estimar o valor da energia de ativação (Oliveira et al., 2013; Leite et al., 2015).

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

em que,

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

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

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

T_a = temperatura de secagem, K.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os índices estatísticos utilizados na seleção dos modelos matemáticos testados para descrever as curvas de secagem estão apresentados nas Tabelas 2 e 3.

Nota-se, nas Tabelas 2 e 3, que todos os modelos apresentaram baixas magnitudes dos valores do desvio padrão da estimativa (SE) e do erro médio relativo (P). Os modelos ajustados aos dados da modelagem matemática das variedades precoces NS7901RR e TMG1180RR apresentaram valores de SE variando entre 0,0089 a 0,0385 e 0,013 a 0,0553, respectivamente, enquanto que para as variedades de ciclo médio TMG132RR e P98Y70, os valores de SE variaram entre 0,0093 a 0,0312 e 0,0078 a 0,034, respectivamente. Para o desvio

Tabela 2. Erro médio relativo (P), desvio padrão da estimativa (SE), coeficiente de determinação (R^2), distribuição residual [DR, sendo tendenciosa (T) ou aleatória (A)] dos modelos utilizados para a descrição das curvas de secagem dos grãos de soja

Modelo		Variedades precoces								
		NS7901RR				TMG1180RR				
		SE	P (%)	R^2 (%)	DR	SE	P (%)	R^2 (%)	DR	
Temperatura de secagem	40 °C	1	0,0132	2,16	99,89	T	0,0130	1,54	99,75	A
		2	0,0135	2,16	99,89	T	0,0133	1,57	99,75	A
		3	0,0216	3,03	99,69	T	0,0208	3,57	99,36	T
		4	0,0148	1,77	99,86	A	0,0147	1,66	99,70	A
		5	0,0156	1,98	99,83	A	0,0141	1,56	99,69	A
		6	0,0132	2,16	99,89	T	0,0245	3,79	99,11	T
	50 °C	1	0,0164	2,28	99,63	A	0,0415	7,079	98,54	T
		2	0,0146	1,99	99,73	A	0,0289	3,827	99,32	A
		3	0,0139	1,96	99,73	A	0,0284	3,874	99,32	A
		4	0,0142	2,39	99,75	A	0,0291	3,831	99,32	A
		5	0,0231	3,83	99,56	T	0,0296	4,259	99,23	A
		6	0,0289	5,30	98,84	T	0,0344	5,419	99,00	T
	60 °C	1	0,0266	4,18	99,29	T	0,0267	3,36	99,28	T
		2	0,0143	1,66	99,81	A	0,0172	2,04	99,72	A
		3	0,0142	1,67	99,80	A	0,0168	2,03	99,72	A
		4	0,0144	1,66	99,80	A	0,0172	2,04	99,72	A
		5	0,0155	2,16	99,75	T	0,0187	2,20	99,63	A
		6	0,0144	1,63	99,79	A	0,0166	2,02	99,72	A
	70 °C	1	0,0385	4,87	98,56	T	0,0553	7,87	97,54	T
		2	0,0094	1,12	99,92	A	0,0235	2,68	99,60	A
		3	0,0148	1,94	99,79	T	0,0276	3,97	99,39	A
		4	0,0098	1,16	99,92	A	0,0262	2,72	99,51	A
		5	0,0090	1,14	99,92	A	0,0246	2,72	99,47	A
		6	0,0089	1,12	99,92	A	0,0225	2,62	99,60	A

Tabela 3. Erro médio relativo (P), desvio padrão da estimativa (SE), coeficiente de determinação (R²), distribuição residual [DR, sendo tendenciosa (T) ou aleatória (A)] dos modelos utilizados para a descrição das curvas de secagem dos grãos de soja

Modelo		Variedades de ciclo médio								
		TMG132RR				P98Y70				
		SE	P (%)	R ² (%)	DR	SE	P (%)	R ² (%)	DR	
Temperatura de secagem	40 °C	1	0,0159	2,72	99,65	A	0,0123	1,41	99,90	A
		2	0,0165	2,72	99,65	A	0,0134	1,41	99,90	A
		3	0,0312	4,11	98,64	T	0,0322	4,12	99,32	T
		4	0,0124	1,51	99,80	A	0,0120	1,21	99,92	A
		5	0,0265	4,34	98,95	T	0,0183	2,92	99,74	T
		6	0,0159	2,72	99,65	A	0,0130	1,30	99,89	A
	50 °C	1	0,0093	1,68	99,94	A	0,0083	1,60	99,96	A
		2	0,0096	1,69	99,94	A	0,0089	1,61	99,96	A
		3	0,0229	4,27	99,63	T	0,0340	5,84	99,27	T
		4	0,0108	1,90	99,92	A	0,0130	1,89	99,91	A
		5	0,0104	2,02	99,92	A	0,0126	2,37	99,89	T
		6	0,0201	3,43	99,72	T	0,0255	3,75	99,59	T
	60 °C	1	0,0212	1,51	99,69	A	0,0126	1,39	99,88	A
		2	0,0225	1,68	99,72	A	0,0141	1,40	99,88	A
		3	0,0202	1,58	99,72	T	0,0138	1,63	99,86	A
		4	0,0250	1,83	99,77	A	0,0140	1,29	99,88	A
		5	0,0195	1,74	99,69	T	0,0131	1,45	99,84	A
		6	0,0201	1,80	99,72	T	0,0126	1,39	99,88	A
	70 °C	1	0,0117	1,39	99,85	A	0,0081	0,68	99,93	A
		2	0,0122	1,41	99,85	A	0,0093	0,69	99,94	A
		3	0,0133	1,52	99,80	A	0,0093	0,81	99,92	A
		4	0,0114	1,31	99,87	A	0,0082	0,65	99,95	A
		5	0,0155	1,82	99,70	A	0,0078	0,88	99,93	A
		6	0,0117	1,39	99,85	A	0,0081	0,68	99,94	A

padrão da estimativa, os valores foram sempre menores que 10% para todas as variedades e para todas as temperaturas do ar de secagem testadas, sendo esse valor relatado como adequado em trabalhos de modelagem com modelos não-lineares (Costa et al., 2011; Souza et al., 2011).

Apesar de não ser um critério confiável para a seleção de modelos não-lineares, o coeficiente de determinação normalmente apresenta maiores valores para os modelos de melhor ajuste (Botelho et al., 2015). Nota-se, que para todas as condições de secagem testadas, os modelos apresentaram elevados valores do coeficiente de determinação, sendo estes sempre maiores que 97,5% para as variedades precoces e 98,6% para as variedades de ciclo médio, sendo coerentes com as baixas magnitudes de erros encontradas.

Observa-se, na Tabela 2, que de todos os modelos ajustados aos dados observados da secagem da variedade NS7901RR, apenas o modelo de Midilli (4) apresentou distribuição aleatória dos resíduos para todas as temperaturas utilizadas. Para a variedade TMG1180RR, os modelos que apresentaram distribuição aleatória dos resíduos foram Dois termos (2), Midilli (4) e Page (5). Para as variedades TMG132RR e P98Y70 (Tabela 3), os modelos Aproximação da difusão (1), Dois termos (2) e Midilli (4) mostraram-se com distribuição aleatória em todas as condições de secagem testadas.

A distribuição dos resíduos é uma avaliação subjetiva, mas, normalmente, um modelo é considerado aceitável se os valores residuais se encontrarem em uma zona horizontal perto de zero, formando distribuições aleatórias. Se as distribuições

dos resíduos formarem figuras geométricas, apresentarem regiões em que o modelo subestima ou superestima a condição real ou tenderem a se acumular em um ponto fora do eixo, a distribuição dos seus resíduos é considerada tendenciosa e o modelo é inadequado para representar o fenômeno em questão (Botelho, 2012).

A Figura 1 apresenta exemplos de distribuição de resíduos observados neste trabalho, sendo uma distribuição aleatória (A) e uma tendenciosa (B) para os modelos de Midilli e Verma, respectivamente, no ajuste dos dados de secagem da variedade TMG132RR, na temperatura de 50 °C.

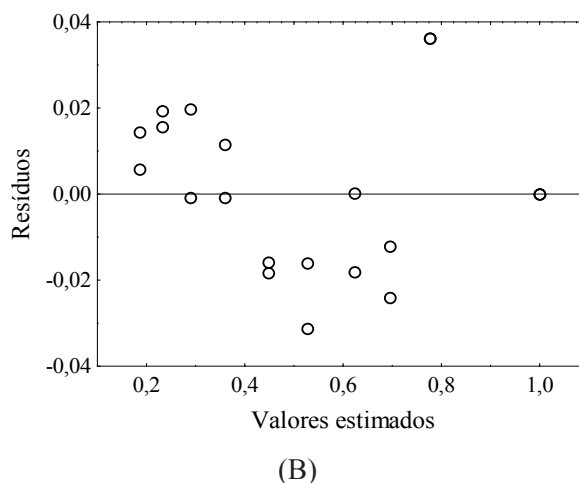
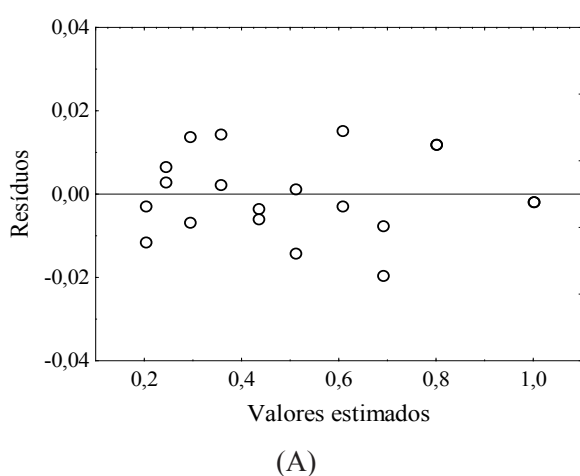


Figura 1. Exemplos de distribuição de resíduos aleatória (A) (modelo de Midilli) e tendenciosa (B) (modelo de Verma) referente à modelagem da cinética de secagem de grãos de soja da variedade TMG132RR.

Visou-se recomendar um modelo que tivesse maior abrangência possível para descrever a cinética de secagem das diferentes variedades de soja analisadas nesse trabalho. Desta forma, dentre os modelos recomendados, selecionou-se o de Midilli, visto que foi o único modelo com ajuste adequado em descrever a secagem em todas as condições propostas.

Tabela 4. Coeficientes ajustados do modelo de Midilli para secagem de grãos de soja das variedades NS7901RR e TMG1180RR

T (°C)	Variedades precoces							
	NS7901RR			TMG1180RR				
	a	k	n	b	A	k	n	B
40	0,9928	0,0098	0,7772	-0,0001	1,0046	0,0105	0,7870	0,00001
50	1,0018	0,0064	0,9455	0,0002	1,0126	0,0035	1,0444	0,0003
60	0,9929	0,0050	0,9913	0,0004	1,0007	0,0056	1,0210	0,0006
70	1,0039	0,0194	0,7937	0,0003	1,0006	0,0152	0,7876	0,0001

Tabela 5. Coeficientes ajustados do modelo de Midilli para secagem de grãos de soja das variedades TMG132RR e P98Y70

T (°C)	Variedades de ciclo médio							
	TMG132RR				P98Y70			
	a	k	n	b	A	k	n	B
40	0,9995	0,0390	0,4405	-0,0008	0,9997	0,0313	0,5183	-0,0005
50	1,0020	0,0191	0,7217	-0,0001	1,0027	0,0273	0,6313	-0,0001
60	1,0052	0,0035	1,1320	0,0006	0,9999	0,0118	0,8833	0,0004
70	0,9994	0,0055	1,1339	0,0014	0,9995	0,0147	0,8648	0,0007

Nas Tabelas 4 e 5, estão apresentados os coeficientes ajustados do modelo de Midilli para as variedades precoces e de ciclo médio, respectivamente, e para as diferentes temperaturas de secagem.

O modelo de Midilli é um modelo tradicional, frequentemente recomendado para descrever a secagem de produtos agrícolas em trabalhos semelhantes a este (Pandey *et al.*, 2015; Oliveira *et al.*, 2015, Botelho *et al.*; 2015).

As Figuras 2 e 3 apresentam os valores observados experimentalmente e os estimados pelo modelo de Midilli, com seus coeficientes em função da temperatura do ar de secagem para a descrição da cinética de secagem dos grãos de soja das variedades precoces e de ciclo médio.

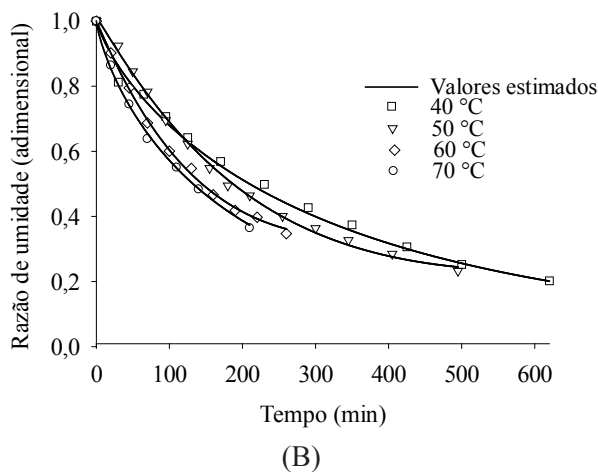
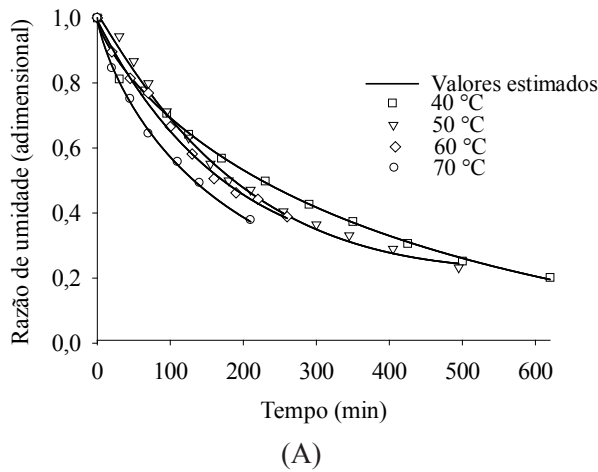


Figura 2. Correspondência entre os valores observados e os estimados pelo modelo de Midilli, com seus coeficientes descritos em função da temperatura do ar de secagem para as variedades precoces NS7901RR (A) e TMG1180RR (B), respectivamente.

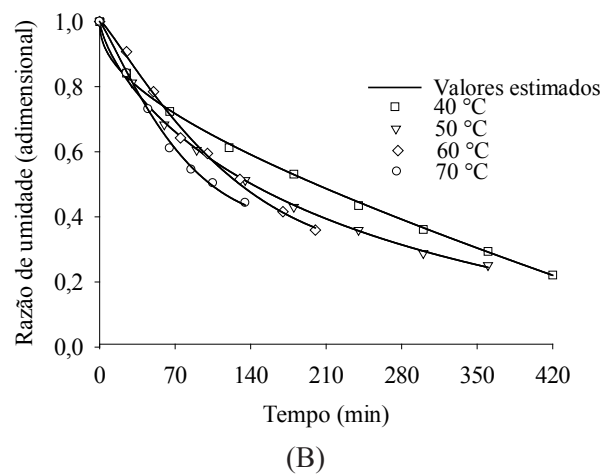
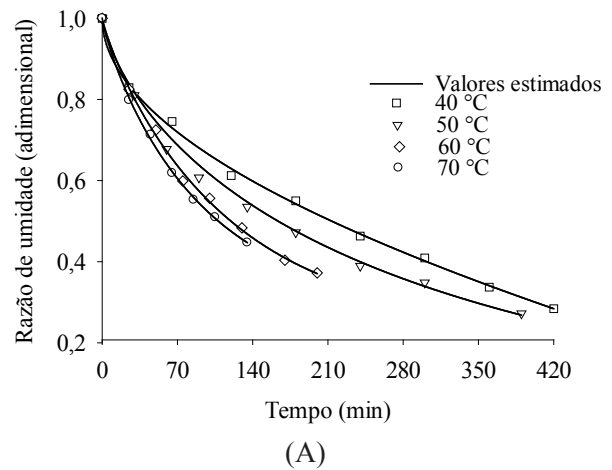


Figura 3. Correspondência entre os valores observados e os estimados pelo modelo de Midilli, com seus coeficientes descritos em função da temperatura do ar de secagem para as variedades de ciclo médio P98Y70 (A) e TMG132RR (B), respectivamente.

Observou-se, nas Figuras 2 e 3, que as curvas de secagem apresentaram uma tendência exponencial típica, observada em produtos agrícolas durante o período de secagem com taxa decrescente (Martins *et al.*, 2014; Camicia *et al.*, 2015). Além disso, nota-se uma elevada correspondência entre os dados observados experimentalmente e os dados estimados pelo modelos de Midilli, evidenciando que os índices estatísticos empregados foram eficazes para selecionar o modelo.

Verificou-se também que, de modo geral, ao aumentar a temperatura do ar, houve uma diminuição do tempo de secagem. Ao elevar a temperatura, aumentou-se o potencial de secagem do ar e a transferência de calor para o material, fazendo com que a velocidade de formação e migração do vapor d'água do interior para a superfície e ambiente fosse maior. É evidente que a velocidade de secagem diminui continuamente com o tempo, de acordo com a proximidade do teor de água do material ao seu teor de água de equilíbrio.

Na Tabela 6, estão apresentados os valores do coeficiente de difusão efetivo obtidos durante a secagem dos grãos de soja para as diferentes condições de temperatura do ar.

Os valores dos coeficientes de difusão efetivos de todas as variedades aumentaram com a elevação da temperatura do ar de secagem, sendo coerentes com os resultados citados na literatura para secagem de produtos agrícolas, que, segundo Madamba et al. (1996), apresentam valores da ordem de 10^{-11} a 10^{-9} $m^2 s^{-1}$ (Tabela 6).

O coeficiente de difusão efetivo é um índice que possibilita avaliar a velocidade de secagem e sua dependência com a temperatura, sendo, frequentemente, relatado em trabalhos similares à este, como observaram Morais et al. (2013), na secagem de grãos de feijão-caupi, e Souza et al. (2011), durante a secagem de nabo forrageiro.

Com a elevação da temperatura, aumenta-se o nível de vibração das moléculas de água,

favorecendo a difusão do vapor d'água durante a secagem no produto (Goneli et al., 2007) e, conseqüentemente, aumentando o coeficiente de difusão.

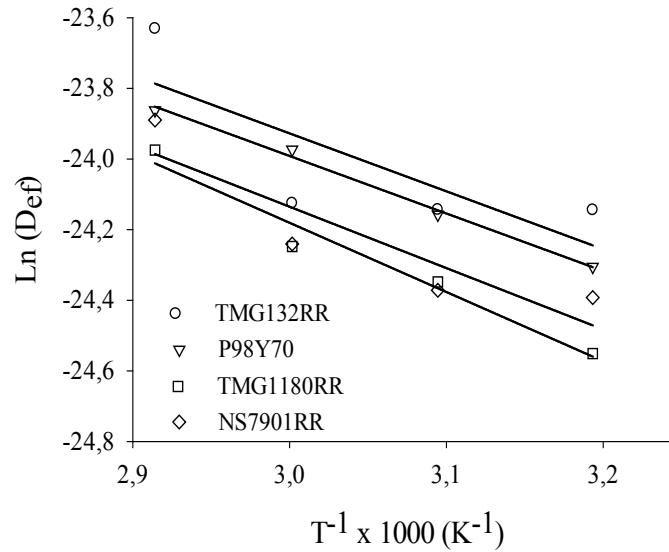
Os valores obtidos variaram de $2,1763 \times 10^{-11}$ a $3,8721 \times 10^{-11}$ e $2,5502 \times 10^{-11}$ a $4,216 \times 10^{-11}$ $m^2 s^{-1}$ para as variedades precoces NS7901RR e TMG1180RR, respectivamente, para a faixa de temperatura de 40 a 70 °C; $3,2688 \times 10^{-11}$ a $5,4595 \times 10^{-11}$ e $2,7828 \times 10^{-11}$ a $4,3340 \times 10^{-11}$ $m^2 s^{-1}$ para as variedades de ciclo médio TMG132RR e P98Y70, respectivamente, para a faixa de temperatura de 40 a 70 °C.

Observou-se que os valores do coeficiente de difusão efetivo das variedades de ciclo médio foram sempre superiores àqueles das variedades precoces. Segundo Botelho et al. (2015), grãos de mesma espécie, apesar de apresentarem constituição química semelhante, podem apresentar algumas variações físicas que ocorrem devido às características varietais, como o tamanho médio dos grãos e a relação superfície-volume. No caso deste trabalho, por exemplo, o raio equivalente das variedades foi de 3,37 mm para a variedade NS7901RR; 3,10 mm para a variedade TMG1180RR; 3,09 mm para a variedade TMG132RR e 3,225431139 mm para a variedade P98Y70.

A dependência do coeficiente de difusão efetivo de grãos de soja, em relação à temperatura do ar de secagem, representada pela equação de Arrhenius, conforme apresentada na Figura 4.

Tabela 6. Coeficientes de difusão efetivos de grãos de soja das variedades NS7901RR, TMG1180RR, TMG132RR e P98Y70, para diferentes temperaturas do ar de secagem

Temperatura (°C)	$D_{ef} \times 10^{-11}(m^2s^{-1})$			
	Variedades precoces		Variedades de ciclo médio	
	NS7901RR	TMG1180RR	TMG132RR	P98Y70
40	2,1763	2,5502	3,2688	2,7828
50	2,6652	2,6035	3,2705	3,2251
60	2,9467	2,9678	3,3311	3,8788
70	3,8721	4,2160	5,4595	4,3340



$$\text{NS7901RR : } \ln(D_{ef}) = -18,30 - \frac{16,30}{8,314 \times T}$$

$$\text{P98Y70 : } \ln(D_{ef}) = -19,108 - \frac{13,53}{8,314 \times T}$$

$$\text{TMG1180RR : } \ln(D_{ef}) = -18,92 - \frac{14,45}{8,314 \times T}$$

$$\text{TMG132RR : } \ln(D_{ef}) = -19,01 - \frac{13,64}{8,314 \times T}$$

Figura 4. Relação da dependência do coeficiente de difusão efetivo (D_{ef}) dos grãos de soja de diferentes variedades com a temperatura do ar de secagem, por meio da representação de Arrhenius.

Observa-se na Figura 4 que para a faixa de temperatura analisada (40 – 70 °C), a variação do coeficiente de difusão efetivo dos grãos de soja, para todas as variedades, foi uniforme, quando relacionada com a temperatura do ar de secagem, havendo elevada correspondência entre os dados observados e os estimados pela relação de Arrhenius.

A energia de ativação para a difusão de água nos grãos de soja, durante o processo de secagem para a faixa de temperatura estudada, foi de 16,30 e 14,45 kJ mol^{-1} para as variedades precoces NS7901RR e TMG1180RR e 13,34 e 13,53 kJ mol^{-1} para as variedades de ciclo médio TMG132RR e P98Y70, respectivamente.

A energia de ativação é a energia mínima necessária para desencadear o processo difusivo do vapor d'água no produto (Kashaninejad et al., 2007), podendo ser utilizada para comparar a secagem entre produtos diferentes. Neste trabalho, observou-se que houve uma pequena diferença na energia de ativação entre as variedades precoces, e que foi praticamente nula para as variedades de

ciclo médio. Ao comparar as variedades precoces com as de ciclo médio, observou-se que o primeiro grupo apresentou, de modo geral, uma energia de ativação maior do que o segundo.

A faixa de ocorrência de valores de energia de ativação de produtos agrícolas descritos na literatura é bastante ampla, sendo de, segundo Zogzas et al. (1996), 12,7 a 110 kJ mol^{-1} . Assim, pode-se dizer que a diferença total entre as variedades foi relativamente pequena, indicando que a secagem da soja muda pouco de uma variedade para outra.

CONCLUSÕES

Diante dos resultados encontrados e nas condições em que foi realizado o experimento, concluiu-se que:

- Para a variedade de soja NS7901RR, o modelo que melhor se ajusta aos dados observados da secagem é o modelo de Midilli. Para a variedade TMG1180RR, são os modelos Dois termos, Midilli e Page e, para as variedades TMG132RR e P98Y70, são os modelos

Aproximação da difusão, Dois termos e Midilli.

- O coeficiente de difusão efetivo, independentemente da variedade, aumenta com a elevação da temperatura do ar de secagem. Os valores obtidos variaram de $2,1763 \times 10^{-11}$ a $3,8721 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e $2,5502 \times 10^{-11}$ a $4,216 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para as variedades precoces NS7901RR e TMG1180RR, respectivamente. Já para as variedades de ciclo médio TMG132RR e P98Y70, o valores variaram de $3,2688 \times 10^{-11}$ a $5,4595 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e $2,7828 \times 10^{-11}$ a $4,3340 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, respectivamente.
- As variedades de ciclo médio apresentam maiores valores do coeficiente de difusão efetivo e, conseqüentemente, apresentaram uma maior velocidade de secagem quando comparadas com as variedades precoces.
- A energia de ativação para a difusão de água nos grãos de soja, durante o processo de secagem para a faixa de temperatura estudada, é de 16,30 e 14,45 kJ mol^{-1} para as variedades precoces NS7901RR e TMG1180RR e 13,34 e, 13,53 kJ mol^{-1} para as variedades de ciclo médio TMG132RR e P98Y70, respectivamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, W.D.; GONELI, A.L.D.; SOUZA, C.M.A.; GONÇALVES, A.A.; VILHASANTI H.C.B. 2014. Propriedades físicas do amendoim durante a secagem. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, PB, v.18, n.3, p.279-286, 2014.

AVIARA, N.A.; AJIBOLA, O.O.; ONI, S.A. Sorption Equilibrium and Termo Dynamic Characteristics of Soya Bean. *Biosystems Engineering*, London, v.87, n.2, p.179-190, 2004.

BOTELHO, F.M. Cinética de Secagem, Propriedades Físicas e Higroscópicas dos Frutos e Caracterização do Processo de Torrefação dos Grãos de *Coffea canephora*. 2012. 141f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

BOTELHO, F.M.; GARCIA, T.R.B.; VIANA, J.L.;

BOTELHO, S.C.C.; SOUSA, A.M.B. Cinética de secagem e determinação do coeficiente de difusão efetivo de grãos de sorgo. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, Sete Lagoas, MG, v.14, n.2, p.260-272, 2015.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Regras para análise de sementes. Brasília, DF: Mapa/ACS, 2009. 395p.

BROOKER, D.B., BAKKER-ARKEMA, F.W., HALL, C.W. *Drying and storage of grains and oilseeds*. New York, EUA: Westport: The AVI Publishing Company, 1992. 450p.

CAMICIA, R.G.M.; CHRIST, D.; COELHO, S.R.M.; CAMICIA, R.F.M. Modelagem do processo de secagem de sementes de feijão-caupi. *Revista Caatinga*, Mossoró, RN, v.28, n.3, p.206-214, 2015.

CORRÊA FILHO, L.C.; ANDRADE, E.T.; MARTINAZZO, A.P.; D'ANDREA, E.M.; SOUSA, F.A.; FIGUEIRA, V.G. Cinética de secagem, contração volumétrica e análise de difusão líquida do figo (*Ficus carica* L.). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, PB, v.19, n.8, p.797-802, 2015.

COSTA NETO, P.R.; ROSSI, L.F.S. Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em fritura. *Química Nova*, São Paulo, SP, v.23, n.4, p.531-537, 2000.

COSTA, L.M.; RESENDE, O.; SOUSA, K.A.; GONÇALVES D.N. Coeficientes de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de semente de crambe. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, PB, v.15, n.10, p.1089-1096, 2011.

FRANCESCHII, L., BENIN, G.; GUARIENTI, E.; MARCHIORO, V.S.; MARTIN, T.N. Fatores pré-colheita que afetam a qualidade tecnológica de trigo. *Ciência Rural*, v.39, n.5, 2009.

- GONELI, A.L.D.; CÔRREA, 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, SP, v.27, n.1, p.135-140, 2007.
- GONELI, A.L.D.; VIEIRA, M.C.; VILHASANTI, H.C.B.; GONÇALVES, A.A. Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, GO, v.44, n.1, p.56-64, 2014.
- GUARIENTI, E. M.; SANTOS, H. P.; LHANMBY, J. C. B.; Influência do manejo do solo e da rotação de culturas na qualidade industrial do trigo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. v.35, n.12, p.2375-2382, dez. 2000.
- KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L.G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. *Journal of Food Engineering*, London, v.78, n.1, p.98-108, 2007.
- LEITE, A.L.M.P.; SILVA, F.S.; PORTO, A.G.; PIASSON, D.; SANTOS, P. 2015. Contração volumétrica e cinética de secagem de fatias de banana variedade Terra. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, GO, v.45, n.2, p.155-162, 2015.
- MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. The thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, London, v.29, n.1, p.75-97, 1996.
- MAEHLER, A.R.; COSTA, J.A.; PIRES, J. L.F.; RAMBO, L. Qualidade de grãos de duas cultivares de soja em função da disponibilidade de água no solo e arranjo de plantas. *Ciência Rural*, v.33, n.2, 2003.
- MARTINS, J.J.A.; MARQUES, J.I.; SANTOS, D.C. Modelagem matemática da secagem de cascas de mulungu. *Bioscience Journal*, Uberlândia, MG, v.30, n.6, p.1652-1660, 2014.
- MASKAN, M. Effect of processing on Hydration kinetics of three wheat products of the same variety. *Journal of Food Engineering*, London, v.52, n.4, p.337-341, 2002.
- MORAIS, S.J.S.; DEVILLA, I.A.; FERREIRA, D.A.; TEIXEIRA, I.R. Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L.) Walp.). *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, CE, v.44, n.3, p.455-463, 2013.
- OLIVEIRA, D.E.C.; RESENDE, O.; BESSA, J.F.V.; KESTER, A.N.; SMANIOTTO, T.A.S. Mathematical modeling and thermodynamic properties for drying soybean grains. *African Journal of Agricultural Research*, Punjab, Paquistão, v.10, n.1, p.31-38, 2015.
- OLIVEIRA, M.T.R.; BERBERT, P.C.; MARTINAZZO, A.P. Avaliação de modelos matemáticos na descrição das curvas de secagem por convecção de *Pectis brevipedunculata* (Gardner) Sch. Bip. *Revista Brasileira de Plantas Mediciniais*, Botucatu, SP, v.15, n.1, p.1-12, 2013.
- PANDEY, S.K.; DIWAN, S.; SONI, R. Review of mathematical modelling of thin layer drying process. *International Journal of Current Engineering and Scientific Research*, Índia, v.2, n.1, p.96-107, 2015.
- PINNOW, C.; BENIN, G.; VIOLA, V.; SILVA, C.L.; GUTKOSKI, L.C.; CASSOL, L.C. Qualidade industrial do trigo em resposta à adubação verde e doses de nitrogênio. *Bragantia*, v.72, n.1, p.20-28, 2013.
- SANTOS, D.C.; QUEIROZ, A.J.M.; FIGUEIRÊDO, R.M.F.; OLIVEIRA, E.N.A. Cinética de secagem de farinha de grãos residuais de urucum. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, PB, v.17, n.2, p.223-231, 2013.
- SILVA, E.B.; NOGUEIRA, F.D.; GUIMARÃES, P.T.G. Qualidade de grãos de café beneficiados em resposta à adubação potássica. *Scientia Agrícola*, v. 59, n.1, p.173-179, 2002.

CINÉTICA DE SECAGEM DE GRÃOS DE SOJA: INFLUÊNCIA VARIETAL

SMANIOTTO, T.A.S.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D.E.C.; SIQUEIRA, V.C.; SOUSA, K.A. Ajuste de modelos matemáticos a contração volumétrica unitária e da massa dos grãos de soja. Revista Agro@mbiente On-line, Boa Vista, RR, v.9, n.4, p.397-404, 2015.

SOUZA, K.A.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H.;

COSTA, L.M. Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). Revista Ciência Agronômica, Fortaleza, CE, v.42, n.4, p.883-892, 2011.

ZOGZAS, N.P.; MAROULIS, Z.B.; MARINOS-KOURIS, D. 1996. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. Drying Technology, Portugal, v.14, n.10, p.2225-2253, 1996.