

MODELAGEM MATEMÁTICA DAS CURVAS DE SECAGEM DE GRÃOS DE FEIJÃO CAUPI

KIMBERLLY CARLOT¹, FERNANDO MENDES BOTELHO², SILVIA DE CARVALHO CAMPOS BOTELHO³, ALINE DE OLIVEIRA⁴, JOSÉ ÂNGELO NOGUEIRA DE MENEZES JÚNIOR⁵

¹ Graduanda em Engenharia Agrícola e Ambiental, UFMT Sinop (MT), (66) 996695067, kimbcarlot@gmail.com

² Dr. em Engenharia Agrícola, Prof. Adjunto, Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, UFMT, Sinop (MT)

³ Dra. em Engenharia Agrícola, Pesquisadora A – Embrapa Agrossilvipastoril, Sinop (MT)

⁴ Engenheira Agrícola e Ambiental, UFMT Sinop (MT)

⁵ Dr. em Genética e Melhoramento, Pesquisador A – Embrapa Agrossilvipastoril, Sinop (MT)

Apresentado no
XLVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2018
06, 07 e 08 de agosto de 2018 - Brasília - DF, Brasil

RESUMO: A secagem de produtos agrícolas é amplamente utilizada no mundo para o controle e a manutenção da qualidade, tornando importante o estudo teórico e a modelagem do processo de secagem dos produtos agrícolas. Objetivou-se com o presente trabalho ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem de grãos de feijão caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). Foram utilizados grãos de feijão caupi colhidos e debulhados manualmente, com teor de água inicial de aproximadamente 19,5% (b.s.). A secagem do feijão caupi foi realizada numa estufa com circulação forçada de ar nas temperaturas de 50, 60, 70 e 80 ± 1 °C até um teor de água final médio de 11% (b.s.). Aos dados experimentais foram ajustados dez modelos matemáticos tradicionalmente utilizados para a representação do processo de secagem de produtos agrícolas. A seleção do melhor modelo foi baseada na magnitude do erro cometido e na avaliação da distribuição residual. Conclui-se que, dentre os modelos analisados de Midilli, Aproximação da Difusão e Verma foram os que melhor se ajustaram aos dados observados experimentalmente e, conseqüentemente, os que melhor descreveram as curvas de secagem do feijão caupi.

PALAVRAS-CHAVE: CINÉTICA DE SECAGEM, MODELOS MATEMÁTICOS, *Vigna unguiculata*.

MATHEMATICAL MODELING OF COWPEA BEANS' DRYING CURVES

ABSTRACT: Drying of agricultural products is widely used in the world for control and maintenance of quality, making the theoretical study and modeling of the drying process of agricultural products important. The objective of this work was to adjust different mathematical models to the experimental data on cowpea bean's drying (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). Cowpea beans manually harvested and threshed were used, with initial moisture content of approximately 19.5% (d.b.). The drying of cowpea beans was carried out in a forced air circulation oven at temperatures of 50, 60, 70 and 80 ± 1 °C to an average final moisture content of 11% (d.b.). To the experimental data were adjusted ten mathematical models traditionally used to represent the drying process of agricultural products. The selection of the best model was based on the error's magnitude and the residual distribution. It was concluded that, among the models analyzed, those of Midilli, Diffusion Approximation and Verma were the ones that best fit the data observed experimentally and, consequently, those that best described cowpea beans' drying curves.

KEYWORDS: KINETICS OF DRYING, MATHEMATICAL MODELS, *Vigna unguiculata*.

INTRODUÇÃO: A produção de feijão caupi no Brasil ocorre especialmente nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste e vem se expandindo devido principalmente ao baixo custo e a possibilidade de bons rendimentos desta leguminosa (EMBRAPA, 2016).

Durante a fase de pós-colheita do feijão, sua qualidade e estabilidade devem ser garantidas e a secagem é o processo mais utilizado para assegurar essas características, pois com a redução de água

do produto, a atividade biológica e as mudanças físicas e químicas também diminuem (RESENDE et al., 2010). Estudos acerca dos sistemas e processos de secagem, seu dimensionamento, otimização e de sua viabilidade comercial, podem ser feitos através de simulação matemática cujo princípio se fundamenta na secagem de camadas delgadas, utilizando um modelo matemático que represente satisfatoriamente a perda de água do produto em relação ao tempo (RESENDE et al, 2007).

Vários trabalhos já foram desenvolvidos para avaliar e modelar as curvas de secagem de diversos tipos de produtos agrícolas como: sementes de crambe (COSTA et al., 2011); morangos (OLIVEIRA et al., 2015); café (CORRÊA et al., 2010).

Sendo assim, o objetivo de se realizar este trabalho foi estudar e modelar as curvas de secagem de grãos de feijão caupi para diferentes temperaturas do ar de secagem.

MATERIAL E MÉTODOS: Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Pós-colheita de Engenharia Agrícola e Ambiental, pertencente à Universidade Federal de Mato Grosso. Foram utilizados grãos de feijão caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) colhidos e debulhados manualmente, com teor de água inicial de aproximadamente 19,5% b.s., acondicionados em sacos plásticos e armazenados em refrigerador. Antes de cada experimento de secagem, as amostras foram retiradas do refrigerador e mantidas à temperatura ambiente, buscando homogeneizar a temperatura dos grãos. O Os teores de água do produto foram determinados pelo método gravimétrico em estufa a 105 ± 1 °C, até massa constante, em três repetições, de acordo com as Regras para Análises de Sementes (BRASIL, 2009).

A secagem do produto foi realizada em uma estufa com circulação forçada de ar, nas temperaturas 50, 60, 70 e 80 ± 1 °C. Para cada temperatura do ar de secagem, foram utilizadas duas amostras com massa de 1000 g, acondicionadas em bandejas com dimensões médias de $320 \times 260 \times 50$ mm.

Para a determinação da razão de umidade dos grãos feijão-caupi para as diferentes condições de secagem, foi utilizada Equação 1. A umidade de equilíbrio foi calculada pelo modelo matemático de GAB, com seus parâmetros determinados pelo processo de desorção (MORAIS, 2010).

$$RU = \frac{U - U_e}{U_0 - U_e} \quad (1)$$

Em que: RU é a razão de umidade (adimensional); U é o teor de água num dado instante de tempo(% b.s.); U_e é o teor de água de equilíbrio (% b.s.) e U₀ é o teor de água inicial (% b.s.).

Os modelos matemáticos que foram ajustados aos dados experimentais visando descrever as curvas de secagem estão apresentados na Tabela 1. Para o ajuste foi utilizada análise de regressão não linear dos tipos polinomial de segundo grau e exponencial, por meio do *software* STATISTICA 10.

Tabela 1 - Modelos de regressão não-linear utilizados para prever o fenômeno de secagem em camada delgada de grãos de feijão caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.)

Nome	Modelo	
Aproximação da difusão	$RU = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	2
Dois termos	$RU = a \exp(-kt) + b \exp(-gt)$	3
Exponencial de dois termos	$RU = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	4
Henderson e Pabis	$RU = a \exp(-kt)$	5
Logaritmo	$RU = a \exp(-kt) + b$	6
Midili	$RU = a \exp(-kt^n) + bt$	7
Page	$RU = \exp(-kt^n)$	8
Thompson	$RU = \exp((-a - (a^2 + 4bt)^{1/2}) / 2b)$	9
Verma	$RU = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	10
Wang e Singh	$RU = 1 + at + bt^2$	11

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Observa-se, que nas quatro temperaturas utilizadas para a secagem do feijão caupi (50, 60, 70 e 80 °C), todos os modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais apresentaram coeficientes de determinação (R^2) superiores a 99,9%. O coeficiente de determinação apesar de usualmente citado e apresentar os maiores valores para os modelos de melhor ajuste, segundo Madamba et al. (1996), não é um índice confiável para avaliação de modelos não lineares. Além disso, os modelos avaliados apresentaram valores inferiores a 10% de erro médio relativo, mostrando, conforme com Mohapatra e Rao (2005), uma descrição satisfatória do processo de secagem e bom ajuste para fins práticos.

Verifica-se ainda que os modelos de Aproximação da Difusão (2), Midilli (7) e Verma (10) foram os únicos que apresentaram distribuição aleatória dos resíduos, para todas as temperaturas de secagem. Um modelo é considerado aleatório se os valores residuais se encontrarem próximos à faixa horizontal em torno de zero e também não formarem figuras definidas, não indicando tendenciosidade dos resultados. Se apresentar distribuição tendenciosa, o modelo é considerado inadequado para representar o fenômeno em questão (GONELI et al., 2009). Esses modelos também estão entre os que apresentaram menores magnitudes do desvio padrão da estimativa, indicando, também por esse índice, baixa magnitude do erro cometido na estimação dos dados observados.

TABELA 1. Erro médio relativo (P), desvio padrão da estimativa (SE), coeficiente de determinação (R^2) e tendência da distribuição de resíduos dos modelos utilizados para a descrição das curvas de secagem dos grãos de feijão caupi

Modelo	50 °C				60 °C			
	R^2 (%)	P (%)	SE	Distribuição Residual*	R^2 (%)	P (%)	SE	Distribuição Residual*
2	99,98	0,2276	0,0030	A	99,96	0,0625	0,0009	A
3	99,98	0,2329	0,0036	A	99,99	0,0688	0,0011	T
4	99,87	0,9845	0,0084	T	99,99	0,2301	0,0022	T
5	98,35	3,5663	0,0302	T	99,85	1,1001	0,0088	T
6	99,86	0,8894	0,0101	A	99,99	0,1211	0,0014	T
7	99,99	0,1734	0,0026	A	99,99	0,0545	0,0009	A
8	99,97	0,4349	0,0038	A	99,96	0,4815	0,0042	T
9	99,98	0,3423	0,0032	A	99,98	0,2495	0,0023	T
10	99,98	0,2276	0,0030	A	99,99	0,0676	0,0009	A
11	99,38	1,7301	0,0185	T	99,98	0,2976	0,0027	T
Modelo	70 °C				80 °C			
2	99,96	0,4467	0,0052	A	99,99	0,1381	0,0017	A
3	99,96	0,4478	0,0073	A	99,99	0,1381	0,0024	A
4	99,95	0,5319	0,0051	T	99,99	0,1983	0,0017	A
5	99,73	1,3261	0,0117	T	99,53	1,6167	0,0158	T
6	99,93	0,6271	0,0071	T	99,94	0,6687	0,0067	A
7	99,96	0,4291	0,0072	A	99,99	0,0937	0,0015	A
8	99,96	0,4651	0,0045	A	99,98	0,3398	0,0028	A
9	99,95	0,5272	0,0051	T	99,97	0,4839	0,0040	A
10	99,96	0,4467	0,0052	A	99,99	0,1381	0,0017	A
11	99,86	1,0003	0,0086	T	99,86	1,0003	0,0086	A

Os coeficientes dos três modelos ((Aproximação da Difusão (2), Midilli (7) e Verma (10)) que foram os que melhor descreveram as curvas de secagem do feijão caupi. nas condições em que foram realizados esse experimento, estão apresentados na tabela 2.

TABELA 2. Coeficientes para os modelos matemáticos ajustados da curva de secagem do feijão caupi para cada a temperatura

Temperatura	50 °C					60 °C				
	Coeficientes					Coeficientes				
MODELO	a	k	b	n	g	a	k	b	n	g
2	0,1900	0,0224	0,0224			0,9766	0,0053	-1,1740		
7	1,0000	0,0110	0,0002	0,8365		1,0001	0,0052	0,0005	1,0154	
10	0,8100	0,0031			0,0224	0,9766	0,0053			-0,0062
Temperatura	70 °C					80 °C				
2	0,0559	0,0624	0,1144			0,0778	0,3986	0,0223		
7	1,0001	0,0139	-0,0006	0,8346		1,0000	0,0322	-0,0021	0,6149	
10	0,9441	0,0071			0,0625	0,9222	0,0089			0,5469

CONCLUSÕES: Concluiu-se que dentre os modelos analisados, Aproximação da Difusão, Midilli e Verma são os que melhor se ajustam aos dados observados experimentalmente e, conseqüentemente, os que melhor descrevem as curvas de secagem do feijão caupi.

REFERÊNCIAS:

- BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. **Regras para análises de sementes**. Brasília, 2009, 399 p.
- CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; BOTELHO, F. M.; GONELI, A. L. D.; CARVALHO, F. M. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, v. 57 (5), p. 595-601, 2010.
- 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.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa Meio Norte. Ministério da Agricultura, 2016.
- 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-MG, n.11, p.64-73, 2009. Especial Café.
- MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. Thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, London, v.29. n.1, p.75-97, 1996.
- MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v. 66, n. 4, p. 513-518, 2005.
- MORAIS, S. J. M. **Cinética de secagem de grãos de feijão caupi**. 2010. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Goiás, Goiás, 2010.
- OLIVEIRA, G. H. H.; ARAGÃO, D. M. S.; OLIVEIRA, A. P. L. R.; SILVA, M. G.; GUSMÃO, A. C. A. Modelling and thermodynamic properties of the drying of strawberries. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 18, n. 4, p. 314-321, out./dez. 2015.
- OLIVEIRA, R.A.; OLIVEIRA, W.P.; PARK, K.J. **Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.26, n.1, p.181-189, 2006.
- RESENDE, O.; FERREIRA, L.U.; ALMEIDA, P.D. Modelagem Matemática Para Descrição Da Cinética De Secagem Do Feijão Adzuki (*Vigna angularis*). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.12, n.2, p.171-178, 2010.