

AJUSTES DE MODELOS PARA A SECAGEM DE GRÃOS DE SORGO EM DIFERENTES TEORES DE ÁGUA

L. C. Moura¹, O. Resende², D. E. C. Oliveira³, G. B. Rodrigues⁴

RESUMO: O estudo de modelos matemáticos aplicados a secagem é importante para previsão da taxa de secagem, dimensionamento de secadores, melhoria das condições de secagem e avaliação da qualidade do processo. Assim, objetivou-se neste estudo selecionar o modelo matemático que melhor descreve a cinética de secagem dos grãos de sorgo em diferentes teores de água. Os grãos de sorgo (cultivar Dekalb 640) foram colhidos manualmente, no município de Jataí - GO, com teor de água inicial de $0,49 \pm 0,01$ base seca. A secagem foi determinada a partir dos teores de água 0,49; 0,39; 0,31; 0,23 (b.s), em temperatura de 80 °C. O processo de secagem foi interrompido quando os grãos de sorgo atingiram o teor de água de $0,10 \pm 0,006$ (b.s). Foram ajustados os modelos matemáticos Wang e Sing, Midilli, Page, Logarítmico e Newton, aos dados experimentais de secagem, selecionando estatisticamente o melhor modelo para prever a cinética de secagem dos grãos de sorgo. De acordo com os critérios de seleção Informação de Akaike (AIC), de Informação Bayesiano de Schwarz (BIC), coeficiente de determinação (R^2), erro médio estimado (SE) erro médio relativo (P), verificou-se que, dentre os modelos analisados o de Page foi recomendado para representar a secagem de grãos de sorgo.

PALAVRAS CHAVE: *Sorghum bicolor*, cinética de secagem, modelos matemáticos.

MODEL ADJUSTMENTS FOR THE DRYING OF SORGHUM GRAINS IN DIFFERENT MOISTURE CONTENTS

ABSTRACT: The study of mathematical models applied to drying is important for predicting the drying rate, drying sizing, improving the drying conditions and evaluating the process quality. The objective of this study was to select the mathematical model that best describes the drying kinetics of sorghum grains in different moisture contents. Sorghum grains (cultivar Dekalb 640) were harvested manually, in the municipality of Jataí - GO, with initial water content of 0.49 ± 0.01 dry basis. Drying was determined from the moisture contents 0.49; 0.39;

¹ Doutoranda, LPCPV/IF GOIANO - Rio Verde - Goiás. Email: ligialirios@hotmail.com

² Professor Doutor LPCPV/IF GOIANO - Rio Verde - Goiás.

³ Professor Doutor IF GOIANO - Iporá - Goiás.

⁴ Mestranda LPCPV/IF GOIANO - Rio Verde - Goiás.

0.31; 0.23 (b.s) at a temperature of 80 °C. The drying process was interrupted when the sorghum grains reached the moisture content of 0.10 ± 0.006 (b.s). The mathematical models Wang and Sing, Page, Logarithmic and Newton, were adjusted to the experimental data of drying, statistically selecting the best model to predict the drying kinetics of sorghum grains. According to the Akaike Information (AIC), Bayesian Schwarz Information (BIC), coefficient of determination (R^2), estimated average error (SE), mean relative error (P), it was found that among the Models analyzed from Page was recommended to represent the drying of grain sorghum.

KEYWORDS: Sorghum bicolor, drying kinetics, mathematical models.

INTRODUÇÃO

No Brasil, os cereais tem sido pouco explorado na alimentação humana, no entanto, ressurge com potencial em razão da presença de altos teores de fibra dietética e diversos compostos bioativos (DYKES et al., 2005; ROONEY, 2007) que contribuem positivamente para a nutrição e saúde humana.

A maneira de reduzir as perdas pós-colheita do sorgo é pelo processo de secagem, pois assegura qualidade e estabilidade, considerando que a diminuição da quantidade de água do material reduz a atividade biológica e as alterações químicas e físicas que ocorrem durante o armazenamento (RESENDE et al., 2008), que permitam o correto armazenamento por determinados períodos de tempo.

Por meio da secagem, é possível ser determinada a cinética de secagem, a qual procura determinar o comportamento do material sólido que é seco, sendo representada pelas curvas e taxas de secagem (MENEZES et al., 2013)

As informações contidas nas curvas de secagem são fundamentais para o desenvolvimento de processos e para o dimensionamento de equipamentos; com elas, pode-se estimar o tempo de secagem de certa quantidade de produtos, o tempo necessário para a produção, o gasto energético que refletirá no custo de processamento e influenciará no preço final do produto (VILELA & ARTUR, 2008).

A cinética de secagem pode ser descrita por meio de modelos matemáticos semiempíricos ou puramente empíricos (MADAMBA, 2003). Diante disto, é de fundamental importância o emprego de modelos matemáticos para representar o processo de secagem, haja vista que as

informações geradas são relevantes para o desenvolvimento de equipamentos e a predição dos tempos de secagem (SILVA, 2009).

Objetivou-se com este trabalho ajustar modelos matemáticos ao processo de secagem de grãos de sorgo em diferentes teores de água 0,49; 0,39; 0,31; 0,23 na temperatura de secagem de 80°C definindo o melhor modelo.

MATERIAL E MÉTODOS

Coleta dos grãos de sorgo

Os grãos de sorgo (cultivar Dekalb 640) foram colhidos manualmente, no município de Jataí - GO, com teor de água inicial de 0,49 (b.s). O experimento foi conduzido no Laboratório de Pós-colheita de Produtos Vegetais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Rio Verde.

Secagem dos grãos

Para obtenção dos diferentes teores de água os grãos de sorgo foram submetidos à secagem em estufa com ventilação forçada, regulada para 40°C. Durante a secagem o teor de água do sorgo foi monitorado por gravimetria, até atingirem 0,49; 0,39; 0,31; 0,23 (b.s); os quais são determinados pelo método da estufa a $105 \pm 3^\circ\text{C}$, durante 24 h, em três repetições (BRASIL, 2009).

Modelagem matemática da secagem

Para a determinação das razões de teor de água dos grãos de sorgo durante a secagem, foi utilizada a seguinte expressão:

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} \quad (1)$$

Em que: RX: razão de teor de água do produto, adimensional; X: teor de água do produto (b.s.); Xi: teor de água inicial do produto (b.s.); e Xe: teor de água de equilíbrio do produto (b.s.).

Ao longo da secagem foi acompanhada a redução do teor de água pelo método gravimétrico (perda de massa), com auxílio de uma balança analítica com resolução de 0,01 g. Conhecendo-se o teor de água inicial do produto, até atingir o teor de água desejado.

Os modelos matemáticos frequentemente utilizados para representação da secagem de produtos vegetais (Tabela 1) foram ajustados aos dados experimentais da secagem dos grãos de sorgo.

Os modelos matemáticos foram ajustados por meio de análise de regressão não linear pelo método Gauss-Newton. Para o grau de ajuste, foram consideradas as magnitudes do

coeficiente de determinação (R^2), do teste de *Qui*-quadrado (χ^2), do erro médio relativo (P – Equação 7) e do desvio padrão da estimativa (SE – Equação 8).

$$P = \frac{100}{N} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (7)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - Y_0)^2}{GLR}} \quad (8)$$

Em que: Y - valor observado experimentalmente, Y_0 - valor calculado pelo modelo, n - número de observações experimentais, GLR - graus de liberdade do modelo.

Além disso, foram utilizados para a escolha do melhor modelo matemático o critério de Akaike (AIC) e o critério de informação de Bayesiano (BIC). O AIC permite utilizar o princípio da parcimônia na escolha do melhor modelo, ou seja, de acordo com este critério nem sempre o modelo mais parametrizado é melhor (BURNHAM e ANDERSON, 2004).

O AIC é usado para comparar modelos não-aninhados ou quando estão sendo comparados três ou mais modelos. Menores valores de AIC refletem um melhor ajuste (AKAIKE, 1974). Sua expressão é dada por:

$$AIC = -2\loglike + 2p \quad (9)$$

Em que: p é o número de parâmetros, e loglike o valor do logaritmo da função de verossimilhança considerando as estimativas dos parâmetros.

O BIC também considera o grau de parametrização do modelo, e da mesma forma, quanto menor for o valor de BIC (SCHWARZ, 1978), melhor será o ajuste do modelo. É um critério assintótico, cuja adequação está fortemente relacionada com a magnitude do tamanho de amostra. Em relação a penalização aplicada na quantidade de parâmetros, esta será mais rigorosa que o AIC para amostras pequenas. Sua expressão é dada por:

$$BIC = -2\loglike + p\ln(n) \quad (10)$$

Em que: n é o número de observações utilizadas para ajustar a curva.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 são apresentados os valores para o teste de *Qui*-quadrado (χ^2) e erro médio estimado (SE) calculados para os cinco modelos utilizados na representação da curva de secagem de sorgo.

Em relação à análise de erro médio estimado (SE) e *Qui*-quadrado (χ^2), os modelos Midilli e Page, obtiveram menores valores comparativamente aos demais modelos para todos os teores de água.

Somente os valores de erro médio estimado (SE) e *Qui*-quadrado (χ^2) não são suficientes para determinar a qualidade do ajuste do modelo. Então, foi realizada uma análise conjunta do coeficiente de determinação (R^2) e erro médio relativo (P) para determinação do melhor modelo, conforme a Tabela 3.

Observa-se que os cinco modelos Wang e Singh, Midilli, Page, Logaritmico e Newton se ajustaram apresentando coeficientes (R^2) acima de 95%, que segundo Madamba et al. (1996) indicam uma representação satisfatória do fenômeno.

Nos valores do erro médio relativo (P), observaram-se valores inferiores a 10%, para todas as condições testadas entre os modelos, com exceção do modelo de Newton, e menores valores para Midilli e Page. Assim, por meio da análise conjunta dos parâmetros estatísticos (R^2 , P, SE e χ^2) os modelos de Midilli e Page apresentaram melhor ajuste ao processo de secagem para os grãos de sorgo em todos os teores de água.

Essas estatísticas são de grande importância na análise de regressão, pois penalizam modelos com número excessivos de parâmetros, selecionando modelos mais parcimoniosos (CARVALHO, 2010).

Os critérios de seleção Informação de Akaike (AIC) e de Informação Bayesiano de Schwarz (BIC) podem confirmar a superioridade entre os dois modelos selecionados Midilli e Page, pois, quanto menores os valores de AIC e BIC melhor o ajuste do modelo conforme Tabela 4.

Por meio da análise conjunta de AIC e BIC verificou-se que dentre os dois modelos selecionados para representação do fenômeno da secagem o modelo de Page apresentou melhor ajuste aos dados experimentais em relação ao modelo Midilli, pois apresentou menor valor de AIC e BIC para os diferentes teores de água analisados.

Os coeficientes do modelo de Page foram significativos pelo teste t, mostrando que estes podem ser utilizados satisfatoriamente para representar a secagem dos grãos de sorgo (Tabela 5). Por outro lado, o modelo de Midilli apresentou coeficientes que não foram significativos pelo teste t. Para a representação gráfica das curvas de secagem, utilizou-se o modelo de Page conforme Figura 1.

Santos et al. (2013), na secagem de grãos de urucum, também obtiveram mais de um modelo que se ajustou aos dados experimentais, selecionando também o modelo de Page para representação do fenômeno de secagem.

Resende et al. (2014) avaliando a secagem de grãos de sorgo (*Sorghum bicolor*[L.] Moench) da cultivar AS4620, concluíram que o modelo de Page representou satisfatoriamente o comportamento desse fenômeno.

CONCLUSÃO

Dentre os modelos estudados Midilli e Page apresentaram bons ajustes aos dados experimentais. O critério de Akaike (AIC) e o critério de informação de Bayesiano (BIC) foram utilizados para a escolha do melhor modelo matemático sendo Page recomendado para representar a secagem de grãos de sorgo.

AGRADECIMENTOS

Ao IF Goiano - Campus Rio Verde, à CAPES, FINEP e ao CNPq pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. **Regras para Análise de Sementes**. Brasília: Mapa/ACS. p. 395, 2009.

BURNHAM, K.P.; ANDERSON, D.R. Multimodel Inference: Understanding AIC and BIC in Model Selection. **Sociological methods & research**, v.33, n.2, p.261-304, 2004.

CARVALHO, S.P.C. **Uma nova metodologia de avaliação do crescimento e da produção de Eucalyptus sp clonal para fins energéticos**. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 103 f. 2010 (Dissertação de Mestrado em Engenharia Florestal).

DYKES, L.; ROONEY, L.W.; WANISKA, R.D.; ROONEY, W.L. Phenolic compounds and antioxidant activity of sorghum grains of varying genotypes. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.53, n. 17, p.6813-6818, 2005.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. The Thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v. 29, n. 01, p. 75-97, 1996.

MADAMBA, P. S. Thin layer drying models for osmotically pré-dried young coconut. **Drying technology**, v.21, n.9, p.1759-1780, 2003.

MENEZES, M. L.; STRÖHER, A. P.; PEREIRA, N. C.; BARROS, S. T. D. Análise da cinética e ajustes de modelos matemáticos aos dados de secagem do bagaço do maracujá-amarelo. **Engevista**, v. 15, n. 2, p. 176-186, 2013.

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**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p.17-26, 2008.

RESENDE, O., CABRAL DE OLIVEIRA, D. E., CHAVES, T. H., FERREIRA J., & BESSA, V. (2014). Kinetics and thermodynamic properties of the drying process of sorghum (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) grains. **African Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 16, p. 2453-2462, 2014.

SANTOS, D. C.; Queiroz, A. M.; Figueirêdo, R. M. F.; Oliveira, R. M.F. Cinética de secagem de farinha de grãos residuais de urucum. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.17, n.2, p.223–231, 2013.

SCHWARZ, G. Estimating the dimension of a model. **Annals of Statistics**, v.6, n. 2, p.461-464, 1978.

SILVA, A. S. A.; MELO, K. S.; ALVES, N. M.; FERNANDES, T. K. S.; FARIAS, P. A. Cinética de secagem em camada fina da banana maçã em secador de leito fixo. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.11, n.2, p.129-136, 2009.

VILELA, C. A. A.; ARTUR, P. O. Secagem do açafrão (*Curcuma longa* L.) em diferentes cortes geométricos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 28, n. 2, p. 387-394, 2008.

Tabela 1. Modelos matemáticos utilizados para prever a secagem de produtos vegetais

Designação do modelo	Modelos
$RX = 1 + a t + b t^2$	Wang e Sing (2)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	Midilli (3)
$RX = \exp(-k \cdot t^n)$	Page (4)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$	Logarítmico (5)
$RX = \exp(-k \cdot t)$	Newton (6)

Tabela 2. Valores para o teste de *Qui*-quadrado (χ^2 , decimal) e erro médio estimado (SE, decimal) calculados para os doze modelos utilizados na representação da cinética de secagem de grãos de sorgo em diferentes teores de água 0,49; 0,39; 0,31; 0,23 (b.s)

Modelo	0,49		0,39		0,31		0,23	
	SE	χ^2	SE	χ^2	SE	χ^2	SE	χ^2
Wang e Sing	0,0442	0,0020	0,0314	0,0009	0,0264	0,0011	0,0224	0,0009
Midilli	0,0242	0,0005	0,0249	0,0006	0,0246	0,0006	0,0213	0,0004
Page	0,0241	0,0003	0,0233	0,0005	0,0222	0,0005	0,0200	0,0003
Logarítmico	0,0439	0,0015	0,0327	0,0007	0,0388	0,0009	0,0282	0,0007
Newton	0,0949	0,0090	0,0765	0,0060	0,0680	0,0046	0,0539	0,0029

Tabela 3. Erro médio relativo e coeficiente de determinação (P, R², %) durante a secagem de grãos de sorgo em diferentes teores de água 0,49; 0,39; 0,31; 0,23 (b.s)

Modelos	0,49		0,39		0,31		0,23	
	P	R ²	P	R ²	P	R ²	P	R ²
Wang e Singh	7,91	99,81	4,69	99,86	3,25	99,86	2,19	99,60
Midilli	3,77	99,90	3,46	99,90	2,85	99,96	1,89	99,64
Page	2,98	99,93	3,30	99,92	2,25	99,98	1,76	99,66
Logarítmico	6,39	99,85	3,42	99,86	3,48	99,93	2,31	99,63
Newton	17,15	99,26	11,62	99,57	11,34	99,47	10,45	99,18

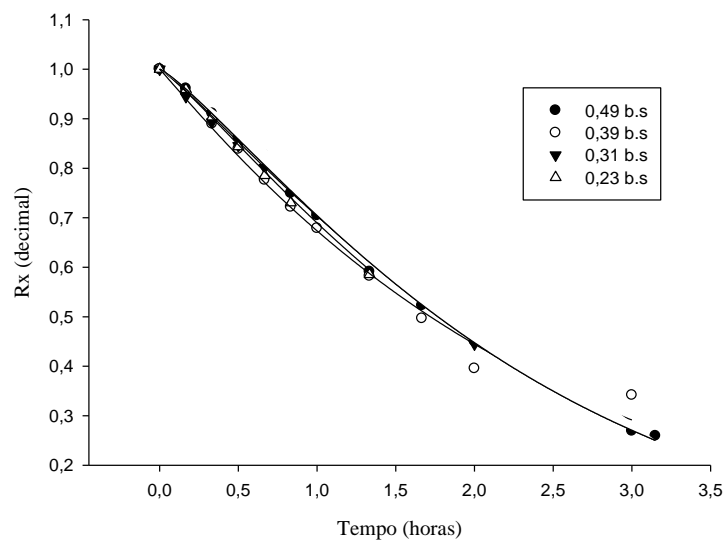
Tabela 4. Critérios de seleção de Akaike (A) e Bayesiana de Schwarz (B) dos modelos com melhores ajustes de grãos de sorgo em diferentes teores de água 0,49; 0,39; 0,31; 0,23 (b.s)

Modelos	0,49		0,39		0,31		0,23	
	A	B	A	B	A	B	A	B
Page	-74,71	-74,17	-66,18	-64,99	-59,76	-58,86	-43,00	-43,24
Midilli	-72,82	-70,40	-63,20	-61,21	-53,24	-55,09	-39,49	-39,10

Tabela 5 - Parâmetros dos modelos Page e Midilli ajustados para as diferentes condições de secagem de grãos de sorgo em diferentes teores de água 0,49; 0,39; 0,31; 0,23 (b.s).

Parâmetros	Teores de água			
	0,49	0,39	0,31	0,23
Page				
K	0,3499**	0,3957**	0,3517**	0,3717**
N	1,1989**	1,1350**	1,1489**	1,1657**
Midilli				
A	0,9992**	0,9979**	1,0001**	1,002**
K	0,3721**	0,4266**	0,0305**	0,2484 ^{ns}
N	1,2539**	1,1864**	0,4148**	1,0935**
B	0,0153 ^{ns}	0,0201 ^{ns}	-0,2578 ^{ns}	-0,9111 ^{ns}

**Significativo a 1% pelo teste t. ^{ns} não significativo pelo teste t.

**Figura 1.** Valores de razão de teor de água de grãos de sorgo em diferentes teores de água para a temperatura de 80°C, estimados pelo modelo de Page.