

MODELAGEM MATEMÁTICA PARA A SECAGEM DE CLONES DE CAFÉ (*Coffea canephora* Pierre) EM TERREIRO DE CONCRETO

O. Resende, Eng. Agrícola Prof. Adjunto, DEAGRO/UNIR; R.V. Arcanjo, Estudante Graduação DEAGRO/UNIR, Bolsista PIBIC/CNPq; V.C. Siqueira, Estudante Graduação DEAGRO/UNIR, S. Rodrigues, Eng. Agrícola Prof. Adjunto, DEAGRO/UNIR

As curvas de secagem em camada delgada variam com a espécie, variedade, condições ambientais, métodos de preparo pós-colheita, entre outros fatores. Nesse sentido, diversos modelos matemáticos podem ser utilizados para descrever o processo de secagem de produtos agrícolas. Estes modelos, geralmente, baseiam-se em variáveis externas ao produto, como a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem. Assim, pesquisas relacionadas ao desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamentos utilizados para a secagem de grãos, são de fundamental importância para a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto durante a remoção de água. Diante da limitação de informações teóricas sobre a secagem de café da espécie *Coffea Canephora*, objetivou-se com o presente trabalho estimar e avaliar as curvas de secagem do produto e ajustar diferentes modelos matemáticos aos valores experimentais durante a secagem de quatro clones desta espécie.

O experimento foi desenvolvido no Departamento de Agronomia do campus da Universidade Federal de Rondônia - UNIR, Rolim de Moura, RO. Foram utilizados frutos de café (*Coffea Canephora* Pierre) dos clones: Cpafró 194, Cpafró 193, Cpafró 167 e Cpafró180, com os teores de água iniciais de 1,20; 1,32; 1,51 e 1,46 (decimal b.s.), respectivamente. Os frutos foram submetidos à secagem em terreiro de concreto, sendo espalhados em camadas de 3 cm de espessura e revolvidos periodicamente ao longo do dia. A secagem prosseguiu até que o produto atingisse o teor de água de aproximadamente 0,10 (decimal b.s.). Os teores de água do produto foram acompanhados diariamente e determinados pelo método da estufa, 105±1 °C, até massa constante. A temperatura e a umidade relativa do ar de secagem foram obtidas por meio de uma estação climatológica, situada a 100 m do local de secagem. A temperatura máxima da massa de café foi monitorada diariamente às 14:00 por meio de sonda termométrica. O teor de água de equilíbrio dos frutos foi calculado utilizando-se a equação proposta por Afonso Júnior (2001), expressa da seguinte forma:

$$U_e^* = 2,9636 + 0,053 \cdot T - 10,7837 \cdot UR^{4,5136 - 1,6503} \quad (1)$$

em que, U_e^* : teor de água de equilíbrio do produto (decimal b.s.); T: temperatura do ar de secagem (°C); UR: umidade relativa do ar de secagem (decimal). Aos dados experimentais foram ajustados os modelos matemáticos frequentemente utilizados para representação da secagem de produtos agrícolas, conforme Tabela 1.

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

Modelo	Modelo
Wang e Verna	Newton
Thompson	Logarítmico
	Henderson e Pabis
Page	

$$\begin{aligned}
 &RU = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2 \\
 &RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (-a) \exp(-k_1 \cdot t) \\
 &RU = \exp\left(\frac{-a - a^2 + 4 \cdot b \cdot t^{0,5}}{2 \cdot b}\right) \\
 &RU = \exp(-k \cdot t^n)
 \end{aligned}
 \quad (5)$$

em que, t: tempo de secagem (s); k, k₀, k₁: constantes de secagem (s⁻¹); a, b, c, n: coeficientes dos modelos. Para o ajuste dos modelos matemáticos foi realizada análise de regressão linear e não linear, pelo método Gauss Newton, utilizando-se o software STATISTICA 5.0[®]. O grau de ajuste de cada modelo considerou a magnitude do coeficiente de determinação (R²), a magnitude do erro médio relativo (P) e do erro médio estimado (SE) e a verificação do comportamento da distribuição dos resíduos. O erro médio relativo e o erro médio estimado, para cada um dos modelos, foram calculados conforme as seguintes expressões:

$$P = \frac{100}{N} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (9)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (10)$$

em que, Y: valor observado experimentalmente; \hat{Y} : valor calculado pelo modelo; N: número de observações; GLR: graus de liberdade do modelo (número de observações menos o número de parâmetros do modelo).

Resultados e conclusões:

De acordo com o monitoramento das condições climáticas, os valores médios da temperatura e da umidade relativa no período de secagem foram de 26,3 °C e 63,3%, respectivamente. Já a temperatura da massa de grãos medida diariamente às 14:00 horas, apresentou variação entre 41,1 e 51,1 °C para os quatro clones estudados e durante 5 dias de monitoramento.

De acordo com a Tabela 2, observa-se que para os clones Cpafro 193, Cpafro 167 e Cpafro180 os modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais apresentaram coeficientes de determinação (R²) superior a 98%, indicando, de acordo com Madamba et al. (1996), uma representação satisfatória do fenômeno em estudo. Para o clone Cpafro 194, os modelos Thompson, Newton e Henderson e Pabis obtiveram valores do coeficiente de determinação inferiores a 98%, não sendo adequados para descrição da secagem do café. Os modelos Verna e Page apresentaram os menores valores do erro médio estimado para os quatro clones analisados. Verifica-se ainda, que estes modelos apresentaram, uma distribuição aleatória dos resíduos para a modelagem da secagem dos quatro clones. Para os clones Cpafro 194, Cpafro 193, Cpafro 167 o modelo de Page foi o único a obter magnitude do erro médio relativo inferior a 10%, indicando, de acordo com Mohapatra e Rao (2005), ser adequado para a descrição do fenômeno; para o clone Cpafro 180 o modelo de Verna também obteve valor do erro médio relativo menor que 10% resultando, assim, em ajustes satisfatórios aos dados experimentais da secagem do café com ar natural em terreiro de concreto, e sob as condições experimentadas.

Tabela 2. Coeficientes de determinação (R²), erros médio relativo (P) e estimado (SE), e tendência de distribuição dos resíduos (A: aleatória; T: tendenciosa) para os sete modelos analisados, durante a secagem dos clones Cpafro 194, Cpafro 193, Cpafro 167 e Cpafro180 em terreiro de concreto

Modelo	Cpafro 194				Cpafro 193			
	R ² (%)	SE (decimal)	P (%)	Distribuição resíduos	R ² (%)	SE (decimal)	P (%)	Distribuição resíduos
Wang e Singh	99,24	0,039	14,81	T	99,97	0,020	31,83	T
Verna	99,91	0,016	28,02	A	99,94	0,012	19,90	A
Thompson	96,77	0,081	104,18	T	98,82	0,048	63,76	T
Page	99,97	0,008	7,89	A	99,99	0,003	2,74	A
Newton	96,77	0,073	104,19	T	98,82	0,043	63,78	T

Logarítmico	98,59	0,062	66,67	T	99,56	0,034	40,28	T
Henderson e Pabis	97,12	0,077	96,58	T	98,92	0,046	60,21	T
Cpafro 167				Cpafro180				
Wang e Singh	99,91	0,019	21,15	T	99,6	0,027	40,06	T
Verna	99,93	0,013	14,72	A	99,98	0,007	8,17	A
Thompson	98,49	0,054	56,78	T	99,26	0,038	39,08	T
Page	99,99	0,002	4,43	A	99,99	0,005	7,22	A
Newton	99,48	0,048	56,76	T	99,26	0,034	39,06	T
Logarítmico	99,37	0,040	38,09	T	99,66	0,029	28,91	T
Henderson e Pabis	98,63	0,052	53,19	T	99,31	0,036	36,91	T

De acordo com os parâmetros estatísticos avaliados, o modelo de Page foi adequado para representação dos quatro clones de café, e além deste, para o clone Cpafro180, o modelo de Verna também se mostrou satisfatório na descrição do fenômeno. De maneira semelhante, Corrêa et al. (2006) verificaram que os modelos de Page e Verna foram os que melhor representaram o fenômeno de secagem dos frutos de café da cultivar Mundo Novo da espécie *Coffea arabica*.

Tabela 3. Coeficientes ajustados para os modelos de Page durante a secagem em terreiro de concreto dos clones Cpafro 194, Cpafro 193, Cpafro 167 e Cpafro180

Modelos	Coeficientes	Clones			
		Cpafro 194	Cpafro 193	Cpafro 167	Cpafro180
Page	k	$7,02 \times 10^{-9}$	$1,62 \times 10^{-7}$	$8,86 \times 10^{-8}$	$3,78 \times 10^{-7}$
	n	1,579	1,321	1,377	1,265

Na **Figura 1**, estão ilustrados os teores de água observados e estimados pelo modelo de Page, para os clones Cpafro 194, Cpafro 193, Cpafro 167 e Cpafro180, durante a secagem do café. Nota-se, por meio da correspondência entre os valores experimentais e estimados, que o modelo de Page descreve adequadamente o fenômeno de secagem dos clones de café estudados.

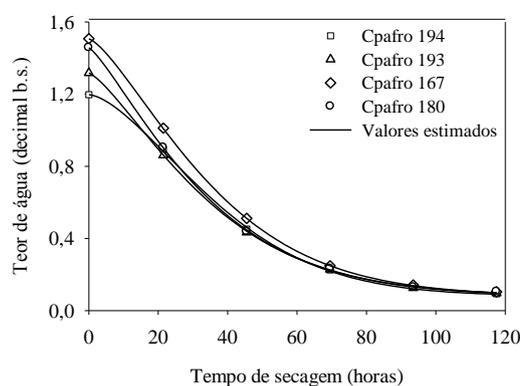


Figura 1. Valores experimentais dos teores de água e estimados pelo modelo de Page (decimal b.s.) ao longo do tempo de secagem (horas), para os clones de café Cpafro 194, Cpafro 193, Cpafro 167 e Cpafro180.

Analisando os resultados, conclui-se que, baseando-se em parâmetros estatísticos, o modelo de Page foi adequado para representação dos quatro clones de café analisados, dentre a série testada, e além deste, para o clone Cpafro180, o modelo de Verna também se mostrou satisfatório na descrição do fenômeno.