

# CINÉTICA DE SECAGEM DE CAFÉ NATURAL PARA DIFERENTES TEMPERATURAS E BAIXA UMIDADE RELATIVA

Guilherme Euripedes Alves<sup>1</sup>, Eder Pedroza Isquierdo<sup>2</sup>, Flávio Meira Borém<sup>3</sup>,  
Valdiney Cambuy Siqueira<sup>4</sup>, Pedro Damasceno Oliveira<sup>5</sup>, Ednilton Tavares Andrade<sup>6</sup>

(Recebido: 15 de março de 2012; aceito: 4 de julho de 2012)

**RESUMO:** Diante da importância da secagem na fase da pós-colheita do café e seu reflexo na qualidade final do produto, objetivou-se, neste trabalho, avaliar a cinética da secagem em diferentes temperaturas do ar de secagem, para uma baixa temperatura de ponto de orvalho de frutos de café arábica (*Coffea arabica* L.), processados via seca. Os frutos foram colhidos manualmente e submetidos à separação hidráulica. Para a secagem dos frutos, com teor de água inicial de  $1,9 \pm 0,1$  kg.kg<sup>-1</sup> (bs), utilizou-se secador mecânico a três temperaturas de bulbo seco (35 °C, 40 °C e 45 °C) para a mesma temperatura de ponto de orvalho (2,6 °C) do ar de secagem. Sete modelos matemáticos foram ajustados aos dados experimentais para caracterizar o processo de secagem dos frutos do cafeeiro. Os modelos de Henderson e Pabis modificado e de Resíduos Sucessivos com dois termos, foram os mais adequados para descrever o processo de secagem, sendo escolhido o de Henderson e Pabis modificado, pela maior simplicidade. A elevação da temperatura de bulbo seco, sob baixa temperatura de ponto de orvalho, provoca aumento no coeficiente de difusividade efetivo, na taxa de secagem e redução no tempo de secagem. Para as condições estudadas, o coeficiente de difusividade efetivo de água para os frutos do cafeeiro varia entre 1,908 e  $3,721 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>. A energia de ativação para a difusão líquida, descrita pela equação de Arrhenius, foi de 52,89 kJ.mol<sup>-1</sup>.

**Termos para indexação:** Modelagem matemática, taxa de secagem, *Coffea arabica* L.

## DRYING KINETICS OF NATURAL COFFEE FOR DIFFERENT TEMPERATURES AND LOW RELATIVE HUMIDITY

**ABSTRACT:** In face of the importance of drying in the post-harvest phase of coffee and its effect on the final quality of the product, the aim of the present study was to evaluate drying kinetics at different temperatures of the drying air for a low dew point temperature of the fruits of dry processed Arabica coffee (*Coffea arabica* L.). The fruits were manually picked and subjected to hydraulic separation. After that, fruits with initial moisture contents of  $1.9 \pm 0.1$  kg.kg<sup>-1</sup> (db) were submitted to the drying process under three dry bulb temperatures (35°C, 40°C e 45°C) for the same dew point temperature (2.6°C) of the drying air. Seven mathematical models were fitted to the experimental data to characterize the drying process of the coffee fruit. The modified Henderson and Pabis and Successive Residue models with two terms were the most adequate for describing the dry process, with the modified Henderson and Pabis model being chosen through its greater simplicity. The increase of the dry bulb temperature under a low dew point temperature leads to an increase in the effective diffusivity coefficient and in the drying rate and a decrease in drying time. For the conditions studied, the effective diffusivity coefficient of water for coffee fruits ranges from 1.908 to  $3.721 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>. Activating energy for liquid diffusion, described by the Arrhenius equation, was 52.89 kJ.mol<sup>-1</sup>.

**Index terms:** Mathematical modeling, drying rate, *Coffea arabica* L.

## 1 INTRODUÇÃO

O café recém-colhido difere dos demais grãos cultivados em larga escala, por apresentar certas peculiaridades, tais como alto teor de água, aproximadamente 60% (bu) e desuniformidade em relação à maturação (RESENDE et al., 2009). Logo, o processo de secagem é uma etapa fundamental para evitar o ataque de microorganismos e de fermentações que irão comprometer a qualidade do café. Segundo Borém (2008), a etapa de secagem é importante tanto sob o aspecto de consumo de energia como na influência que essa operação tem sobre a qualidade final do produto.

De acordo com Resende, Ferreira e Almeida (2010), a simulação matemática do processo de secagem é fundamental para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamentos utilizados para a secagem de grãos.

Existem três tipos de modelos de simulação matemática do processo de secagem em camada delgada, que visam descrever a cinética de secagem de produtos agrícolas. O modelo teórico, que considera apenas a resistência interna, a transferência de calor e água entre o produto e o ar quente; os modelos semiteóricos e os empíricos, que consideram somente a resistência interna, a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem (MIDILLI; KUCUK; YAPAR, 2002).

<sup>1,2,3,4</sup>Universidade Federal de Lavras/UFLA - Departamento de Engenharia/DEG - Cx. P. 3037 - 37.200-000 - Lavras -MG  
guiualves@gmail.com, eder.isquierdo@yahoo.com.br, flavioiborem@deg.ufla.br, vcambuy@yahoo.com

<sup>3</sup>Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho/UNESP - Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu - Departamento de Engenharia Rural/DE - Fazenda Experimental Lageado - Cx. P. 237 - 18.603-970 - Botucatu - SP - damascenoeng@yahoo.com.br

<sup>6</sup>Universidade Federal Fluminense/UFF - Escola de Engenharia - 24.210-240 - Niteroi - RJ - ednilton@vm.uff.br

Numerosos modelos têm sido propostos para descrever a taxa de redução de água, durante a secagem em camada fina de materiais biológicos (BURMESTER; EGGERS, 2010; DI SCALA; CRAPISTE, 2008; ERBAY; ICIER, 2010; HERNÁNDEZ-DÍAZ et al., 2008; NILNONT et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2010; PUTRANTO et al., 2011). Uma equação que descreve a taxa de secagem de uma camada fina é necessária para a simulação de secagem em camada espessa, porque os modelos de simulação são geralmente baseados no pressuposto de que a camada espessa é composta por uma série de camadas finas (KASHANINEJAD et al., 2007).

Conforme as condições do processo de secagem, diferentes modelos podem ser ajustados para descrever adequadamente a cinética de secagem de produtos capilares porosos, higroscópicos. Os modelos de Lewis, de Page, de Thompson, de Midilli Modificado, de Verma, de Resíduos Sucessivos e de Henderson e Pabis modificado, têm sido ajustados com frequência para prever o processo da secagem de sementes e frutos (AKPINAR, 2006; ANDRADE et al., 2006; CORRÊA et al., 2010; CORRÊA; RESENDE; RIBEIRO, 2006; GONELI et al., 2009; KASHANINEJAD et al., 2007; MOHAPATRA; RAO, 2005).

Não foram encontradas na literatura científica, informações sobre modelos que descrevem a secagem do café natural sob diferentes temperaturas e baixa umidade relativa do ar. Dessa forma, objetivou-se com o presente trabalho avaliar a cinética de secagem em diferentes temperaturas do ar de secagem, para uma baixa temperatura de ponto de orvalho de frutos de café arábica, processados via seca.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Para condução do experimento, utilizaram-se frutos maduros de café (*Coffea arabica* L. cv. Mundo Novo), colhidos manualmente com o teor de água de  $1,9 \pm 0,1$ , base seca (bs). Após a colheita, realizou-se a separação hidráulica para remoção de frutos de menor massa específica seguida de seleção manual para retirada de frutos imaturos e sobremaduros. Posteriormente, realizou-se a secagem em secadores mecânicos até que os frutos atingissem teor de água de  $0,50 \pm 0,05$  (bs). Em seguida, intercalaram-se 14 horas de secagem (8:00 h até 22:00 h), com intervalos de 10 horas de repouso (22:00 h até 08:00 h do dia seguinte), até que os frutos atingissem teor de água de, aproximadamente, 0,14 (bs), o que

correspondeu ao teor de água do café beneficiado de  $11 \pm 0,5\%$  (bu).

O teor de água do café beneficiado no início e no final da secagem mecânica foi determinado pelo método padrão ISO 6673 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO, 2003). O acompanhamento da redução do teor de água dos frutos durante a secagem foi realizado pelo método gravimétrico (perda de massa), utilizando-se uma balança analítica com precisão de 0,01 g.

Para avaliar se o teor de água desejado nos frutos de café foi atingido, determinou-se o estudo da taxa de secagem do produto, de acordo com a seguinte expressão (Equação 1).

$$\text{Tx. Sec} = \frac{U_{\text{ant}} - U_{\text{at}}}{\Delta t} \quad (1)$$

em que:

Tx. Sec.: taxa de secagem ( $\text{g. kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ );

$U_{\text{ant}}$ : teor de água no tempo anterior ( $\text{g. kg}^{-1}$  (bs));

$U_{\text{at}}$ : teor de água atual ( $\text{g. kg}^{-1}$  (bs)); e

$\Delta t$ : intervalo de tempo entre as pesagens (horas).

Antes do início da secagem mecânica foi calculado o raio equivalente dos frutos de café, definido como o raio de uma esfera com volume equivalente ao volume do fruto. Para o cálculo do seu volume, tomou-se uma amostra de 100 frutos, dos quais foram tomadas medidas de comprimento (a), largura (b) e espessura (c), com o uso de um paquímetro digital com precisão de 0,01mm, sendo o volume dos frutos de café (V) calculado pela Equação 2.

$$V = \frac{4}{3} \pi abc \quad (2)$$

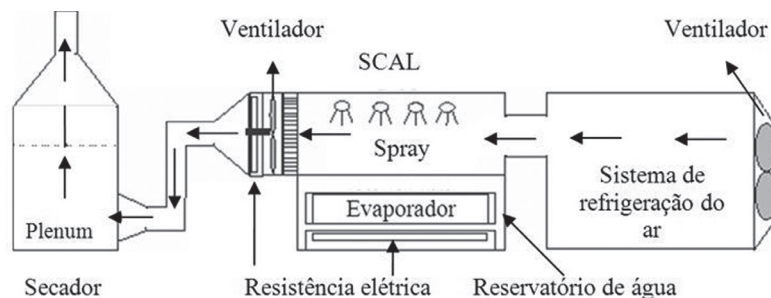
V: volume dos frutos ( $\text{m}^3$ );

a: comprimento (m);

b: largura (m); e

c: espessura (m).

O sistema de secagem foi composto por um condicionador de ar acoplado a um secador de camada fixa (Figura 1). As características do ar foram controladas por um Sistema de Condicionamento de Ar de Laboratório (SCAL), conforme modelo proposto por Fortes et al. (2006). O equipamento permite o controle preciso do fluxo, da temperatura (T) e da umidade relativa (UR) do ar de secagem.



**FIGURA1** – Sistema utilizado para a secagem mecânica do café.

Para se obter a temperatura de ponto de orvalho (2,6 °C), antes do SCAL, o ar foi pré-condicionado por um sistema de refrigeração composto por três unidades de ar condicionado.

O secador foi composto por quatro bandejas removíveis com fundos perfurados, de seção quadrada, com lados iguais a 0,3 m e profundidade de 0,1 m, localizadas sobre um plenum para uniformização do fluxo de ar. Para minimizar possíveis diferenças de temperatura, fez-se um rodízio de 90° na posição das bandejas, a cada hora.

A velocidade do ar de secagem foi monitorada com o uso de um anemômetro de pás e, para todos os tratamentos foi mantida velocidade constante em 0,33 m.s<sup>-1</sup>, correspondendo ao fluxo de 20 m<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>. Foram utilizadas três temperaturas de bulbo seco (35; 40 e 45 °C) e uma temperatura de ponto de orvalho (2,6 °C), sendo essa medida no interior da câmara do SCAL e a temperatura do ar de secagem, medidas no plenum. Em função das combinações entre as temperaturas de bulbo seco e do ponto de orvalho, foram obtidas diferentes umidades relativas (UR) do ar de secagem (Tabela 1). Para cada tratamento foram realizadas quatro repetições.

**TABELA 1** – Temperatura de bulbo seco (Tbs), temperatura de ponto de orvalho ( Tpo ) e umidade relativa do ar de secagem (UR).

Tbs (°C)	Tpo (°C)	UR (%)
35	2,6	13,1
40	2,6	10,0
45	2,6	7,7

Na análise de dados da secagem a razão de umidade (RU) é essencial para descrever diferentes modelos de secagem em camada fina. A razão de umidade durante a secagem, em função das variáveis avaliadas, foi determinada pela Equação

3. Para todas as condições testadas, os valores de razão de umidade em função do tempo de secagem foram ajustados aos modelos utilizados para descrever a cinética de secagem dos frutos de café apresentados na Tabela 2.

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} \quad (3)$$

em que:

RU: razão de umidade (adimensional);  
 U: teor de água do produto no tempo t (decimal, base seca);  
 U<sub>e</sub>: teor de água de equilíbrio do produto (decimal, base seca);  
 U<sub>i</sub>: teor de água inicial do produto (decimal, base seca).

Para o ajuste dos modelos matemáticos, foram realizadas análises de regressão não linear pelo método Gauss-Newton, utilizando-se o *software* STATISTICA 5.0® (Statsoft, Tulsa, USA). A escolha do melhor modelo baseou-se nos parâmetros estatísticos: desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P), coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) e tendência de distribuição dos resíduos. O desvio padrão da estimativa e o erro médio relativo foram calculados respectivamente pelas Equações 11 e 12.

$$SE = \sqrt{\sum (Y - \hat{Y})^2 / GLR} \quad (11)$$

$$P = [(100 / n) \sum (|Y - \hat{Y}| / Y)] \quad (12)$$

em que:

SE: desvio padrão da estimativa (decimal);  
 Y: valor observado experimentalmente;  
 Ŷ: valor calculado pelo modelo;

GLR: graus de liberdade do modelo;  
P: erro médio relativo (%); e  
n: número de dados observados.

O coeficiente de difusão efetivo para as condições de secagem utilizadas nesse trabalho foi calculado ajustando-se o modelo, baseado na teoria de difusão líquida (Equação 13) aos dados observados, por meio de regressão não linear, utilizando o *software* STATISTICA 5.0® (Statsoft, Tulsa, USA). Essa equação é a solução analítica para a segunda lei de Fick, considerando a forma geométrica do produto como esférica, desconsiderando a contração volumétrica dos frutos e considerando-se a condição de contorno do teor de água conhecido na superfície do produto (CORRÊA et al., 2010).

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left[-\frac{n^2 \pi^2 D_{\text{eff}}}{R^2} t\right] \quad (13)$$

em que:

$D_{\text{eff}}$ : coeficiente de difusão efetivo ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ );  
R: raio equivalente dos frutos de café (m);  
n: número de termos; e  
t: tempo (s).

Para o cálculo da energia de ativação da cinética de secagem dos frutos de café utilizou-se a equação de Arrhenius (Equação 14). Essa equação demonstra a relação entre a energia de ativação e a velocidade em que a reação ocorre.

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT_a}\right) \quad (14)$$

em que:

$D_0$ : fator pré-exponencial;  
 $E_a$ : energia de ativação ( $\text{KJ mol}^{-1}$ );  
R: constante universal dos gases ( $8,134 \text{ J g mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ); e  
 $T_a$ : temperatura absoluta (K).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme definido na metodologia, a partir do volume calculado pela Equação 2, o raio equivalente dos frutos de café calculado, foi de  $6,51 \times 10^{-3} \text{ m}$ .

Na Tabela 3 são apresentados os tempos de secagem, os coeficientes de difusão efetivos, os teores de água dos frutos de café, no início e no final da secagem mecânica e as taxas de secagem médias e máximas, em função da temperatura do ar de secagem, para temperatura de ponto de orvalho de  $2,6 \text{ }^\circ\text{C}$ . Verifica-se que, o aumento na temperatura de bulbo seco proporcionou a redução do tempo total de secagem e os valores da umidade relativa do ar de secagem. O efeito da temperatura é evidente no coeficiente de difusão e nas taxas de secagem média e máxima, o aumento da temperatura de bulbo seco proporcionou aumento do coeficiente de difusão efetivo e das taxas de secagem.

O aumento da temperatura reduz a viscosidade da água, influenciando diretamente na resistência do fluido ao escoamento; a diminuição da viscosidade facilita a difusão das moléculas de água nos capilares do produto (CORRÊA et al., 2010). Outro fator que pode ser atribuído ao aumento do coeficiente de difusão efetivo, em função de aumentos na temperatura de bulbo seco, é que o aumento na temperatura

**TABELA 2** – Modelos matemáticos usados para prever a cinética de secagem.

Designação do modelo	Modelo	Equação
Lewis <sup>1</sup>	$RU = \exp(-kt)$	(4)
Page <sup>2</sup>	$RU = \exp(-kt^n)$	(5)
Thompson <sup>3</sup>	$RU = \exp\{-[a - (a^2 + 4bt)^{0,5}](2b)^{-1}\}$	(6)
Midilli Modificado <sup>4</sup>	$RU = \exp(-kt^e) + bt$	(7)
Verma <sup>5</sup>	$RU = -a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-k_1 t)$	(8)
Resíduos Sucessivos <sup>6</sup>	$RU = a \exp\{-[b \exp(-c T^{-1})] t\} + d \exp\{-[e \exp(-f T^{-1})] t\}$	(9)
Henderson & Pabis Modificado <sup>7</sup>	$RU = a \exp(-kt) + b \exp(-k_0 t) + c \exp(-k_1 t)$	(10)

<sup>1</sup>(LEWIS, 1921); <sup>2</sup>(PAGE, 1949); <sup>3</sup>(THOMPSON; PEARTT; FOSTER, 1968); <sup>4</sup>(GHAZANFARI et al., 2006); <sup>5</sup>(VERMA et al., 1985); <sup>6</sup>(GLENN, 1978); <sup>7</sup>(KARATHANOS, 1999).

em que: RU - razão de umidade; t - tempo de secagem (h); T - temperatura de secagem ( $^\circ\text{C}$ ); k,  $k_0$  e  $k_1$  - constantes de secagem; e a, b, c, d, e, f, n - coeficientes dos modelos.



**TABELA 3** – Tempo de secagem, coeficiente de difusão efetivo ( $D_{eff}$ ), teor de água inicial e final, taxa de secagem média e máxima do café natural, em função da temperatura de bulbo seco (Tbs) e umidade relativa do ar de secagem (UR).

Tbs (°C)	UR (%)	Tempo de secagem (h)	$D_{eff} \times 10^{11}$ (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	Teor de água (kg.kg <sup>-1</sup> (bs))		Taxa de Secagem (g.kg <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )	
				Inicial	Final	Média	Máxima
35	13,1	104	1,908	1,882	0,143	16,72	97,31
40	10,0	78	2,456	1,890	0,145	22,37	106,08
45	7,7	52	3,721	2,021	0,132	36,33	145,36

proporciona aumento no nível de vibração das moléculas de água, o que também contribui para uma difusão mais rápida (GONELI et al., 2009).

Os valores de coeficiente de difusão efetivo obtidos para os frutos de café submetidos à secagem em camada fina estão de acordo com os valores obtidos em outros trabalhos realizados com produtos agrícolas que, segundo Madamba, Driscoll e Buckle (1996), apresentam-se na faixa de  $10^{-9}$  a  $10^{-11}$  m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>. Corrêa et al. (2010) estudaram a cinética de secagem de frutos de café para as temperaturas de 35°C, 45 °C e 55 °C, obtiveram coeficientes de difusão entre  $2,39$  e  $5,98 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>.

A relação entre o coeficiente de difusão efetivo e a temperatura do ar de secagem tem sido satisfatoriamente descrita pela equação de Arrhenius (Equação 14) (CORRÊA et al., 2010; GELY; SANTALLA, 2007; GONELI et al., 2009; KASHANINEJAD et al., 2007; MADAMBA; DRISCOLL; BUCKLE, 1996; MOHAPATRA; RAO, 2005).

Na Figura 2, são apresentados graficamente, os valores de  $\ln(D_{eff})$  em função do inverso da temperatura absoluta (1.K<sup>-1</sup>), obtidos para a secagem dos frutos de café.

A inclinação da curva obtida pela equação de Arrhenius (Equação 14) fornece a relação  $E_a/R$ , enquanto a sua interseção com o eixo das ordenadas indica o valor de  $D_0$ . Na Equação 15, são apresentados os coeficientes das equações ajustadas para o coeficiente de difusão efetivo dos frutos de café, calculados anteriormente, de acordo com a Equação 14.

$$D_{eff} = 0,017223 \exp\left(-\frac{6866,99}{T_a}\right) \quad (15)$$

A partir da Equação 15 a energia de ativação ( $E_a$ ) calculada para a difusão líquida dos frutos de café é de 52,89 kJ.mol<sup>-1</sup>. Esse valor está dentro da faixa de energia de ativação para

produtos agrícolas que, segundo Zogzas, Maroulis e Marinos-Kouris (1996), devem estar entre 12,7 e 110 kJ.mol<sup>-1</sup>. Goneli et al. (2009) encontraram valores de energia de ativação de 55,40 kJ.mol<sup>-1</sup> para cafés em pergaminho.

Na Figura 3, estão apresentadas as taxas de secagem em função do teor de água nos frutos de café submetidos à secagem completa em secador.

Verifica-se, na Figura 3, que a elevação da temperatura proporciona maiores taxas de secagem dos frutos de café para um mesmo teor de água, sendo que essas diferentes taxas nas diferentes temperaturas são maiores no início da secagem e, à medida que os frutos ficam mais secos, as diferenças diminuem consideravelmente. Com o processo de secagem, a remoção da água dos frutos fica mais difícil em função da ligação mais forte entre a água e os demais constituintes do grão; logo as taxas de secagem, para as três temperaturas de bulbo seco, tendem a se igualar ou ficarem mais próximas no final do processo.

Na Tabela 4, são apresentados os parâmetros estatísticos obtidos para os modelos utilizados na descrição da cinética da secagem de frutos de café, valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ), desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) e a tendência de distribuição dos resíduos para os sete modelos empregados para descrever a cinética de secagem de frutos de café, com teor de água inicial médio de 1,9 (bs), quando submetidos às diferentes temperaturas de bulbo seco e para temperatura de ponto de orvalho de 2,6°C.

A análise de um único parâmetro não constitui uma boa ferramenta para a avaliação de modelos não lineares, sendo necessária uma análise conjunta dos parâmetros: coeficiente de determinação, desvio padrão da estimativa e erro médio relativo. A capacidade de um modelo para descrever com fidelidade determinado processo físico é inversamente proporcional ao valor do desvio padrão da estimativa. No que se refere ao erro médio relativo, valores inferiores a 10% são recomendados (MADAMBA; DRISCOLL; BUCKLE, 1996; MOHAPATRA; RAO, 2005).

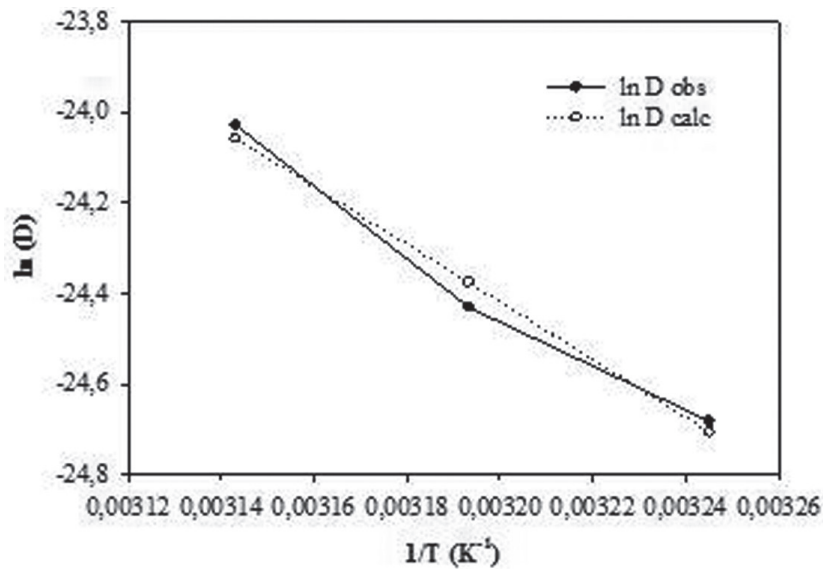


FIGURA 2 – Representação de Arrhenius do coeficiente de difusão efetivo, em função da temperatura do ar de secagem dos frutos de café.

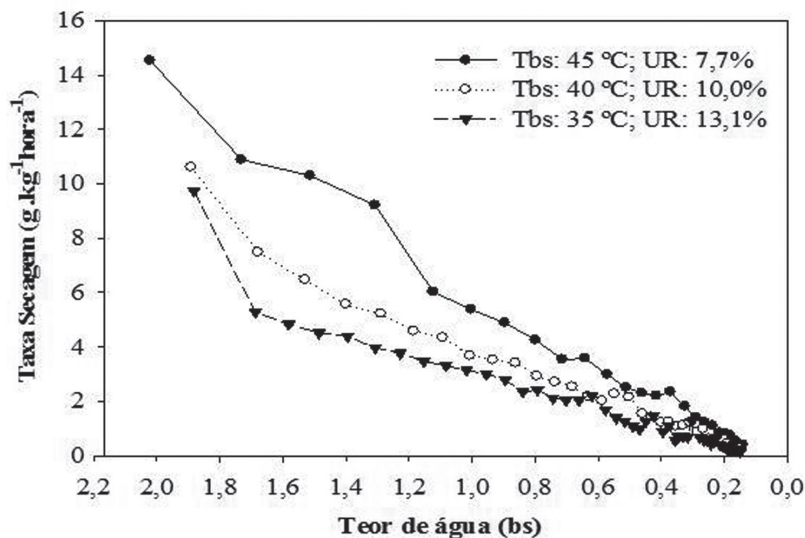


FIGURA 3 – Taxa de secagem em função do teor de água presente nos frutos de café.

Todos os modelos empregados nesse experimento apresentaram coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superiores a 99,82%, o que segundo Madamba, Driscoll e Buckle (1996) são valores considerados aceitáveis para descrever o fenômeno de secagem. Quando se considera o critério de erro médio relativo (P) inferior a 10%, para um ajuste aceitável, os resultados obtidos foram semelhantes, ou seja, todos os modelos apresentaram erros médios relativos inferiores a 10%, sendo que o maior valor foi de 6,95% para o modelo de Thompson, para a temperatura de bulbo seco

de 45 °C e temperatura do ponto de orvalho de 2,6 °C.

Entre os modelos utilizados nesse experimento, para descrever o processo de secagem de frutos de café, os modelos de Resíduos Sucessivos com dois termos, e de Henderson e Pabis modificado foram os que apresentaram os melhores ajustes, indicados pelos valores de coeficientes de determinação. Esses modelos obtiveram, em média, os maiores valores de coeficientes de determinação ( $R^2 > 99,98\%$ ), e os menores valores de erro médio relativo e desvio padrão da estimativa ( $P < 4,16\%$  e  $SE < 0,012$ ).

**TABELA 4** – Valores de coeficientes de determinação ( $R^2$ ), desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) e de tendência de distribuição dos resíduos obtidos para os modelos utilizados para descrever a cinética de secagem de frutos de café.

Modelo	Tbs	UR	$R^2(\%)$	P(%)	SE	Tendência
Lewis	35	13,1	99,84%	4,76	0,0742	Tendenciosa
	40	10,0	99,83%	5,23	0,0668	Tendenciosa
	45	7,7	99,83%	4,52	0,0582	Tendenciosa
Page	35	13,1	99,95%	3,03	0,0434	Tendenciosa
	40	10,0	100,00%	2,69	0,0327	Tendenciosa
	45	7,7	99,95%	5,54	0,0320	Tendenciosa
Thompson	35	13,1	99,90%	3,76	0,0576	Tendenciosa
	40	10,0	99,91%	3,32	0,0484	Tendenciosa
	45	7,7	99,91%	6,95	0,0420	Tendenciosa
Midilli modificado	35	13,1	99,96%	3,19	0,0280	Tendenciosa
	40	10,0	99,97%	3,46	0,0196	Tendenciosa
	45	7,7	99,97%	2,84	0,0170	Tendenciosa
Verma	35	13,1	99,84%	4,72	0,0525	Tendenciosa
	40	10,0	99,84%	5,25	0,0472	Tendenciosa
	45	7,7	99,83%	4,47	0,0412	Tendenciosa
Resíduos Sucessivos	35	13,1	100,00%	1,69	0,0076	Aleatória
	40	10,0	99,99%	2,01	0,0063	Aleatória
	45	7,7	99,96%	4,15	0,0120	Tendenciosa
Henderson e Pabis modificado	35	13,1	99,99%	1,52	0,0063	Aleatória
	40	10,0	99,99%	2,01	0,0063	Aleatória
	45	7,7	99,98%	2,94	0,0093	Aleatória

Na Figura 4, estão apresentadas as ilustrações da tendência de distribuição dos resíduos.

A análise da tendência de distribuição de resíduos confirma os resultados anteriores. Embora os sete modelos utilizados tenham apresentado valores de coeficiente de determinação, desvio padrão da estimativa e erro médio relativo considerados satisfatórios, os modelos de Henderson e Pabis modificado e de Resíduos Sucessivos com dois termos apresentaram maior aleatoriedade na distribuição dos resíduos, indicando que esses modelos são os mais apropriados para a descrição do fenômeno de secagem de frutos de café nas condições consideradas nesse experimento.

Segundo Goneli et al. (2011), 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 como inadequado para representar o fenômeno em questão.

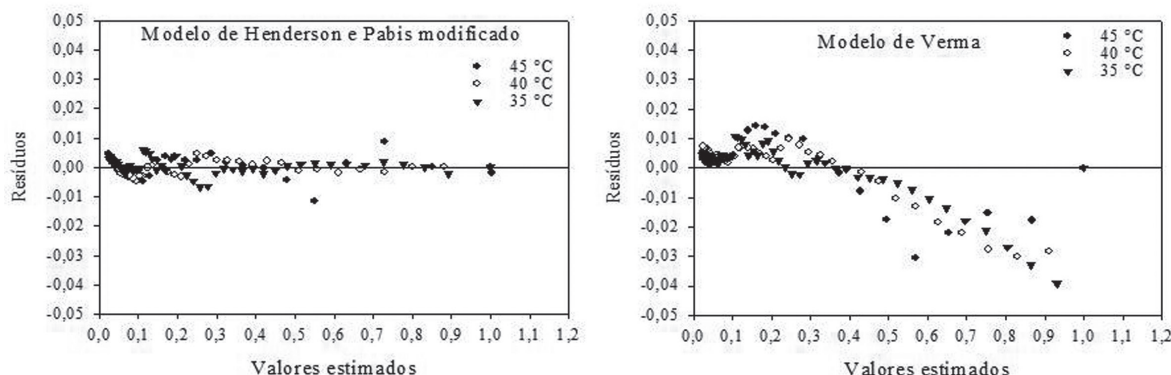
Devido ao menor número de parâmetros e, conseqüentemente, maior simplicidade em relação ao modelo de Resíduos Sucessivos com dois termos, o modelo de Henderson e Pabis modificado foi selecionado para descrever a cinética de secagem dos frutos de café, nesse experimento.

Na Tabela 5, são apresentados os coeficientes do modelo de Henderson e Pabis modificado ajustados aos dados observados da cinética de secagem em camada fina dos frutos de café, nas condições consideradas nesse experimento.

Na Figura 5, é apresentada a comparação entre valores observados e estimados da razão de umidade pelo modelo de Henderson e Pabis modificado e na Figura 6 é apresentado o comportamento da razão de umidade dos frutos de café em função do tempo, durante a secagem em camada fina, bem como a comparação entre

os valores observados e os valores estimados de razão de umidade, pelo modelo de Henderson e Pabis modificado. Observa-se, nessas figuras, a elevada concordância entre os valores de razão de umidade observados experimentalmente e os

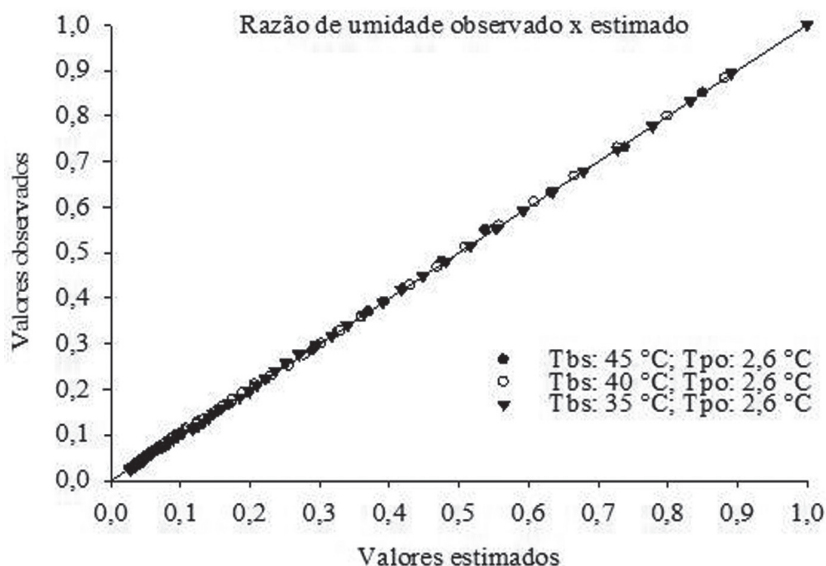
valores estimados pelo modelo de Henderson e Pabis modificado, para todas as condições estudadas, o que confirma o ajuste satisfatório desse modelo para descrever a cinética de secagem dos frutos de café, nas condições estudadas.



**FIGURA 4** – Ilustração da distribuição dos resíduos para os frutos de café submetidos à secagem em três temperaturas. A) Aleatória para o modelo de Henderson e Pabis modificado. B) Tendenciosa para o modelo de Verma.

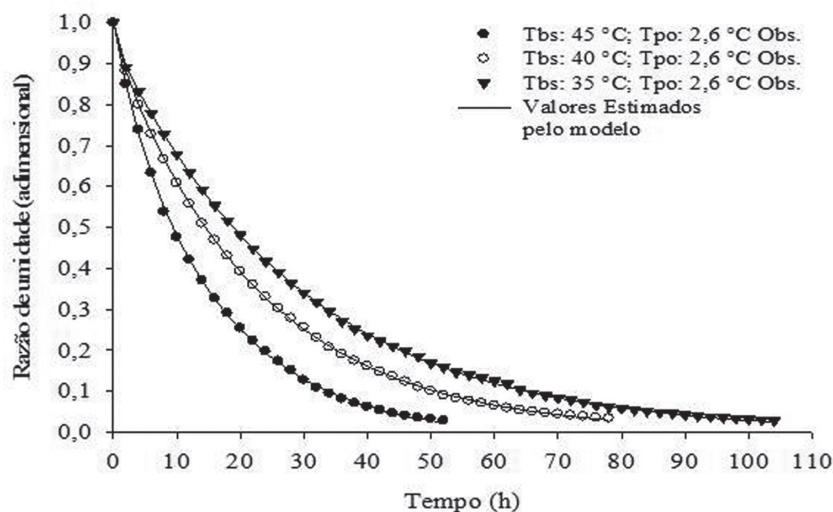
**TABELA 5** – Modelo de Henderson e Pabis modificado ajustado aos dados experimentais de secagem de frutos de café em camada fina.

Tbs (°C)	Tpo (°C)	UR (%)	Modelo de Henderson e Pabis modificado					
			a	b	c	k	k <sub>0</sub>	k <sub>1</sub>
35	2,6	13,1	0,0471	-9,899	10,852	1,3669	0,0416	0,0392
40	2,6	10,0	0,4472	0,5043	0,0485	0,0444	0,0444	0,7210
45	2,6	7,7	-1,932	0,1699	2,7639	0,0416	0,2182	0,0465



**FIGURA 5** – Valores de razão de umidade (adimensional) observados e estimados pelo modelo de Henderson e Pabis modificado para a secagem de frutos de café em camada fina.





**FIGURA 6** – Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Henderson e Pabis modificado para a secagem de frutos de café em camada fina, em função do tempo.

Na Figura 6, pode-se observar que a temperatura de 45°C proporcionou o menor tempo de secagem e a de 35°C, o maior tempo de secagem. Nota-se ainda que, a secagem do café ocorreu apenas no período de taxa de secagem decrescente que pode ser caracterizado por um intervalo em que as resistências às transferências de água e energia encontram-se essencialmente no interior dos frutos, tornando a taxa de evaporação superficial acentuadamente superior à taxa de reposição de água do interior para a superfície do produto.

#### 4 CONCLUSÕES

Nas condições em que foi desenvolvido o presente trabalho, conclui-se que:

Os modelos de Henderson e Pabis modificado e de Resíduos Sucessivos com dois termos apresentaram os melhores ajustes aos dados experimentais.

O aumento da temperatura do ar aumenta a taxa de secagem, o coeficiente de difusividade efetivo e reduz o tempo de secagem dos frutos de café.

O coeficiente de difusividade efetivo dos frutos de café varia entre 1,91 e 3,72 x 10<sup>-11</sup> m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>. A energia de ativação para a difusão líquida, durante a secagem de frutos de café é de 52,89 kJ.mol<sup>-1</sup>.

#### 5 REFERÊNCIAS

AKPINAR, E. K. Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits.

**Journal of Food Engineering**, Essex, v. 73, n. 1, p. 75-84, 2006.

ANDRADE, E. T. et al. Cinética de secagem e qualidade de sementes de feijão. **Engvista**, São Paulo, v. 8, n. 2, p. 83-95, 2006.

BORÉM, F. M. Processamento do café. In: \_\_\_\_\_. **Pós-colheita do café**. Lavras: UFLA, 2008. p. 203-240.

BURMESTER, K.; EGGERS, R. Heat and mass transfer during the coffee drying process. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 99, n. 4, p. 430-436, 2010.

CORRÊA, P. C. et al. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 57, n. 5, p. 595-601, 2010.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; RIBEIRO, D. M. Drying characteristics and kinetics of coffee berry. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 1-10, 2006.

DI SCALA, K.; CRAPISTE, G. Drying kinetics and quality changes during drying of red pepper. **Lebensmittel Wissenschaft und Technologie**, London, v. 41, n. 5, p. 789-795, 2008.

ERBAY, Z.; ICIER, F. A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, Cleveland, v. 50, n. 5, p. 441-464, 2010.

- FORTES, M. et al. Modelagem de um condicionador de ar de alta precisão para uso em processamento agrícola. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 578-589, 2006.
- GELY, M. C.; SANTALLA, E. M. Moisture diffusivity in quinoa (*Chenopodium Quinoa willd.*) seeds: effect of air temperature and initial moisture content of seeds. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 78, n. 3, p. 1029-1033, 2007.
- GHAZANFARI, A. et al. Thin-layer drying of flax fiber: II., modeling drying process using semi-theoretical and empirical models. **Drying Technology**, New York, v. 24, n. 12, p. 1637-1642, 2006.
- GLENN, T. L. **Dynamic analysis of grain drying system**. 1978. Thesis (Ph.D.) - Ohio State University, Ann Arbor, 1978.
- GONELI, A. L. D. et al. Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v. 11, p. 64-73, 2009. Edição especial café.
- \_\_\_\_\_. Contração volumétrica e forma dos frutos de mamona durante a secagem. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 1, p. 1-8, 2011.
- HERNÁNDEZ-DÍAZ, A. et al. Modeling heat and mass transfer during drying of green coffee beans using prolate spheroidal geometry. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 86, n. 1, p. 1-9, 2008.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Green coffee**: determination of loss in mass at 105°C: ISO 6673. Geneva, 2003. 17 p.
- KARATHANOS, V. T. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 39, n. 4, p. 337-344, 1999.
- KASHANINEJAD, M. et al. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 78, n. 1, p. 98-108, 2007.
- LEWIS, W. K. The rate of drying of solid materials. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, Washington, v. 13, n. 5, p. 427-432, 1921.
- MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. Thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 29, n. 1, p. 75-97, 1996.
- MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A. A new model for single-layer drying. **Drying Technology**, New York, v. 20, n. 7, p. 1503-1513, 2002.
- MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 66, n. 4, p. 513-518, 2005.
- NILNONT, W. et al. Finite element simulation for coffee (*Coffea arabica*) drying. **Food and Bioproducts Processing**, Rugby, v. 90, n. 2, p. 341-350, 2012.
- OLIVEIRA, G. H. H. et al. Desorption isotherms and thermodynamic properties of sweet corn cultivars (*Zea mays L.*). **International Journal of Food Science and Technology**, Oxford, v. 45, n. 3, p. 546-554, 2010.
- PAGE, C. **Factors influencing the maximum rates of air drying of shelled corn in thin layers**. 1949. Thesis (Ph.D.) - Purdue University, Lafayette, 1949.
- PUTRANTO, A. et al. Mathematical modeling of intermittent and convective drying of rice and coffee using the reaction engineering approach (REA). **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 105, n. 4, p. 638-646, 2011.
- RESENDE, O. et al. Modelagem matemática para a secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de concreto. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 31, n. 2, p. 189-196, 2009.
- RESENDE, O.; FERREIRA, L. U.; ALMEIDA, D. P. 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.
- THOMPSON, T. L.; PEARTT, R. M.; FOSTER, G. H. Mathematical simulation of corn drying: a new model. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 11, n. 4, p. 582-589, 1968.
- VERMA, L. R. et al. Effects of drying air parameters on rice drying models. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 28, n. 1, p. 296-301, 1985.
- ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. **Drying Technology**, New York, v. 14, n. 10, p. 2225-2253, 1996.

