

MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM DO CAFÉ (*Coffea canephora* Pierre) EM TERREIROS DE CONCRETO E HÍBRIDO¹

Oswaldo Resende²; Valdiney Cambuy Siqueira³; Paulo César Corrêa⁴; Paulo Cesar Afonso Júnior⁵

¹Projeto financiado pelo Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café - Consórcio Pesquisa Café

²Prof. Dr., Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – IFGoiano, Rio-Verde-GO, osvresende@yahoo.com.br

³Mestrando, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – IFGoiano, Rio-Verde-GO, v.cambuy@hotmail.com

⁴Prof. Dr., Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa-MG. copace@ufv.br

⁵Pesquisador Dr., Embrapa Café, Brasília-DF, paulo.junior@embrapa.br

RESUMO: Objetivou-se com o presente trabalho estimar e avaliar as curvas de secagem do café conilon e ajustar diferentes modelos matemáticos aos valores experimentais durante a secagem em terreiros de concreto e híbrido. Foram utilizados frutos de café (*Coffea Canephora* Pierre), variedade conilon, colhido, manualmente, pelo sistema de derriça no pano, com teor de água de aproximadamente 44% (b.u.). Depois da colheita os frutos cerejas foram divididos em dois lotes e submetidos à secagem em terreiro híbrido e terreiro de concreto. Aos dados experimentais da secagem do café ajustaram-se dez modelos matemáticos freqüentemente utilizados para representação da secagem de produtos agrícolas. Conclui-se que, o terreiro híbrido é 2,8 vezes mais eficiente que o terreiro de concreto para a secagem de frutos de café conilon no estádio cereja. Dentre a série de modelos testada, os modelos Wang e Singh e Page apresentaram os melhores ajustes para descrição da cinética de secagem do café conilon e são recomendados para predição do fenômeno.

Palavras-chave: teor de água, modelos matemáticos, curvas de secagem.

MATHEMATICAL MODELLING FOR COFFEE DRYING (*Coffea canephora* Pierre) IN HYBRID TERRACE AND CONCRETE YARD

ABSTRACT: The aim of this work was to estimate and evaluate the coffee drying and to fit different mathematical models at drying experimental data during in hybrid terrace and concrete yard. The coffee berries (*Coffea Canephora* Pierre), variety conilon, were manually harvested on the cloth, at moisture content of approximately 44% (w.b.). After harvest, cherries coffee berries was divided into two lots and subjected to drying in hybrid terrace and concrete yard. Ten mathematical models cited in the literature were fitted to the experimental data in order to represent the drying process. It was concluded that the hybrid terrace is 2,8 times more efficient than concrete yard for conilon coffee drying cherries. Among the models analyzed, Wang and Singh and Page presented the best fitting to describe the drying kinetics of conilon coffee berries and are recommended for predicting the phenomenon.

Key words: moisture content, mathematical models, drying curves.

INTRODUÇÃO

O café é a cultura perene mais difundida no Estado de Rondônia, que ocupa a quarta posição entre os principais Estados produtores do país, apresentando na safra de 2009/2010, a produção de 2.338.000 sacas, que representa 4,95% da produção nacional. Considerando apenas a espécie Conilon (*Coffea canephora* Pierre), Rondônia é o segundo maior produtor nacional (Conab, 2011).

De acordo com Palacin et al. (2009) o café é um dos poucos produtos com maior custo de secagem não só pelo seu elevado teor inicial de água, mas também pelo fato de as características estruturais dos frutos e grãos estarem suscetíveis a danos que podem depreciar a qualidade do produto seco, diminuindo o seu valor comercial. Logo, a secagem é uma etapa de fundamental importância na fase pós-colheita e deve ser iniciada logo após a colheita para reduzir, rapidamente, o alto teor de água da casca, polpa e mucilagem e evitar as fermentações que podem prejudicar a qualidade do café.

No desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamentos utilizados para a secagem de grãos, é relevante a simulação e a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto durante a remoção de água. Para a simulação, cujo princípio se fundamenta na secagem de sucessivas camadas delgadas do produto, utiliza-se um modelo matemático que representa, satisfatoriamente, sua perda de água durante o período de secagem (Berbert et al., 1995; Giner & Mascheroni, 2002).

Recentemente, têm sido realizados inúmeros trabalhos com o objetivo de identificar as características de diversos produtos agrícolas durante a secagem como: feijão adzuki (Almeida et al., 2009), sementes de ockra (Doymaz,

2005), abóbora (Doymaz, 2007), trigo parbolizado (Mohapatra & Rao, 2005), e café em coco (Corrêa et al., 2006), clones de café da espécie *Coffea canephora* (Resende et al., 2009; Resende, et al. 2010), dentre outros.

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 em terreiros de concreto e híbrido.

MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido na Unidade Experimental da Embrapa e no Departamento de Agronomia do *Campus* da Universidade Federal de Rondônia - UNIR, situados nos municípios de Ouro Preto do Oeste e Rolim de Moura - RO, respectivamente.

Foram utilizados frutos de café (*Coffea Canephora* Pierre), variedade conilon, procedentes do município de Ouro Preto do Oeste, RO. O café foi colhido, manualmente, pelo sistema de derriça no pano, com teor de água de aproximadamente 44% (b.u.). Depois da colheita o produto foi separado por diferença de massa específica sendo utilizados somente os frutos cerejas. Posteriormente, o café foi dividido em dois lotes e submetidos à secagem em terreiro híbrido e terreiro de concreto.

Para a secagem no terreiro de concreto, os frutos de café foram individualizados em células de 4 m², espalhados em camadas de 0,05 m de espessura, conforme Figura 1, e revolvidos periodicamente ao longo do dia a cada intervalo de uma hora.



Figura 1- Individualização dos frutos de café cereja durante a secagem em terreiro de concreto.

A secagem do café no terreiro híbrido foi realizada em um aparato experimental com área de 22,5 m². O café foi amontoado em uma célula do terreiro híbrido, sobre a superfície do duto de ventilação (chapa perfurada) responsável pela distribuição do ar forçado e aquecido através da massa de café, permitindo um processo contínuo de secagem do produto. O produto foi revolvido periodicamente a cada três horas e a camada de grãos formou um cone de 0,45 m de altura, sendo 0,25 m acima da chapa perfurada (Figura 2).



Figura 2 - Detalhe da célula do terreiro híbrido contendo os frutos de café cereja.

Os teores de água do produto ao longo da secagem foram acompanhados a cada 3 horas no terreiro híbrido e diariamente no terreiro de concreto, sendo determinados pelo método da estufa, 105±1 °C, em três repetições homogeneizadas de 30 g até massa constante (Brasil, 2009). A secagem do produto foi interrompida quando o café atingiu o teor de água em torno de 10% (b.u.).

A temperatura e a umidade relativa do ar ambiente e do ar de secagem, depois da passagem pelo ventilador, foram monitoradas por meio de psicrômetros.

Utilizou-se como combustível para aquecimento do ar no terreiro híbrido o carvão vegetal apresentando o teor de água de 2,13 (%b.u.). A vazão de ar do ventilador foi calculada com o auxílio de um anemômetro digital de pás rotativas apresentando um valor médio de 64,98 m³.min⁻¹. A vazão específica do ar foi 8,66 m³.min⁻¹.m⁻², determinada pela divisão da vazão do ar do ventilador pela área total das calhas perfuradas.

O teor de água de equilíbrio dos frutos de café foi calculado utilizando-se a equação proposta por Afonso Júnior (2001), expressa da seguinte forma:

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

em que,

X_e^* : teor de água de equilíbrio do produto (decimal b.s.);
T: temperatura do ar de secagem (°C); e
UR: umidade relativa do ar de secagem (decimal).

Para a determinação das razões de umidade dos frutos de café durante a secagem nas diferentes condições de ar, foi utilizada a seguinte expressão:

$$RX = \frac{X^* - X_e^*}{X_i^* - X_e^*} \quad (2)$$

em que,

X^* : teor de água do produto (decimal b.s.);
 X_i^* : teor de água inicial do produto (decimal b.s.); e
RX: razão de teor de água do produto, adimensional.

Aos dados experimentais da secagem do café foram ajustados os modelos matemáticos freqüentemente utilizados para representação da secagem de produtos agrícolas, cujas expressões estão apresentadas na Tabela 1.

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

Designação do modelo	Modelo	
$RU = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$	Wang e Singh	3)
$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k_1 \cdot t)$	Verma	4)
$RU = \exp \left(\left(-a - (a^2 + 4 \cdot b \cdot t)^{0,5} \right) / 2 \cdot b \right)$	Thompson modificado	5)
$RU = \exp(-k \cdot t^n)$	Page	6)
$RU = \exp(-k \cdot t)$	Newton	7)
$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$	Logarítmico	8)
$RU = a \cdot \exp(-k_o \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$	Dois Termos	9)
$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \cdot \exp(-k \cdot b \cdot t)$	Aproximação da Difusão	10)
$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k \cdot a \cdot t)$	Exponencial de Dois Termos	11)
$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	Henderson e Pabis	12)

em que,

t: tempo de secagem, h;
k, k_o , k_1 : constantes de secagem, h^{-1} ; e
a, b, c, n: coeficientes dos modelos.

Para o ajuste dos modelos matemáticos realizou-se análise de regressão não linear, pelo método Gauss Newton, utilizando-se o programa computacional STATISTICA 5.0®. Para verificar o grau de ajuste de cada modelo foi considerado a significância do coeficiente de regressão pelo teste t, adotando o nível de 5% de probabilidade, a magnitude do coeficiente de determinação (R^2), 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:

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (13)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (14)$$

em que,

Y: valor observado experimentalmente;

\hat{Y} : valor calculado pelo modelo;

n: número de observações experimentais; e

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

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante a realização dos testes, a temperatura ambiente média foi de 23,4 °C e a umidade relativa média foi de 63,4%. Na Figura 3 estão apresentados os valores de temperatura e umidade relativa do ar de secagem ao longo do período de secagem. Verifica-se que a temperatura média do ar de secagem foi de $58,6 \pm 4$ °C e a umidade relativa média foi de $8,4 \pm 3$ %.

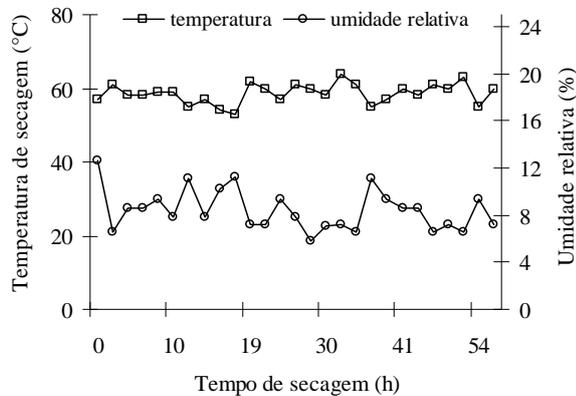


Figura 3. A temperatura (°C) e a umidade relativa (%) do ar de secagem ao longo da secagem do café em terreiro híbrido.

Na Figura 4 estão apresentados os valores médios do teor de água do café durante a secagem em terreiro de concreto e em terreiro híbrido. Verifica-se na Figura 4, que o tempo necessário para que o café atingisse o teor de água de 10,0 (%b.u.) foi de 168 h no terreiro de concreto e 60 h no terreiro híbrido. Assim, nota-se que o terreiro híbrido promoveu a secagem dos cafés cerejeira em 108 h antes que o terreiro de concreto, demonstrando a sua maior eficiência na secagem do produto, assim como executou a secagem 2,8 vezes mais rápida que no terreiro de concreto.

Donzeles et al. (2008), analisando a secagem direta em leira do café cerejeira natural, em terreiro híbrido, e trabalhando com a temperatura do ar de secagem de $54,1 \pm 3,9$ °C, observaram que para reduzir o teor de água do produto de 56,1 (%b.u.) para 12,3 (%b.u.) foram necessárias 54 horas de secagem; e que, para as condições climáticas da região da Zona da Mata de Minas Gerais, o tempo de secagem do produto foi 6,7 vezes menor comparativamente ao terreiro de concreto.

Desta forma, a utilização do terreiro híbrido para a secagem do café Conilon pode ser uma importante ferramenta na conservação das características desejáveis do produto, pois a remoção de água promovida em menor intervalo de tempo é fundamental para minimizar a possibilidade do surgimento de fermentações indesejáveis e, conseqüentemente, redução da qualidade comercial do café.

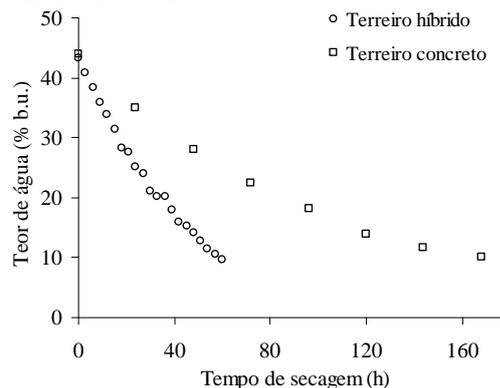


Figura 4. Valores experimentais do teor de água (%b.u.) do café conilon ao longo do tempo de secagem (h) em terreiro de concreto e híbrido.

Na Tabela 2 encontram-se os parâmetros estatísticos utilizados para a comparação entre os dez modelos de secagem analisados para representar a cinética de secagem do café cerejeira durante a secagem em terreiros de concreto e híbrido.

O coeficiente de determinação apesar de não ser um bom parâmetro para verificar o ajuste de modelos não-lineares, normalmente apresenta maiores valores para os modelos que melhor se ajustam aos dados experimentais. Nota-se que os coeficientes de determinação referentes aos modelos matemáticos ajustados, apresentaram-se superiores a 98%, que de acordo com Madamba et al. (1996), indicam uma representação satisfatória do fenômeno em estudo

Tabela 2. Coeficientes de determinação (R^2 , %), erros médio relativo (P, %) e estimado (SE, decimal) e tendência de distribuição dos resíduos (A: aleatório; T: tendenciosa), para os dez modelos analisados, durante a secagem do café cereja em terreiros de concreto e híbrido.

Modelos	Terreiro de concreto				Terreiro Híbrido			
	SE	P	R^2	Resíduo	SE	P	R^2	Resíduo
Wang e Singh	0,007	2,1	99,96	A	0,014	2,6	99,97	A
Verma	0,009	2,8	99,94	T	0,013	2,2	99,79	A
Thompson	0,031	11,9	99,22	T	0,033	9,5	98,61	T
Page	0,010	3,3	99,91	A	0,017	4,4	99,62	A
Newton	0,029	11,9	99,22	T	0,032	9,5	98,61	T
Logarítmico	0,010	3,1	99,93	T	0,013	2,2	99,79	A
Dois Termos	0,034	10,8	99,35	T	0,017	4,2	99,66	A
Aproximação da Difusão	0,009	2,8	99,91	T	0,013	2,2	99,79	A
Exponencial de Dois Termos	0,010	3,4	99,36	T	0,033	9,5	98,61	T
Henderson e Pabis	0,028	10,8	99,94	T	0,028	7,8	98,99	T

Analisando o erro médio estimado (SE), que descreve o valor do desvio padrão da estimativa, verifica-se que os modelos Wang e Singh, Verma, Page, Logarítmico e Aproximação da Difusão apresentaram menores valores para as duas secagens realizadas. Vale salientar que quanto menor for o valor do desvio padrão da estimativa (SE), melhor será a qualidade do ajuste do modelo em relação aos dados observados. Resende et al. (2009) também observaram que os modelos Verma, Page e Aproximação da Difusão apresentaram baixos valores do erro médio estimado, durante a modelagem da secagem de clones de café da espécie *Coffea canephora*. Verifica-se que os modelos, apresentaram valores do erro médio relativo inferiores a 10%, que de acordo com Mohapatra & Rao (2005), indica uma representação adequada do fenômeno, exceto para os modelos Thompson, Newton, Dois Termos e Henderson e Pabis.

Verifica-se, ainda na Tabela 2, que os modelos Wang e Singh e Page obtiveram, para a modelagem da secagem dos frutos de café cereja nos terreiros de concreto e híbrido, a distribuição aleatória dos resíduos, resultando, assim, em ajustes satisfatórios aos dados experimentais, corroborando os resultados verificados por Resende et al. (2009) para a modelagem da secagem de clones de café.

Na Figura 5, estão ilustrados os valores da razão de umidade experimentais e estimados, pelos modelos de Wang e Singh e Page, durante a secagem dos frutos de café. Nota-se, por meio da correspondência entre os valores experimentais e estimados, que os modelos descrevem adequadamente o fenômeno de secagem do café nos terreiros de concreto e híbrido.

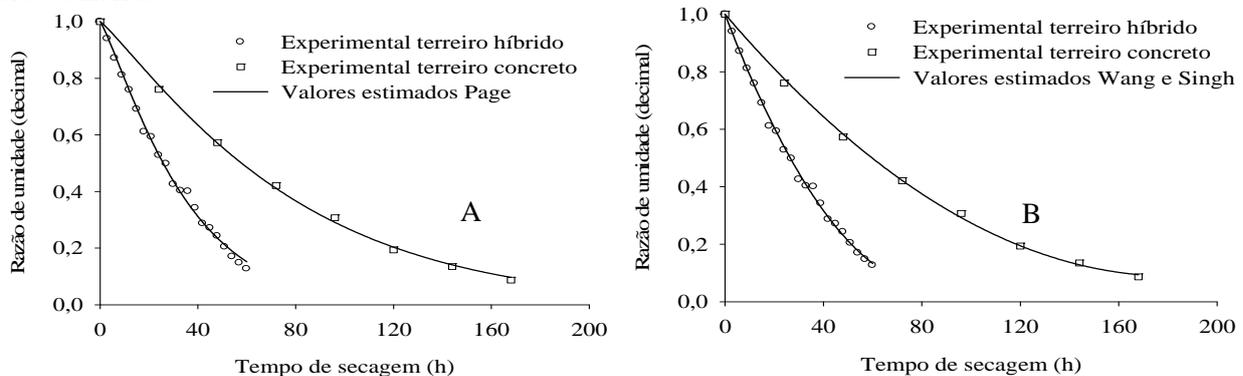


Figura 5. Valores experimentais da razão de umidade (RU, decimal) e estimados pelos modelos de Page (A) e Wang e Singh (B) para a secagem do café nos terreiros de concreto e híbrido.

Na Tabela 3 estão apresentados os coeficientes dos modelos de Wang e Singh e Page ajustados para a secagem do café conilon nos terreiros de concreto e híbrido.

Tabela 3. Coeficientes dos modelos de Wang e Singh e Page ajustados para a secagem do café conilon nos terreiros de concreto e híbrido.

Terreiros	Wang e Singh		Page	
	a	b	k	n
Concreto	$-9,76 \times 10^{-3*}$	$2,60 \times 10^{-5*}$	$0,572 \times 10^{-2*}$	$1,1735^*$
Híbrido	$-2,23 \times 10^{-2*}$	$1,32 \times 10^{-4*}$	$1,47 \times 10^{-2*}$	$1,1860^*$

*Significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste t.

A magnitude da constante de secagem “k” para o modelo de Page foi sensivelmente superior para a secagem do café no terreiro híbrido, em relação ao terreiro de concreto. Este fato ressalta que a água foi removida do produto com maior velocidade no terreiro híbrido, pois, segundo Madamba et al. (1996) e Babalis & Belessiotis (2004), a constante de secagem “k” pode ser utilizada como uma aproximação para caracterizar o efeito da temperatura e está relacionada à difusividade efetiva do processo de secagem para o período decrescente que é controlado pela difusão líquida.

CONCLUSÕES

Conclui-se que, o terreiro híbrido é 2,8 vezes mais eficiente que o terreiro de concreto para a secagem de frutos de café conilon no estádio cereja. Baseando-se em parâmetros estatísticos, os modelos Wang e Singh e Page apresentam os melhores ajustes para descrição da cinética de secagem dos frutos de café cereja da espécie *Coffea canephora* e são recomendados para predição do fenômeno.

AGRADECIMENTOS

Ao Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café - CBP&D/Café e ao Programa Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento do Café - PNP&D/Café pelo apoio financeiro indispensável à execução do presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFONSO JÚNIOR, P. C. **Aspectos físicos, fisiológicos e de qualidade do café em função da secagem e do armazenamento**. Viçosa, 2001. 384p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.
- ALMEIDA, D.P.; RESENDE, O.; COSTA, L.M.; MENDES, U.C. SALES, J.F. Cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Global Science And Technology**, Rio Verde, v.2, n.1, p.72-83, 2009.
- BABALIS, S.J.; BELESSIOTIS, V.G. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. **Journal of Food Engineering**, Elsevier Science, v.65, n.3, p.449-458, 2004.
- BERBERT, P. A.; QUEIROZ, D. M.; SILVA, J. S.; PINHEIRO FILHO, J. B. Simulation of coffee drying in a fixed bed with periodic airflow reversal. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 60, n. 3, p. 167-173, 1995.
- BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes**. Brasília, 2009. 395p.
- CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento**, disponível em <<http://www.conab.gov.br>>, acesso em: 28 abr. 2011.
- 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.
- DONZELES, S.M.L.; SILVA, J.S.; CORRÊA, P.C.; MAGALHÃES, E.A.; SILVA, R.N.; MELO, F.A.O. Análise do terreiro híbrido trabalhando com apenas ar aquecido na secagem de café (*Coffea arabica* L.). **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, Especial Café, n.10, p.73-79, 2008.
- DOYMAZ, I. Drying characteristics and kinetics of okra. **Journal of Food Engineering**, Elsevier Science, v. 69, n. 3, p. 275-279, 2005.
- DOYMAZ, I. The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. **Journal of Food Engineering**, Elsevier Science, v. 79, n. 1, p. 243-249, 2007.
- GINER, S.A.; MASCHERONI, R.H. Diffusive drying kinetics in wheat, Part 2: applying the simplified analytical solution to experimental data. **Postharvest Technology**, London, v.81, n.1, p.85-97, 2002.
- MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. Thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, Elsevier Science, 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**, Elsevier Science, v.66, n.4, p.513-518, 2005.
- PALACIN, J. J. F.; LACERDA FILHO, A. F.; MELO, E. C.; TEIXEIRA, E. C. Secagem combinada de café cereja descascado. **Revista Engenharia na Agricultura**, n. 17, n.3, p.244-258, 2009.
- RESENDE, O.; ARCANJO, R.V.; SIQUEIRA, V.C.; RODRIGUES, S. 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.; RODRIGUES, S.; SIQUEIRA, V.C.; ARCANJO, R.V. Cinética da secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de chão batido. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 40, n. 2, p.247-256, 2010.