

# AVALIAÇÃO DE MODELOS DE SECAGEM EM CAMADA FINA DE SEMENTES DE MARACUJÁ AMARELO<sup>1</sup>

VINICIUS DE OLIVEIRACARLESSO<sup>2</sup>, PEDROAMORIMBERBERT<sup>3</sup>, ROBERTO FERREIRADA SILVA<sup>4</sup>, EDENIO DETMANN<sup>5</sup>

**RESUMO** – Este trabalho foi realizado com o objetivo de determinar o modelo, dentre cinco modelos matemáticos pré-selecionados, que melhor descreve a secagem por convecção em camada fina de sementes de maracujá-amarelo. Os testes de secagem foram realizados em protótipo de secador de leito fixo, com fluxo de ar ascendente, empregando-se três níveis de temperatura (30, 37 e 40 °C), três níveis de fluxo de ar (0,4; 0,8 e 1,0 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>) e dois teores iniciais de água (23,3 e 32,9% b.u.). Todos os experimentos foram realizados em ambiente com temperatura de 29,3±1,5 °C e razão da mistura de 0,016±0,003 kg kg<sup>-1</sup>. O modelo exponencial duplo com quatro parâmetros descreveu de forma mais acurada as curvas de secagem. O coeficiente de determinação obtido foi de 0,9056 e o erro padrão de ajustamento foi igual a 1,4 pontos percentuais de teor de água.

Termos para indexação: *Passiflora edulis* f. *flavicarpa*, secagem estacionaria, curvas de secagem

## ASSESSMENT OF THIN-LAYER DRYING MODELS OF YELLOW PASSION FRUIT SEEDS

**ABSTRACT** – This study was carried out to determine the best-fit model, among five pre-selected drying equations, for predicting the thin-layer convective drying of passion fruit seeds. Experimental drying data were collected using a fixed-bed prototype drier, and employing three levels of drying-air temperature (30, 37, and 40 °C) and specific airflow rate (0.4, 0.8 e 1.0 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>), and two levels of initial seed moisture content (23.3 and 32.9% w.b.). All drying runs were performed in a laboratory room at 29.3±1.5 °C and humidity ratio of 0.016±0.003 kg kg<sup>-1</sup>. A double exponential equation with four parameters was the model capable of predicting the drying curves of passion fruit seeds with the best level of accuracy. The coefficient of determination was 0.9056 and the standard error of prediction was 1.4 percentage points moisture.

Index terms: *Passiflora edulis* f. *flavicarpa*, stationary drying, drying curves

## INTRODUÇÃO

O aumento pelo interesse no emprego e estudo da secagem artificial de grandes volumes de sementes com movimentação do ar, natural ou forçada, em contraposição à secagem natural, na própria planta ou no campo de cultivo, teve início quando os métodos tradicionais de colheita manual passaram a ser rapidamente substituídos pela colheita mecanizada, com o surgimento das primeiras colhedoras

combinadas no mercado dos países desenvolvidos no final da década de 40 do século passado. Desde então, a capacidade de plantio e colheita mecanizados passaram a exceder a capacidade instalada de secagem. Desta forma, a única alternativa à secagem artificial seria permitir que o teor de água fosse reduzido mantendo-se as sementes na própria planta ou no campo por períodos mais longos. Como essa opção apresentava riscos consideráveis de comprometimento da qualidade do produto, principalmente pela criação de condições

<sup>1</sup> Submetido em 01/06/2006. Aceito para publicação em 28/02/2007. Parte da Dissertação de Mestrado do primeiro autor, apresentada à UENF. Trabalho financiado pelo CNPq, FAPERJ, FINEP e IFS

<sup>2</sup> Eng Agrônomo, M.S., Laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG), Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), CEP 28013-602 Campos dos Goytacazes, RJ. carlesso@uenf.br

<sup>3</sup> Eng. Agrícola, Ph.D., Professor Associado, Laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG), Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy

Ribeiro (UENF), CEP 28013-602 Campos dos Goytacazes, RJ. pberbert@uenf.br

<sup>4</sup> Eng. Agrônomo, Ph.D., Professor Titular, Laboratório de Fitotecnia (LFIT), Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), CEP 28013-602 Campos dos Goytacazes, RJ. roberto@uenf.br

<sup>5</sup> Zootecnista, D.S., Professor Adjunto, Departamento de Zootecnia, Universidade Federal de Viçosa (UFV), CEP 36571-000 Viçosa, MG. detmann@ufv.br

adequadas para o desenvolvimento de fungos e deterioração resultante da infestação por insetos, a secagem natural foi caindo em desuso.

De acordo com Queiroz et al. (1995) são dois os métodos comumente utilizados para analisar a secagem de produtos biológicos: o empírico e o teórico. O método empírico consiste em formar grupos físicos adimensionais que podem ser facilmente investigados por experimentos de laboratório e baseia-se nas condições externas, como temperatura, razão da mistura e velocidade do ar de secagem. Entretanto, apesar de poder descrever a curva de secagem para as condições do experimento, não fornece indicação sobre o transporte de energia e de água no interior dos produtos. Os modelos teóricos utilizam os fundamentos da matemática da difusão e da transferência de calor e massa e podem descrever de forma aceitável o perfil da distribuição de água no interior de determinado produto agrícola desde que seja possível correlacionar sua forma à geometria de um sólido perfeito, além da exigência do estabelecimento de uma relação funcional entre o coeficiente de difusão, o teor de água e a temperatura. Nesse caso, há que se considerar que o valor médio da razão de umidade, quer seja determinado pela solução de uma série truncada ou por integração de um conjunto de pontos discretos distribuídos na matriz do produto, representa a taxa de secagem de um sólido isolado, qualquer que seja seu formato. Expressões empíricas, semi-teóricas ou puramente teóricas para a secagem de sementes de fruteiras raramente são encontradas na literatura. Embora diversas teorias tenham sido propostas e várias equações tenham sido elaboradas para prever a variação do teor de água durante a secagem de produtos agrícolas no período à taxa decrescente, é possível afirmar que apenas relações empíricas ou semiteóricas têm sido utilizadas nos projetos de secadores, pois elas representam com maior precisão o processo de secagem que qualquer das equações teóricas desenvolvidas posteriormente (Brooker et al., 1992).

Praticamente, a maioria das abordagens empíricas a respeito da secagem de produtos agrícolas granulares utilizam os resultados das investigações primordiais de Lewis (1921) e Sherwood (1936) sobre a secagem de sólidos por convecção. De acordo com Lewis (1921), o movimento de líquido ou vapor em um sólido durante o período de secagem à taxa decrescente pode ser descrito utilizando-se a Lei de Newton para o resfriamento e é representado pela seguinte equação geral de secagem, em que  $\bar{U}_t$  = teor médio de água em qualquer instante  $t$ ,  $U_e$  = teor de água na condição de equilíbrio,  $U_0$  = teor de água inicial e  $k$  = constante de secagem.

$$[(\bar{U}_t - U_e)/(U_0 - U_e)] = \exp(-kt) \quad (1)$$

Devido à razoável aproximação entre os valores medidos experimentalmente e aqueles calculados pela Equação (1), também conhecida como Lei Exponencial ou Modelo Logaritmo de secagem, passou-se a considerá-la como uma equação que descreve de forma aceitável o fenômeno de transferência de massa durante a secagem por convecção de produtos capilares porosos. O valor de  $[(\hat{U}_t - U_e)/(U_0 - U_e)]$  é geralmente conhecido como razão de umidade,  $RU$ , ou adimensional de umidade. O numerador representa a quantidade de água que ainda pode ser removida ou a quantidade de água livre em qualquer tempo  $t$ , enquanto o denominador representa a quantidade total de água disponível para ser retirada pela secagem.

Ao avaliar os fatores com influência significativa sobre a taxa de secagem por convecção de grãos de milho em camada fina e ao comparar os resultados obtidos experimentalmente com aqueles obtidos com o modelo exponencial, Page (1949) propôs a seguinte equação de secagem, em que  $k'$  representa a constante modificada de secagem e  $\zeta$  é um parâmetro que depende da umidade relativa e temperatura do ar de secagem.

$$RU = \exp(-k't) \quad (2)$$

Apesar de a taxa de secagem obtida com a Equação (2) apresentar valores muito elevados no início do processo, normalmente considera-se que, para sementes, a curva obtida com Equação de Page representa melhor a curva de secagem experimental que o modelo exponencial. Os termos  $k$ ,  $k'$  e dependem do tipo de produto, de sua temperatura e, em alguns casos, do cultivar e da umidade relativa do ar. Carlesso et al. (2005) avaliaram a adequação do modelo de Page para descrição da secagem de sementes de maracujá com teor de água inicial de cerca de 30% b.u. e observaram que a equação obtida não se ajustou às curvas experimentais de secagem.

Apresenta-se, a seguir, o modelo matemático de predição da taxa de secagem de uma camada fina de sementes de trigo proposto por Simmonds et al. (1953), conhecido também como Modelo Exponencial Simples de Dois Parâmetros, e que foi desenvolvido levando-se em consideração os efeitos da velocidade, temperatura e razão da mistura do ar de secagem, do tamanho médio das sementes e de sua taxa de redução de volume no decorrer da secagem.

$$RU = a \exp(-k_2 t) \quad (3)$$

É interessante notar que a maioria dos autores que tentaram ajustar resultados obtidos em procedimentos experimentais de secagem de produtos agrícolas em camada fina ao modelo matemático descrito pela Equação (3), o tenha feito considerando que essa equação havia sido desenvolvida

por Henderson e Pabis (1961). Na realidade, esses autores apenas avaliaram sua utilização ao afirmar que a maioria dos pesquisadores empregava com sucesso o modelo proposto por Simmonds et al. (1953) para descrever a secagem de grãos em camada fina. A contribuição de Henderson e Pabis (1961), no entanto, foi mostrar que os coeficientes genéricos de secagem,  $k$ , não eram constantes e sim dependentes da temperatura do ar e dos mecanismos de difusão de água ou vapor d'água no interior das sementes.

Em função dos resultados acurados que têm proporcionado na predição da variação de RU em função do tempo, para os mais variados tipos de produtos (sementes de arroz e melão, milho em espiga, cereja, fatias de alho, cenoura e berinjela e folhas de plantas medicinais), diversos pesquisadores (Henderson, 1974; Sharaf-Eldeen et al., 1980; Noomhorm e Verma, 1986; Ezeiki e Otten, 1991; Rahman e Perera, 1996; Ertekin e Yaldiz, 2004) têm utilizado os modelos representados pelas Equações (4) e (5) para avaliação da secagem de produtos agrícolas. Na realidade, ambas as equações podem ser consideradas modificações do Modelo Exponencial ou Logaritimico original, com a inclusão de um segundo coeficiente no caso da Equação (4) e de um segundo termo exponencial no caso da Equação (5). Madamba et al. (1996) afirmam que a equação (5) é parte de uma série infinita de expoentes negativos, havendo sido derivada da solução geral da equação de difusão. Os modelos matemáticos de secagem representados pelas Equações (4) e (5) são conhecidas normalmente como Modelos Exponenciais Simples de três parâmetros e Duplo de quatro parâmetros, respectivamente.

$$RU = a_1 \exp(-k_3 t) + b \quad (4)$$

$$RU = a_2 \exp(-k_4 t) + c \exp(-k_5 t) \quad (5)$$

Os modelos empíricos apresentados anteriormente foram avaliados quanto a sua capacidade de simular a secagem de sementes de maracujá-amarelo com grau de acurácia aceitável em termos de engenharia. A escolha dos melhores modelos foi feita mediante análise de regressão, análise de erros e avaliação de demais parâmetros estatísticos que auxiliaram na escolha da equação que melhor representou os dados experimentais.

Consultando-se a literatura disponível sobre o emprego de modelos empíricos de simulação de secagem em camada fina, verifica-se que grande parte foi desenvolvida para produtos agrícolas com estruturas celulares, formato e dimensões que diferem em muito das sementes de maracujá, como é o caso do café, plantas medicinais, aromáticas e condimentares e de fatias de frutas. Sendo assim, optou-se

por avaliar apenas os modelos representados pelas Equações de (1) a (5) por se tratarem daqueles utilizados com maior frequência, em virtude de seu sucesso no ajuste aos resultados experimentais obtidos na secagem de grãos e sementes de cereais e oleaginosas.

Nos métodos modernos de desenvolvimento de novos tipos de secadores para sementes é imprescindível a utilização de modelos matemáticos que possam descrever a taxa de transferência de massa que ocorre entre o ar de secagem e o produto (Erenturk et al., 2004). É interessante reafirmar que a possibilidade de simular o processo de secagem sem que seja necessário construir e testar diversos protótipos de secadores traz diversos benefícios, além da redução no tempo necessário para o seu desenvolvimento. Os modelos de simulação permitem avaliar o efeito de qualquer combinação das variáveis envolvidas no grau de uniformidade, no teor de água final das sementes, na eficiência do processo em termos energéticos (kJ por kg de água evaporada) e na relação custo/benefício dos diversos métodos de secagem.

## MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG) do Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias (CCTA), Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Campos dos Goytacazes, RJ. Utilizaram-se sementes de maracujá-amarelo provenientes da Fábrica Bela Joana Frutas e Sucos, do Grupo MPE, localizada na divisa dos municípios Campos dos Goytacazes e São Fidélis – RJ. As sementes, ao chegarem ao laboratório, foram postas para fermentar em meio aquoso, em recipiente de vidro, por 48h. Em seguida, foram transferidas para uma peneira com malha de aço, onde foram lavadas em água corrente e friccionadas levemente contra a malha até eliminar o arilo existente. Depois da lavagem, as sementes permaneceram espalhadas sobre papel toalha por cerca de 30 min para remoção da água superficial, sendo então transferidas para frascos de vidro com tampa rosqueada, que foram posteriormente vedados com Parafilm. Os frascos com as sementes foram devidamente identificados e acondicionados em câmara do tipo B.O.D. com temperatura controlada em  $4 \pm 1^\circ\text{C}$  até serem retiradas para os testes de secagem.

Para validação das equações de secagem, foram coletados dados experimentais utilizando-se três níveis de temperatura do ar de secagem (30, 37 e  $40^\circ\text{C}$ ), três níveis de velocidade do ar de secagem (0,4; 0,8 e  $1,0\text{m s}^{-1}$ ), o que corresponde a fluxos de ar de 0,4; 0,8 e  $1,0\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$ , respectivamente, e

dois níveis de teor de água inicial ( $23,3 \pm 0,9$  e  $32,9 \pm 2,3\%$  b.u.). Todos os experimentos foram realizados em ambiente com temperatura de  $29,3 \pm 1,5^\circ\text{C}$  e razão da mistura de  $0,016 \pm 0,003 \text{ kg kg}^{-1}$ .

O teor de água inicial das sementes foi determinado antes de se iniciar cada teste de secagem, obedecendo as recomendações propostas pelas Regras para Análise de Sementes (Brasil, 1992), a  $130 \pm 1^\circ\text{C}$  por 1h, utilizando-se, no entanto, estufa com circulação forçada de ar. Os testes de secagem das sementes de maracujá foram realizados utilizando-se um secador protótipo de camada fina capaz de fornecer o ar de secagem em condições controladas de temperatura e vazão. Esse secador possui um ventilador centrífugo de 1,0cv, um conjunto de resistências elétricas para aquecimento do ar, um inversor de frequência para alterar e controlar a rotação do motor do ventilador, um controlador de temperatura com microprocessador, uma câmara *plenum*, um conjunto de esferas de vidro para diminuir a turbulência e uniformizar a velocidade do ar antes de sua entrada na câmara de secagem, que é composta por uma bandeja circular de diâmetro interno igual a 0,25m, com fundo perfurado em malha de aço inoxidável.

Amostras contendo 120g de sementes em equilíbrio térmico com o ar ambiente foram então colocadas na bandeja, cuja massa foi previamente determinada, sendo então distribuídas sobre o fundo perfurado, de maneira a formar camada fina com altura correspondente à espessura média das sementes. Em todos os testes, a redução do teor de água das sementes foi monitorada por gravimetria, pesando-se o conjunto bandeja-amostra em intervalos regulares de cinco minutos nos primeiros trinta minutos; de dez minutos entre trinta e cento e vinte minutos; de quinze minutos de cento e vinte até cento e oitenta minutos e de trinta minutos a partir de cento e oitenta minutos, utilizando-se balança digital com grau de acurácia de 0,01kg.

A velocidade do ar de secagem foi medida utilizando-se um anemômetro de pás rotativas Airflow Modelo AV6, posicionado na saída da câmara de secagem. As leituras de velocidade e temperatura do ar de secagem foram registradas

antes de se retirar a bandeja em cada procedimento de pesagem. A temperatura e umidade relativa do ar ambiente foram medidas com aparelho digital Hygrometer – Series 485, fabricado pela Dwyer Instruments, Inc. e registrados continuamente em termohigrógrafo SATO do tipo SIGMA II, modelo NS II–Q. A intenção deste monitoramento foi de avaliar as demais propriedades psicrométricas do ar de secagem, como entalpia, razão da mistura e volume específico, utilizando o programa computacional GRAPSI desenvolvido por Melo et al. (2004). A temperatura do ar de secagem foi medida utilizando-se um termômetro de mercúrio, com divisão da escala igual a  $1^\circ\text{C}$ , que foi colocado logo abaixo da câmara de secagem.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, composto de 18 tratamentos, com três repetições por tratamento. Na análise estatística dos dados, procedeu-se ao ajustamento das variáveis razão de umidade e tempo de secagem, por intermédio do procedimento de Gauss Newton (Souza, 1998), implementado sobre o programa SAEG (Sistemas de Análises Estatísticas), dos modelos não-lineares descritos anteriormente. A avaliação da adequação dos modelos empregados para descrição do fenômeno estudado foi feita por intermédio do cálculo do coeficiente de determinação, estimado como o quadrado do coeficiente de correlação linear entre valores preditos e observados para a variável dependente razão de umidade (Souza, 1998); por intermédio dos intervalos de confiança assintóticos (ICA) para os parâmetros de ajustamento ( $1 - \alpha = 0,95$ ); e através da avaliação gráfica dos resíduos padronizados (Draper e Smith, 1966). As curvas de secagem das sementes de maracujá foram expressas como a variação da razão de umidade em função do tempo de secagem. Apresenta-se, na Tabela 1, os modelos matemáticos de secagem em camada delgada avaliados quanto ao grau de adequação às curvas de secagem obtidas experimentalmente.

Este trabalho foi realizado com o objetivo de determinar o modelo, dentre cinco modelos matemáticos pré-selecionados, que melhor descreve a secagem por convecção em camada fina de sementes de maracujá-amarelo.

**TABELA 1. Modelos de secagem em camada delgada**

Nome do modelo	Equação	Fonte
Lewis ou exponencial	$RU = \exp(-kt)$	Lewis (1921)
Page ou exponencial modificado	$RU = \exp(-k_1t)$	Page (1949)
Exponencial simples com dois parâmetros	$RU = a \exp(-k_2t)$	Simmonds et al. (1953)
Exponencial simples com três parâmetros	$RU = a_1 \exp(-k_3t) + b$	Ertekin e Yaldiz (2004)
Exponencial duplo com quatro parâmetros	$RU = a_2 \exp(-k_4t) + c \exp(-k_5t)$	Henderson (1974)

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresenta-se, na Tabela 2, os valores médios de temperatura e razão da mistura do ar ambiente, as condições finais do produto, os parâmetros de secagem utilizados nos testes experimentais e seus resultados, para temperaturas médias do ar de secagem de 30, 37 e 40°C, fluxos de ar de 0,4; 0,8 e 1,0 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> e teor de água inicial de 23,3±0,9% b.u. Os valores correspondentes para teor de água inicial de 32,9±2,3% b.u. encontram-se na Tabela 3.

Mostra-se, na Figura 1, a representação gráfica da variação do teor de água em função do tempo de secagem, para os três valores de temperatura avaliados nesse trabalho e velocidade do ar de secagem de 0,4 m s<sup>-1</sup>. Os resultados indicam que o tempo de secagem diminui consideravelmente com o aumento da temperatura do ar; o tempo necessário para reduzir o teor de água das sementes de maracujá de 23,4±0,9% b.u. para 10,0% b.u. foi de 4,3h na secagem a 30 °C; aumentando-se a temperatura do ar para 37°C, reduz-se

o tempo de secagem para 1,55h, ou seja, aumentando-se em apenas 7°C a temperatura do ar de secagem obtém-se, para as condições estudadas, uma redução de 60% no tempo de secagem. Observa-se também que para um acréscimo adicional de 3 °C, de 37 para 40°C, há uma redução de cerca de 45% no tempo de secagem.

Na Figura 2, verifica-se que para velocidade do ar de 0,8 m s<sup>-1</sup> e temperatura de 30°C, o tempo requerido para reduzir o teor de água das sementes de maracujá de 23,2±0,9% b.u. para 9,8±0,2% b.u. foi de 2,77h. Aumentando-se a temperatura do ar de secagem para 37°C, observa-se uma redução de cerca de 75% no tempo de secagem. Quando aumenta-se a temperatura de 37 para 40°C, ocorre uma redução de 25% no tempo de secagem. Verifica-se, portanto, que o efeito do aumento da temperatura do ar na redução do tempo de secagem foi acentuado pelo aumento da velocidade do ar, quando aumenta-se a temperatura de 30 para 37°C. Entretanto, ao aumentar-se a temperatura do ar em 3°C, de 37 para 40°C, ocorre o fenômeno inverso, ou seja, o efeito

**TABELA 2. Condições médias do ar ambiente, parâmetros do ar de secagem e das sementes de maracujá e tempo de secagem para teor de água inicial de 23,3±0,9% b.u.**

Ar ambiente		Ar de secagem			Condições finais	
Temp. °C	Razão da mistura kg kg <sup>-1</sup>	Temp. °C	Velocidade m s <sup>-1</sup>	Vazão específica m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>	Teor de água % b.u.	Tempo de secagem h
29,6	0,020	30	0,4	0,41	10,0	4,3
28,9	0,019	37	0,4	0,41	5,6	4,8
30,4	0,018	40	0,4	0,40	5,5	3,5
28,6	0,018	30	0,8	0,78	9,3	4,0
31,5	0,015	37	0,8	0,78	6,6	2,8
28,7	0,013	40	0,7	0,69	5,5	4,0
31,5	0,020	30	1,0	0,98	8,9	5,5
30,9	0,019	37	1,0	0,96	6,8	5,3
31,8	0,015	40	1,0	0,97	5,5	3,1

**TABELA 3. Condições médias do ar ambiente, parâmetros do ar de secagem e das sementes de maracujá e tempo de secagem para teor de água inicial de 32,9±2,3% b.u.**

Ar ambiente		Ar de secagem			Condições finais	
Temp. °C	Razão da mistura kg kg <sup>-1</sup>	Temp. °C	Velocidade m s <sup>-1</sup>	Vazão específica m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>	Teor de água % b.u.	Tempo de secagem h
26,6	0,012	30,0	0,4	0,40	10,3	0,8
19,2	0,007	25,0	0,3	0,27	6,6	0,5
28,6	0,015	40,0	0,4	0,40	9,7	0,5
28,6	0,014	30,9	0,8	0,80	10,4	0,8
28,7	0,013	37,0	0,8	0,80	8,8	1,1
29,0	0,016	39,9	0,8	0,80	9,9	0,5
28,5	0,015	31,4	1,2	1,18	10,5	0,9
27,8	0,014	37,1	1,2	1,19	9,3	0,7
29,0	0,014	39,9	1,2	1,18	9,9	0,5

do aumento da temperatura do ar na redução do tempo de secagem diminui de intensidade quando aumenta-se a velocidade do ar de 0,4 para 0,8 m s<sup>-1</sup>.

A redução no tempo de secagem de sementes de maracujá em função do aumento da temperatura, para velocidade do ar de 1,0 m s<sup>-1</sup> e para redução do teor de água inicial de 22,4±0,2% b.u. para 10,1±0,2% b.u., é mostrada na Figura 3. O tempo de secagem é reduzido de 2,22 para 1,00h, ou seja em 55%, ao aumentar-se a temperatura de 30 para 37°C. A redução correspondente quando aumenta-se a temperatura de 37 para 40 °C é de 50%. A tendência observada anteriormente, ou seja, o fato de a velocidade do ar acentuar o efeito da temperatura no nível de redução do tempo de secagem, quando a temperatura aumentava de 30 para 37°C,

não se confirmou no presente caso. Há que considerar que esses resultados são válidos apenas para secagem em camada fina, não podendo ser extrapolados para secagem em camada espessa, em que diversas outras variáveis podem influenciar o tempo total de secagem.

Os resultados dos testes para avaliar a influência da velocidade do ar na taxa de secagem de sementes de maracujá são apresentados nas Figuras 4, 5 e 6, onde pode-se observar a redução da razão de umidade em função do tempo de secagem para as temperaturas de 30, 37 e 40°C e para as velocidades de 0,4, 0,8 e 1,0 m s<sup>-1</sup>, respectivamente. Observa-se que, para todas as temperaturas, o aumento da velocidade do ar resulta no aumento da taxa de secagem, representada pela declividade da reta tangente à curva da razão de umidade

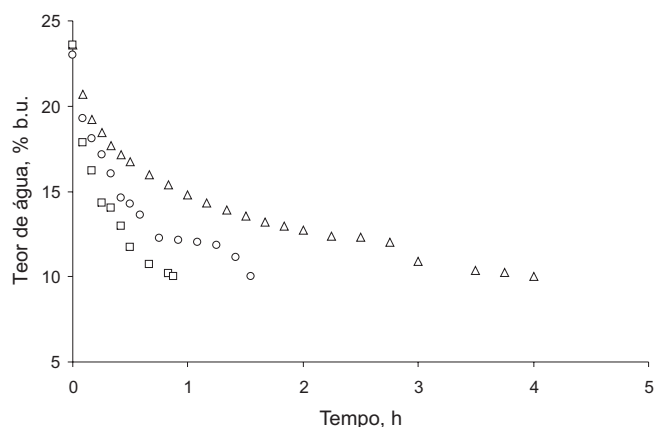


FIGURA 1. Variação do teor de água em função do tempo de secagem de sementes de maracujá para velocidade do ar de 0,4 m s<sup>-1</sup> e valores indicados de temperatura. Δ, 30°C; ○, 37°C e □, 40°C.

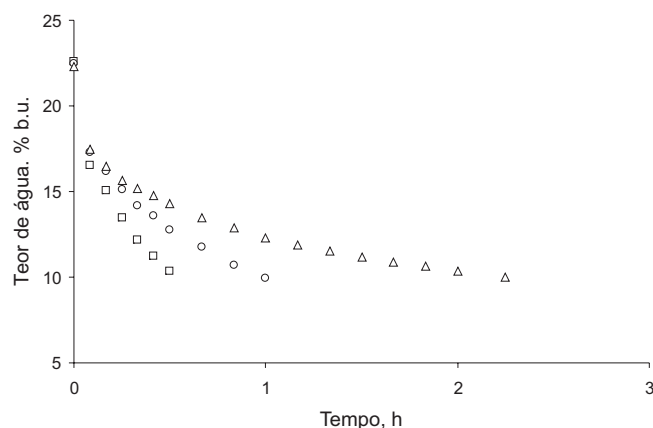


FIGURA 3. Variação do teor de água em função do tempo de secagem de sementes de maracujá para velocidade do ar de 1,0 m s<sup>-1</sup> e valores indicados de temperatura. Δ, 30°C; ○, 37°C e □, 40°C.

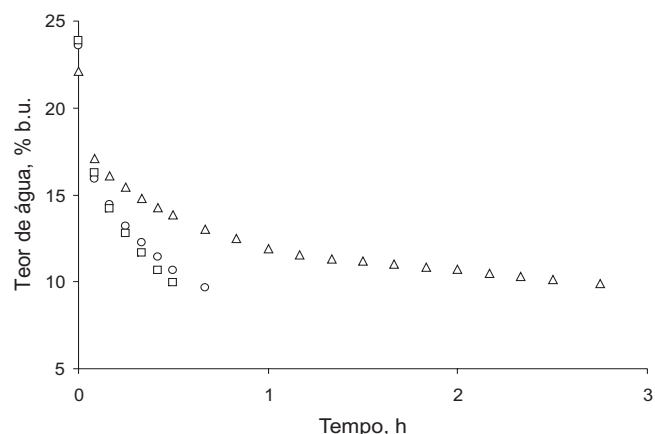


FIGURA 2. Variação do teor de água em função do tempo de secagem de sementes de maracujá para velocidade do ar de 0,8 m s<sup>-1</sup> e valores indicados de temperatura. Δ, 30°C; ○, 37°C e □, 40°C.

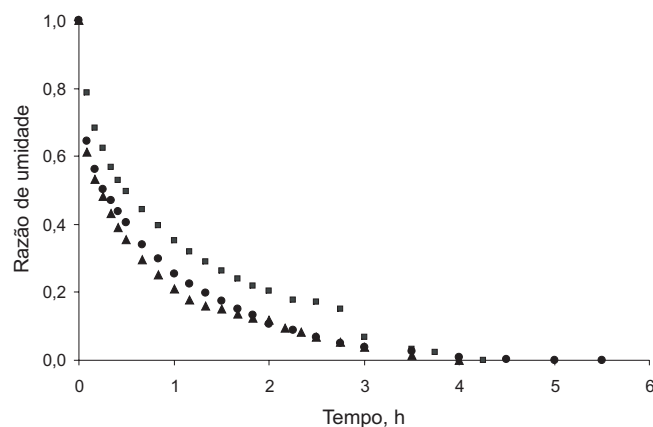
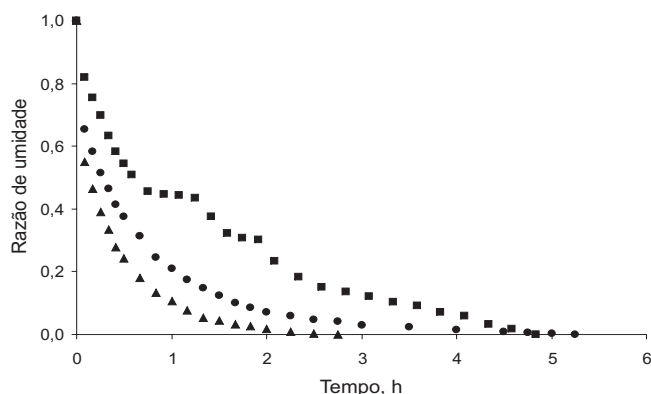
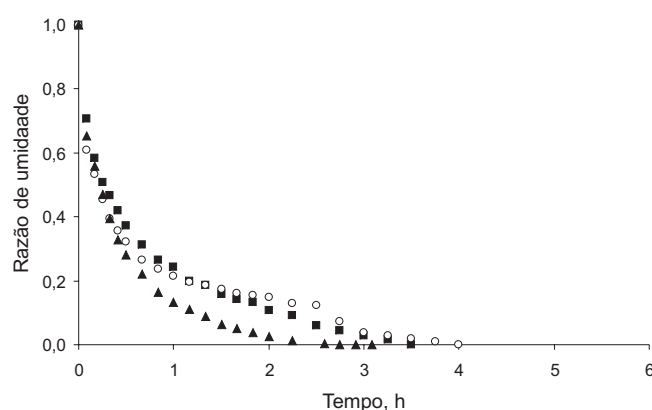


FIGURA 4. Influência da velocidade do ar na redução da razão de umidade de sementes de maracujá em função do tempo de secagem para temperatura de 30°C. ■, 0,4m s<sup>-1</sup>; ●, 0,8m s<sup>-1</sup>; ▲, 1,0m s<sup>-1</sup>.



**FIGURA 5.** Influência da velocidade do ar na redução da razão de umidade de sementes de maracujá em função do tempo de secagem para temperatura de 37°C. ■, 0,4m s<sup>-1</sup>; ●, 0,8m s<sup>-1</sup>; ▲, 1,0m s<sup>-1</sup>.



**FIGURA 6.** Influência da velocidade do ar na redução da razão de umidade de sementes de maracujá em função do tempo de secagem para temperatura de 40°C. ■, 0,4m s<sup>-1</sup>; ●, 0,8m s<sup>-1</sup>; ▲, 1,0m s<sup>-1</sup>.

em cada um dos pontos analisados.

Enquanto que a 30 °C e 0,4 m s<sup>-1</sup>, o tempo para reduzir o teor de água das sementes de maracujá de 23,3±0,2 para 10,4±0,4% b.u., foi de 4,25 h, ao duplicar a velocidade, o tempo de secagem foi reduzido para 2,83 h, uma redução da ordem de 33%. Neste último caso, esse foi o tempo de secagem para reduzir o teor de água inicial de 22,7±0,6% b.u. para o teor de água final de 10,0±0,1% b.u. Aumentando-se ainda mais a velocidade do ar, de 0,8 para 1,0 m s<sup>-1</sup>, reduz-se em cerca de 20% o tempo de secagem, de 2,83 para 2,25 h, de forma a reduzir o teor de água de 22,3±0,1 para 10,0% b.u. Verifica-se, portanto, que o efeito do aumento da velocidade do ar sobre o tempo de secagem é menos intenso que aquele provocado pelo aumento da temperatura. Os resultados correspondentes para temperaturas de 37 e 40 °C estão sumarizados na Tabela 4.

Apresenta-se, na Tabela 5, os valores das constantes e coeficientes genéricos de secagem ( $k$  e  $a$ ), dos coeficientes ( $b$  e  $c$ ) e dos parâmetros estatísticos obtidos por análise de regressão não-linear para os modelos matemáticos de secagem sumarizados na Tabela 1.

Utilizou-se então o Modelo de Lewis, Equação (1), para estimar o teor de água de amostras de sementes de maracujá e os resultados são mostrados na Figura 7, onde vê-se o gráfico de correspondência entre valores experimentais e estimados de teor de água. Nesta figura, a linha contínua representa a correspondência ideal entre estes dois valores. O erro padrão de ajustamento (EPA) foi de 1,9 ponto percentual. O erro ou desvio padrão de ajustamento é uma indicação do grau de distanciamento dos valores de teor de água determinados pelo método padrão de estufa em relação aos valores estimados pela equação de calibração e é calculado

**TABELA 4.** Redução percentual no tempo de secagem de sementes de maracujá em função do aumento da velocidade do ar ( $v$ ), para temperaturas (T) de 37 e 40°C.

T (°C)	$v$ (m s <sup>-1</sup> )	Teor de água Inicial (% b.u.)	Teor de água final (% b.u.)	$U^{1/}$	Tempo de secagem (h)	Redução no tempo de secagem (%)
37	0,4	24,3	10,0	14,3	2,0	
37	0,8	23,7	10,0	13,7	0,8	60
37	1,0	22,7	10,0	12,7	0,8	0
40	0,4	23,9	10,1	13,8	0,9	
40	0,8	24,6	10,0	14,6	0,5	45
40	1,0	22,6	10,0	12,6	0,5	0

<sup>1/</sup> DU = pontos percentuais de água retirados durante a secagem.

**TABELA 5. Valores das constantes e coeficientes genéricos de secagem (*k* e *a*), dos coeficientes (*ζ*, *b* e *c*) e os parâmetros estatísticos dos modelos matemáticos de secagem sumarizados na Tabela 2**

Modelo	Parâmetro	Estimativa	Limite ICA <sup>1/</sup> 95%		DPA <sup>2/</sup>	r <sup>2</sup>	EPA <sup>3/</sup>
			Superior	Inferior			
Lewis	k	1,8262	1,7494	1,9029	0,1138	0,7995	1,9
Page	k <sub>1</sub>	1,4802	1,4448	1,5156	0,0799	0,8486	1,4
Exponencial Simples Dois parâmetros	k <sub>2</sub>	1,2616	1,1940	1,3291	0,0969	0,8546	1,7
	a	0,7924	0,7698	0,8149			
Exponencial Simples Três parâmetros	k <sub>3</sub>	1,7796	1,6469	1,9122	0,0916	0,8693	1,6
	a <sub>1</sub>	0,7814	0,7564	0,8063			
	b	0,0659	0,0538	0,0781			
Exponencial Duplo Quatro parâmetros	k <sub>4</sub>	13,6266	10,2202	17,0331	0,0780	0,9056	1,4
	k <sub>5</sub>	0,8805	0,8175	0,9435			
	a <sub>2</sub>	0,3972	0,3550	0,4344			
	c	0,5986	0,5665	0,6307			

<sup>1/</sup> ICA = intervalo de confiança assintótico; <sup>2/</sup> DPA = desvio padrão amostral; <sup>3/</sup> EPA = erro padrão de ajustamento

utilizando-se a seguinte equação:

$$(6)$$

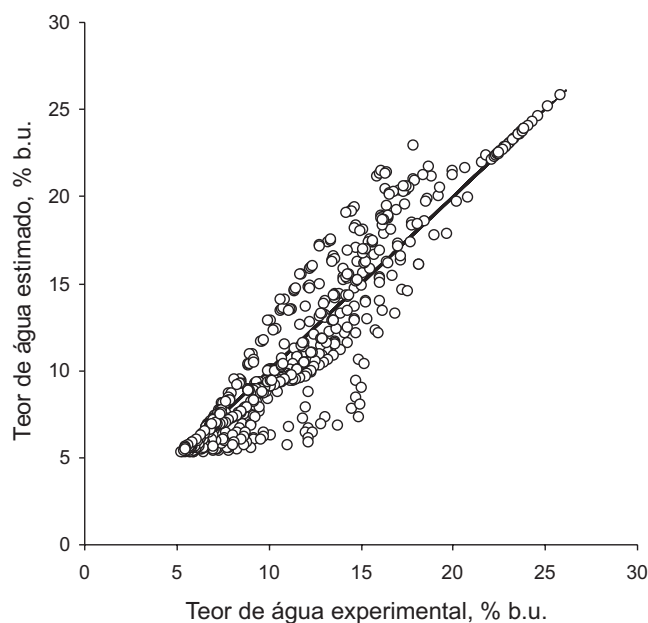
em que  $e_i$  representa a diferença entre os teores de água obtidos em estufa e aqueles estimados pela equação de ajustamento,  $p$  representa o número de variáveis independentes utilizadas no modelo de regressão múltipla e  $n$  é o número de amostras usadas no ajustamento (Jarret e Kraft, 1989).

A seguir, utilizou-se o modelo de Page, Equação (2), para estimar o teor de água de sementes de maracujá-amarelo, obtendo-se erro padrão de ajustamento de 1,4 pontos percentuais. Devido ao aumento no valor de  $r^2$  (Tabela 5) observa-se que houve uma ligeira melhora nos resultados quando o desempenho da Equação (1) é comparado com aquele da Equação (2).

Os erros-padrão de ajustamento (EPA) do modelo proposto por Simmonds et al. (1953) e das modificações propostas a esse modelo pela inclusão de novos coeficientes, Equação (4), e de termos exponenciais, Equação (5), na predição do teor de água de sementes de maracujá foram de 1,7, 1,6 e 1,4 pontos percentuais, respectivamente. Conclui-se que, de fato, as modificações propostas ao modelo original, resultaram em uma ligeira melhoria no caso da inclusão de um novo coeficiente, Equação (4), e de melhoria sensível no caso da inserção de um novo termo exponencial, Equação (5). Apresenta-se, na Figura 8, o gráfico de correspondência entre valores experimentais e estimados do teor de água pelo

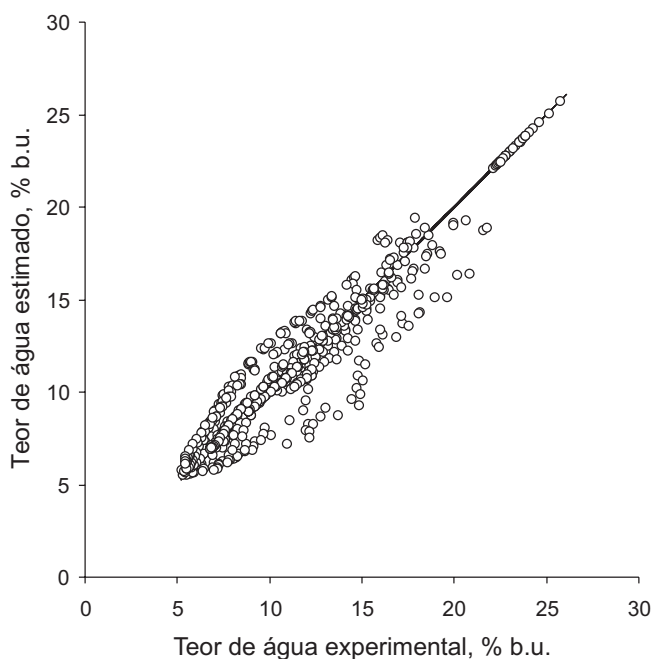
Modelo Exponencial Duplo de quatro parâmetros.

De acordo com os valores obtidos para os coeficientes de determinação e os erros-padrão de ajustamento, entre todos os modelos estudados, aquele que melhor representa a secagem em camada fina de sementes de maracujá, para as condições estudadas, é o modelo representado pela Equação (5). Assim sendo, mostra-se, na Figura 9, o desempenho

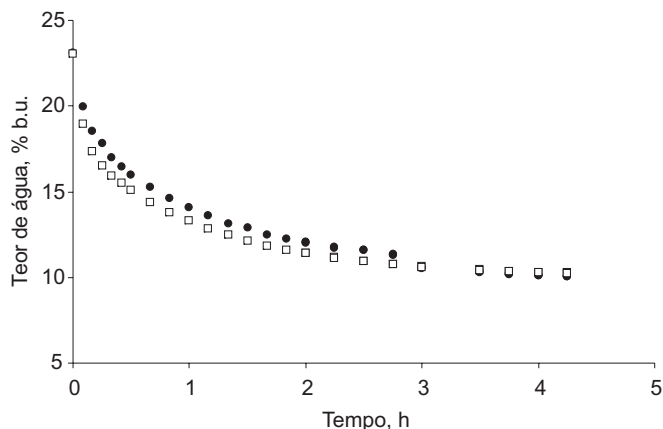


**FIGURA 7. Gráfico de correspondência entre os valores de teores de água determinados pelo método padrão de estufa e aqueles estimados pelo modelo de Lewis, Equação (1), para amostras de sementes de maracujá-amarelo.**





**FIGURA 8.** Gráfico de correspondência entre os valores de teores de água determinados pelo método padrão de estufa e aqueles estimados pelo modelo exponencial duplo de quatro parâmetros, Equação (5), para amostras de sementes de maracujá-amarelo.



**FIGURA 9.** Valores experimentais, ●, e estimados pela Equação (5), □, do teor de água em função do tempo, para secagem de sementes de maracujá a 30 °C e 0,4 m s<sup>-1</sup>.

dessa equação na estimativa da secagem em camada delgada de sementes de maracujá a 30 °C e 0,4 m s<sup>-1</sup>. Curvas semelhantes foram obtidas para praticamente todos os demais valores de temperatura e velocidade do ar de secagem.

## CONCLUSÕES

Na análise das curvas de secagem das sementes,

observou-se que o efeito do aumento da temperatura do ar, de 30 para 37 °C, na redução do tempo de secagem foi acentuado pelo aumento da velocidade do ar. Além disso, em função dos valores obtidos para os coeficientes de determinação e os erros-padrão de ajustamento, melhor representou a secagem em camada delgada de sementes de maracujá, para as condições estudadas. O modelo exponencial duplo de quatro parâmetros. Esse modelo, com coeficiente de determinação de 0,9056, foi capaz de simular a secagem em camada delgada das sementes com erro padrão de ajustamento de 1,4 pontos percentuais de teor de água.

## REFERÊNCIAS

- BRASIL. Ministério da Agricultura e da Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**. Brasília:SNDA/DNDV/CLAV, 1992. 365p.
- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 450p.
- CARLESSO, V.O.; BERBERT, P.A.; SILVA, R.F.; VIANA, A.P.; DETMANN, E.; DIONELLO, R.G. Secagem de sementes de maracujá em camada delgada. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.27, n.3, p.444-448, 2005.
- DRAPER, N.R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. New York: John Wiley & Sons, 1966. 407p.
- ERENTURK, S.; GULABOGLU, M.S.; GULTEKIN, S. The thin-layer drying characteristics of roseship. **Biosystems Engineering**, Oxford, v.89, n.2, p.159-166, 2004.
- ERTEKIN, C.; YALDIZ, O. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. **Journal of Food Engineering**, v.63, n.1, p.349-359, 2004.
- EZEIKI, G.O.I.; OTTEN, L. Two-component model for drying unshelled melon (egusi) seeds. **Canadian Agricultural Engineering**, v.33, n.1, p.73-78, 1991.
- HENDERSON, S.M.; PABIS, S. Grain drying theory I. Temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v.6, n.3, p.169-174, 1961.
- HENDERSON, S.M. Progress in developing the thin-layer drying equation. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v.17, n. 2, p.1167-1168/1172, 1974.
- JARRET, J.; KRAFT, A. **Statistical analysis for decision making**. Boston: Allyn and Bacon, 1989. 712p.
- LEWIS, L.W. The rate of drying of solid materials. **Industrial Engineering Chemistry**, v.13, n. 1, p. 427, 1921.
- MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. The thin layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v.29, p.75-97, 1996.
- MELO, E. C.; LOPES, D. C.; CORRÊA, P. C. GRAPSI - Programa computacional para o cálculo das propriedades psicrométricas do ar. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.12, n.2, p.145-154, 2004.

NOOMHORM, A.; VERMA, L.R. Generalized single layer rice drying models. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v.29, n.2, p.587-591, 1986.

PAGE, C. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers**. 1949. MS Thesis – Purdue University, West Lafayette, 1949.

QUEIROZ, D.M.; PEREIRA, J.A.M., MELO, E.C. **Modelos matemáticos de simulação de secagem de grãos**. Viçosa: Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, 1995. 59p.

RAHMAN, M.S.; PERERA, C.O. Effect of pre-treatment on air drying rate and thin layer drying of fresh cherry. In: **INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM**, 10., 1996, Krakow. **Proceedings...** Krakow, 1996. p.1053-1060.

SHARAF-ELDEEN, O.; BLAISDELL, Y. I.; SPAGNA, G. A model for ear corn drying. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v.23, p.1261-1271, 1980.

SHERWOOD, T.K. Air drying of solids. **Transactions of the American Institution of Chemical Engineers**, v.32, n. 1, p.150, 1936.

SIMMONDS, M.A.; WARD, G.T. MCEWEN, E. The drying of wheatgrain – Part I: the mechanism of drying. **Transactions of the Institution of Chemical Engineers**, v.31, n.1, p.265-278, 1953.

SOUZA, G. S. **Introdução aos modelos de regressão linear e não-linear**. Brasília: EMBRAPA/SPI, 1998. 505p.

