

Avaliação de modelos matemáticos na descrição das curvas de secagem por convecção de *Pectis brevipedunculata* (Gardner) Sch. Bip.

OLIVEIRA, M.T.R.¹; BERBERT, P.A.^{1*}; MARTINAZZO, A.P.²

¹Laboratório de Engenharia Agrícola, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Av. Alberto Lamego, 2000, Parque Califórnia, CEP: 28.013-602, Campos dos Goytacazes – Brasil *pberbert@uenf.br ²Escola de Engenharia de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, Avenida dos Trabalhadores, 420, Vila Santa Cecília, CEP: 27.255-125, Volta Redonda – Brasil

RESUMO: O presente trabalho foi realizado com o objetivo de selecionar, dentre cinco modelos matemáticos, aquele que melhor descreve as curvas experimentais de secagem da parte aérea de *P. brevipedunculata*. Os testes foram realizados em protótipo de secador de leito fixo, em camada delgada, a 30, 40 e 50°C, com fluxo mássico de ar seco de 0,27 e 0,54 kg s⁻¹ m⁻². O grau de ajuste dos modelos foi avaliado por meio do coeficiente de determinação, da raiz do erro quadrático médio, do erro percentual absoluto médio, do chi-quadrado reduzido, pela análise de dispersão de resíduos, e considerando o princípio da parcimônia. O modelo exponencial simples de três parâmetros foi o que melhor representou as curvas experimentais de secagem podendo ser utilizado com segurança na simulação do processo em camada espessa. Embora o modelo de Lewis não tenha sido capaz de descrever as curvas de secagem com grau de acurácia satisfatório, observou-se que a relação funcional entre a constante de secagem *k* e a temperatura, pode ser representada pela equação de Arrhenius.

Palavras-chave: óleo essencial, simulação de secagem, modelo de Lewis, equação de Arrhenius

ABSTRACT: Assessment of mathematical models for the description of *Pectis brevipedunculata* (Gardner) Sch. Bip. convective drying curves. The aim of this study was to select, among five mathematical models, the one that best describes the experimental drying curves of the shoot of *P. brevipedunculata*. Tests were conducted in a thin-layer prototype laboratory drier, at 30, 40 and 50°C, employing a dry air mass flow rate of 0.274 and 0.542 kg s⁻¹ m⁻². The goodness of fit of the models was assessed based on correlation coefficient, root mean square error, mean absolute percentage error, reduced chi-squared, residual plot analysis, and taking into account the principle of parsimony. The model that best described the experimental drying curves was the simple-exponential, three-parameter model, which can be safely used to simulate the deep-bed process. Although the Lewis model was found not to produce accurate predictions of the drying curves, an Arrhenius-type equation represents the relationship between the drying constant *k* and the temperature.

Key words: essential oil, drying simulation, Lewis model, Arrhenius equation

INTRODUÇÃO

A espécie *Pectis brevipedunculata* é uma planta herbácea rica em óleo essencial, geralmente encontrada em solos arenosos e rochosos de ambientes xerófilos, estando disseminada em grande extensão do território brasileiro. Além de seu emprego como planta medicinal no tratamento de problemas associados aos sistemas nervoso e digestivo, seu óleo pode vir a se tornar uma fonte importante de citral para as indústrias de

alimentos, química fina, cosméticos e perfumaria. O estudo de plantas medicinais raras ou pouco conhecidas está sendo novamente considerado de alta relevância devido, principalmente, à comprovação científica do elo existente entre essas plantas e a saúde humana, o que tem resultado no lançamento de novos produtos terapêuticos como fitoterápicos, drogas botânicas baseadas em sistemas multicomponentes, suplementos dietéticos

e alimentos funcionais (Raskin et al., 2002; Agra et al., 2007; Azevedo, 2007).

No Brasil, é comum a secagem de plantas medicinais ser realizada à sombra ou sob pleno sol ou em estufa, situações em que há pouco ou nenhum controle de parâmetros como temperatura, razão da mistura do ar de secagem e fluxo de ar seco. No entanto, o projeto de secadores eficientes, que permitam o aproveitamento comercial de plantas medicinais, requer conhecimentos específicos relacionados à cinética da secagem, bem como o emprego de equações de secagem em camada delgada que possibilitem a simulação do processo em camada espessa. É relevante considerar que a modificação experimental dos parâmetros operacionais de secagem é uma solução que pode ser utilizada para melhorar a eficiência das instalações responsáveis pelo pré-processamento de plantas medicinais. No entanto, resultados análogos podem ser obtidos por meio do emprego de modelos matemáticos em programas de simulação do processo de secagem, sem que seja necessário realizar procedimentos experimentais dispendiosos (Zanoelo et al., 2007).

O principal interesse no estudo das etapas envolvidas no pré-processamento de plantas medicinais tem sido a manutenção de sua qualidade depois da secagem e do armazenamento, ou seja, devem-se reduzir ao mínimo as perdas dos princípios ativos de interesse, dos óleos essenciais e dos compostos que visam agregar sabor ou aroma aos alimentos e bebidas. Considerando que estudos sobre a secagem de produtos agrícolas granulares, como cereais e oleaginosas, têm sido realizados desde os anos 40 do século passado, são relativamente recentes os trabalhos relacionados à secagem artificial de plantas medicinais, aromáticas e condimentares. Dentre os produtos estudados encontram-se o açafraão (Blasco et al., 2006), capim-limão (Martinazzo et al., 2010), chá-preto (Zanoelo et al., 2007), coentro (Silva et al., 2008), guaco (Radünz, et al., 2010), louro (Demir et al., 2004) e salsa (Soysal et al., 2006).

A espécie *P. brevipedunculata* é uma planta ainda pouco estudada, não havendo trabalhos publicados sobre a cinética da secagem ou a avaliação de modelos matemáticos de secagem em camada delgada que permitam simular o processo e encontrar as melhores variáveis a ele relacionadas.

A análise das curvas de secagem pode ser feita por meio de métodos teóricos ou empíricos. O método empírico consiste na obtenção de curvas de secagem a partir de variações nas condições externas, não oferecendo indicações precisas sobre o transporte de água no interior do produto. No entanto, a utilização de modelos matemáticos empíricos que descrevam as curvas de secagem

em camada delgada tem sido útil na simulação de secagem de camadas espessas do produto, mesmo que esses modelos sejam válidos apenas no âmbito das condições testadas experimentalmente. Isto permite sua utilização em aplicações industriais, seja para auxiliar no projeto de novos secadores, seja para aperfeiçoar o funcionamento de secadores já em operação (Parry, 1985; Brooker et al., 1992).

A utilização de modelos puramente teóricos, embora preferível do ponto de vista científico, não pode ser empregada no presente trabalho, uma vez que a parte aérea de *P. brevipedunculata*, é uma mistura de hastes, folhas e capítulos florais, sem uma forma geométrica única e definida que possa representá-la adequadamente. Desta forma, qualquer tentativa de simular ou otimizar a secagem de *P. brevipedunculata* requer a realização de uma série de experimentos de secagem, de forma a obter dados suficientes para descrever o processo de remoção de água a partir de curvas que possam ser descritas por equações ou modelos empíricos de secagem.

Nesse trabalho descreve-se a avaliação do grau de adequação de cinco modelos matemáticos na descrição da secagem em camada delgada de *Pectis brevipedunculata*, a 30, 40 e 50°C, empregando-se fluxo mássico de ar seco de 0,27 e 0,54 kg s⁻¹ m⁻² e razão da mistura do ar de 0,019 kg kg⁻¹.

MATERIAL E MÉTODO

Os experimentos de secagem foram realizados no Laboratório de Engenharia Agrícola – LEAG, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias – CCTA, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, Município de Campos dos Goytacazes, RJ.

Material vegetal

O material utilizado foi a parte aérea de *Pectis brevipedunculata* (Gardner) Sch. Bip., proveniente da área experimental do campus da UENF, onde a espécie ocorre espontaneamente. A exsicata está depositada no Herbário UENF sob registro H3227. Para a realização de cada teste experimental de secagem, foi coletado aproximadamente 1 kg da parte aérea das plantas, utilizando tesoura de lâminas de aço inoxidável. A coleta do material vegetal foi realizada em março de 2010, sempre pela manhã, entre 7 e 8 h. O corte foi feito cerca de 2 cm acima da superfície do solo. Logo depois de colhido, o material foi transportado para o laboratório, onde passou por limpeza e seleção manual, excluindo as partes atacadas por doenças ou pragas, qualquer outro vegetal ou material estranho, como também as partes velhas

e secas. A planta não foi separada em suas partes constituintes, ou seja, o material a ser secado era composto de hastes, folhas e capítulos florais.

Secador

Para promover a secagem da parte aérea de *P. brevipedunculata*, empregou-se um secador de leito fixo (Figura 1) capaz de fornecer o ar de secagem em condições controladas de vazão e temperatura. O secador possui um ventilador centrífugo de 735,5 W, 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 N 480, uma câmara *plenum* e um conjunto de esferas de vidro para diminuir a turbulência e uniformizar a velocidade do ar antes de sua entrada na câmara de secagem. O secador foi fabricado com paredes duplas de chapa de aço galvanizado, preenchidas com isolante térmico em toda sua extensão a partir da seção de aquecimento do ar. A câmara de secagem é composta por três bandejas circulares de 0,23 m de diâmetro interno e 0,05 m de altura, com fundo de chapa de aço inoxidável perfurada.

Secagem

Cada bandeja foi preenchida com cerca de 100 g do material vegetal, perfazendo uma camada

de cerca de 0,04 m de espessura. A quantidade de água removida durante a secagem foi determinada por processo gravimétrico, com auxílio de balança semi-analítica. As pesagens foram feitas a cada 5 min na primeira meia hora, a cada 10 min até duas horas, a cada 15 min até três horas, a cada 30 min até nove horas e, posteriormente, a cada 60 min. A secagem foi interrompida quando o teor de água do produto atingia o equilíbrio higroscópico correspondente às condições do ar de secagem. Os testes foram realizados empregando-se três níveis de temperatura, 30, 40 e 50°C, dois níveis de fluxo de ar seco, 0,27 e 0,54 kg s⁻¹ m⁻², razão de mistura de 0,019 kg kg⁻¹ e teor de água inicial de 79,4 ± 2,2% b.u. O teor de água de equilíbrio foi determinado experimentalmente pelo método dinâmico, em câmara climática Binder, modelo KBF 720.

A temperatura do ar de secagem foi medida utilizando-se termômetro de mercúrio, com divisão de escala de 1°C, sendo posicionado logo abaixo da câmara de secagem. A velocidade do ar de secagem foi medida utilizando-se anemômetro de pás rotativas Airflow, modelo AV6, posicionado na saída de um dispositivo metálico localizado no topo da câmara de secagem. As leituras de velocidade e temperatura foram registradas imediatamente antes de cada pesagem. A temperatura e umidade relativa do ar ambiente foram medidas com aparelho

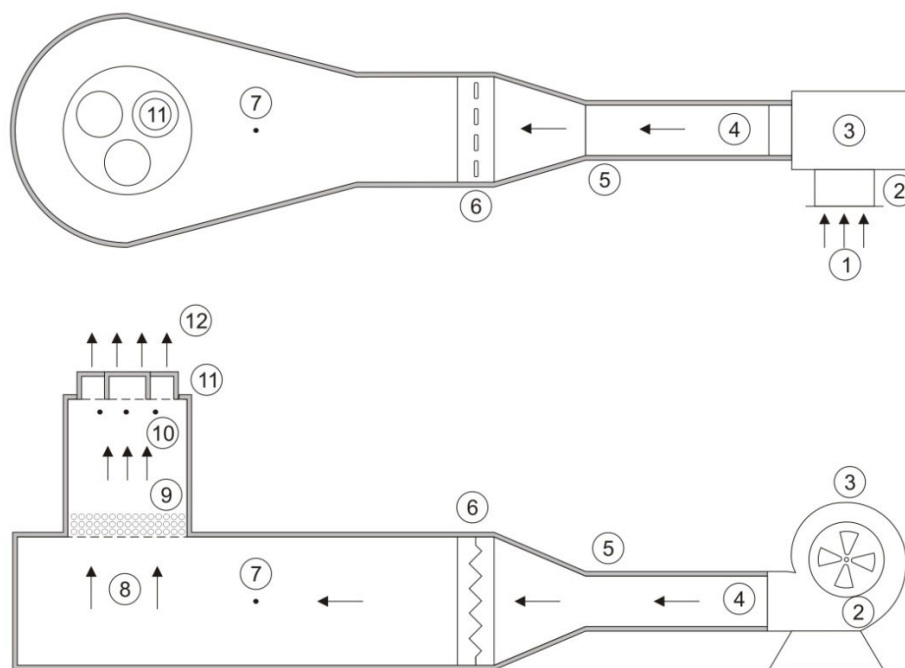


FIGURA 1. Vistas superior e frontal do protótipo de secador de camada delgada. 1. Entrada de ar; 2. Válvula do tipo diafragma; 3. Ventilador centrífugo com inversor de frequência; 4. Ducto de ar; 5. Isolamento térmico em lâ-de-vidro; 6. Conjunto de resistências elétricas; 7. Controlador de temperatura microprocessado; 8. Câmara plenum; 9. Esferas de vidro; 10. Termopares; 11. Câmara de secagem com três bandejas; 12. Saída de ar. Fonte: Oliveira et al. (2011).

digital Hygrometer, Série 485, fabricado pela Dwyer Instruments, Inc. A intenção deste monitoramento foi avaliar as demais propriedades psicrométricas do ar de secagem, como entalpia, razão de mistura e volume específico, propiciando a caracterização dos experimentos utilizando as equações propostas por Wilhelm (1976). As condições médias de secagem encontram-se resumidas na Tabela 1.

Determinação do teor de água

A determinação dos teores de água inicial e final foi realizada antes e depois de cada teste de secagem, utilizando balança digital com precisão de 0,1 mg. Esse procedimento foi realizado em estufa de circulação forçada de ar, marca BINDER, modelo FED 240, a $103 \pm 1^\circ\text{C}$, por 24 h, de acordo com as especificações da Norma S358.2 proposta pela ASABE (2010).

Delineamento experimental e análise estatística

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em arranjo fatorial 3 x 2 (temperatura vs fluxo de ar seco), com três repetições para cada tratamento, num total de 18 parcelas experimentais. Na análise estatística dos dados, procedeu-se ao ajustamento das variáveis razão de umidade (RU) e tempo de secagem, por intermédio do método Simplex e Quasi-Newton, implementado sobre o programa STATISTICA 8.0 (StatSoft, 2001), aos cinco modelos não-lineares apresentados na Tabela 2. A razão de umidade é dada por $RU = [(U_t - U_e)/(U_0 - U_e)]$, em

que U_t , U_e e U_0 representam os teores de água em qualquer instante t , no início da secagem e na condição de equilíbrio, respectivamente. O numerador representa a quantidade de água que ainda pode ser removida ou a quantidade de água livre em qualquer instante t , enquanto o denominador representa a quantidade total de água disponível para ser retirada pela secagem.

A avaliação do grau de adequação dos modelos empregados para descrição dos seis tratamentos referentes ao fenômeno estudado foi feita por intermédio do cálculo dos seguintes parâmetros estatísticos e de acordo com os seguintes critérios: 1. Coeficiente de determinação r^2 maior que 98%; 2. O menor intervalo de variação da raiz do erro quadrático médio (REQM); 3. Erro percentual absoluto médio (h) inferior a 15%; 4. O menor intervalo de variação do chi-quadrado reduzido (χ^2). Para os parâmetros REQM e χ^2 considerou-se, concomitantemente, a maior proximidade dos intervalos de variação Δ do valor zero. A escolha dos modelos mais apropriados foi feita, também, a partir da análise da dispersão dos resíduos. Além disso, adotou-se o Princípio da Parcimônia, que estabelece que os melhores modelos são os obtidos utilizando-se estruturas aceitáveis e simples, contendo em sua formulação um menor número de parâmetros (Lark, 2001). As equações para o cálculo dos parâmetros de erro podem ser encontradas em: REQM (Gunhan et al., 2005), η (Madamba et al., 1996) e χ^2 (Panchariya et al., 2002).

TABELA 1. Condições médias empregadas na secagem da parte aérea de *P. brevipedunculata*, tempo total de secagem e teor de água de equilíbrio.

| Número do teste | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ar ambiente | | | | | | |
| Temperatura, °C | 29,1 | 30,0 | 30,6 | 31,9 | 31,7 | 31,7 |
| Razão da mistura, kg kg ⁻¹ | 0,017 | 0,018 | 0,019 | 0,018 | 0,020 | 0,019 |
| Ar de secagem | | | | | | |
| Temperatura, °C | 29,8 | 30,2 | 39,9 | 40,3 | 49,8 | 50,1 |
| Fluxo de ar seco, kg s ⁻¹ m ⁻² | 0,29 | 0,55 | 0,26 | 0,52 | 0,28 | 0,52 |
| Condição inicial do produto | | | | | | |
| Temperatura, °C | 29,1 | 30,0 | 30,6 | 31,9 | 31,7 | 31,7 |
| Teor de água, % b.u. | 79,4 | 79,6 | 75,2 | 80,2 | 80,5 | 81,7 |
| Condição final do produto | | | | | | |
| Temperatura, °C | 29,8 | 30,2 | 39,9 | 40,3 | 49,8 | 50,1 |
| Teor de água, % b.u. | 15,1 | 19,7 | 7,5 | 10,2 | 7,5 | 6,9 |
| Tempo total de secagem, h | 33 | 33 | 23 | 21 | 5,25 | 6,75 |
| Teor de água de equilíbrio | 5,8 | 6,0 | 3,2 | 2,8 | 2,5 | 2,5 |

TABELA 2. Modelos matemáticos de secagem em camada delgada ajustados aos dados experimentais de secagem de *P. brevipedunculata*, em que RU = razão de umidade (adimensional); t = tempo de secagem (h); k, g e h = constantes de secagem (h^{-1}); n = expoente (adimensional); a, b e c = constantes (adimensionais).

| Nº do modelo | Nome do modelo | Equação |
|--------------|-----------------------------------|--|
| 1 | Lewis | $RU = \exp(-kt)$ |
| 2 | Page | $RU = \exp(-kt^n)$ |
| 3 | Exponencial simples, 3 parâmetros | $RU = a \exp(-kt) + b$ |
| 4 | Exponencial duplo, 4 parâmetros | $RU = a \exp(-k_1t) + b \exp(-k_2t)$ |
| 5 | Exponencial triplo, 6 parâmetros | $RU = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$ |

Fontes: modelo 1 (Lewis, 1921); modelo 2 (Page, 1949); modelo 3 (Yagcioglu et al., 1999); modelo 4 (Sharma et al., 1982); modelo 5 (Karathanos, 1999).

RESULTADO E DISCUSSÃO

Apresentam-se, nas Figuras 2 a 6, os gráficos com os valores dos parâmetros estatísticos (r^2 , REQM, η e χ^2) utilizados para avaliar o grau de adequação dos modelos matemáticos apresentados na Tabela 2, aos dados experimentais de secagem por convecção de *P. brevipedunculata*, a 30, 40 e 50°C, fluxo de ar seco de 0,27 e 0,54 $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$ e razão da mistura de 0,019 kg kg^{-1} .

Considerando-se apenas o valor de r^2 como parâmetro de comparação do grau de adequação dos diversos modelos, observa-se que todos apresentam coeficiente de determinação maior que

0,98, ou seja, todos seriam considerados adequados na descrição da secagem de *P. brevipedunculata* caso o único parâmetro comparativo houvesse sido o r^2 . Alguns autores consideram que qualquer modelo de secagem com $r^2 \geq 0,93$ poderia ser considerado aceitável, em termos de engenharia, para a descrição do processo (Madamba et al., 1996; Panchariya et al., 2002), embora Zanoelo et al. (2007) tenham considerado adequados modelos com valores de r^2 menores que 0,90. Porém, o mais comum é a obtenção de coeficientes de determinação maiores que 0,99 para os melhores modelos de secagem (Gunhan et al., 2005; Sacilik &

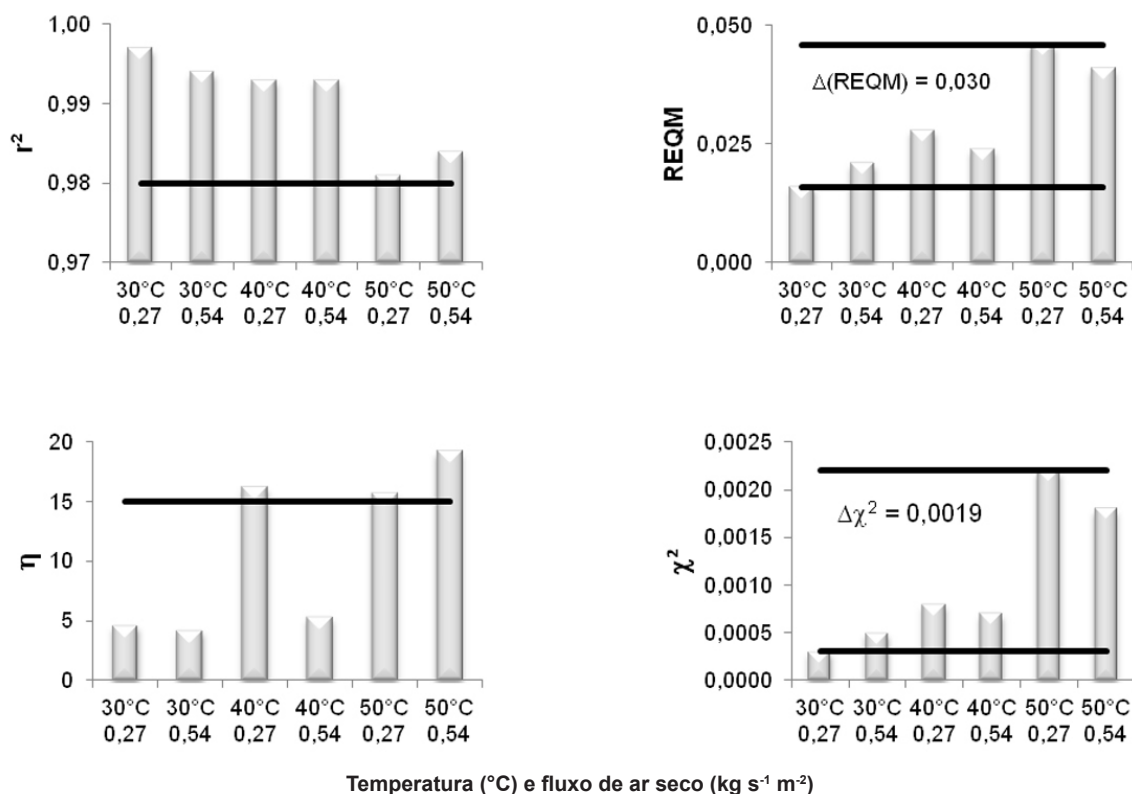


FIGURA 2. Desempenho do modelo de Lewis (modelo 1) na descrição da secagem de *P. brevipedunculata*, a 30, 40 e 50 °C e fluxo de ar seco de 0,27 e 0,54 $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$.

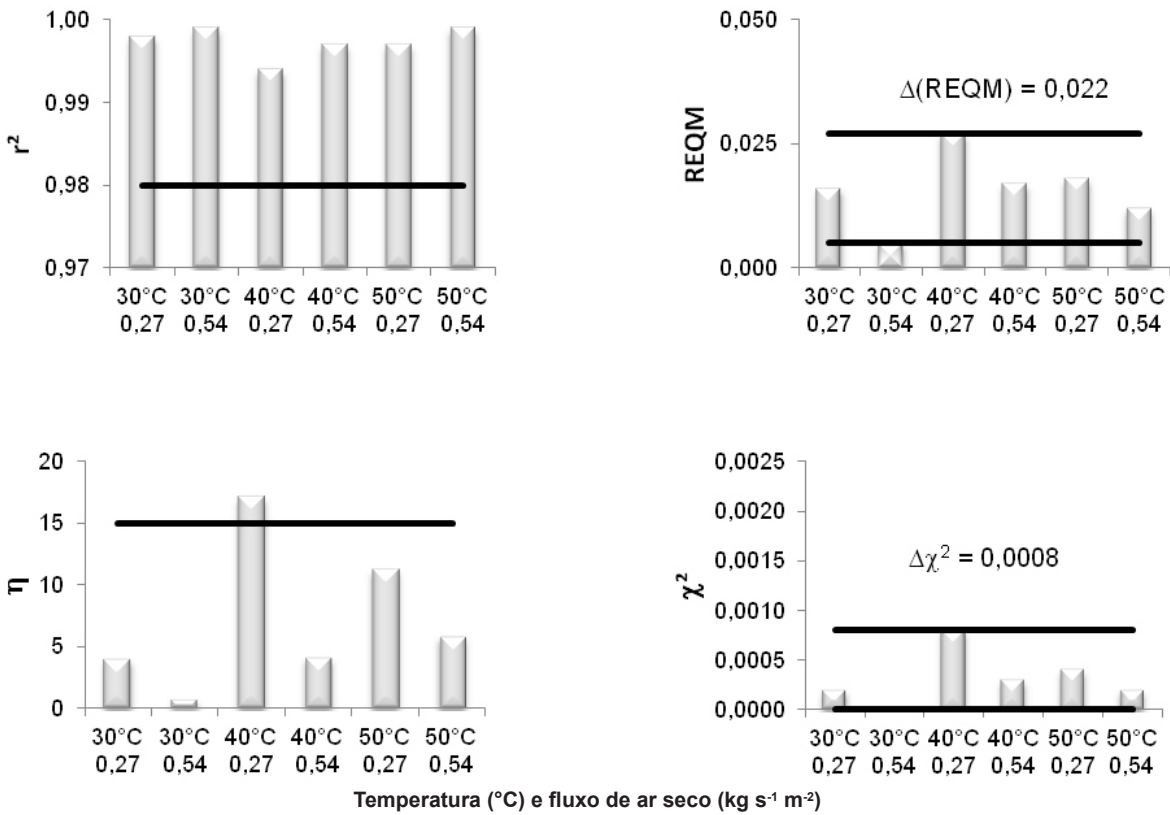


FIGURA 3. Desempenho do modelo de Page (modelo 2) na descrição da secagem de *P. brevipedunculata*, a 30, 40 e 50 °C e fluxo de ar seco de 0,27 e 0,54 kg s⁻¹ m⁻².

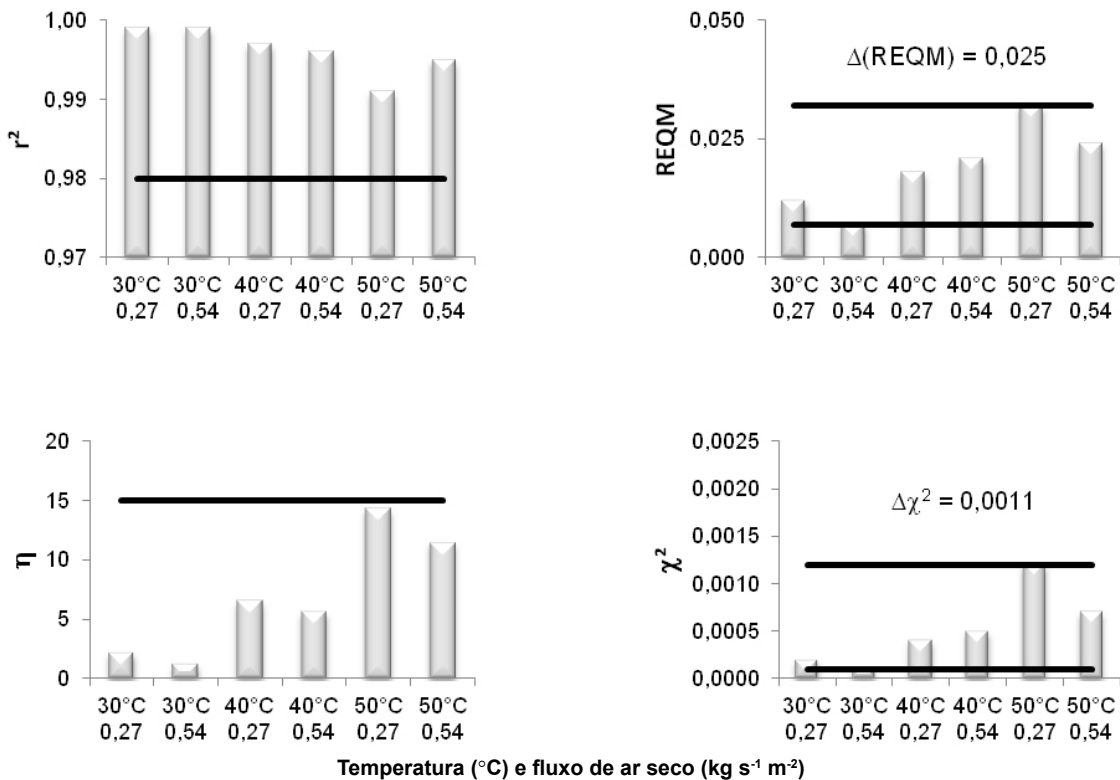


FIGURA 4. Desempenho do modelo 3 na descrição da secagem de *P. brevipedunculata*, a 30, 40 e 50 °C e fluxo de ar seco de 0,27 e 0,54 kg s⁻¹ m⁻².

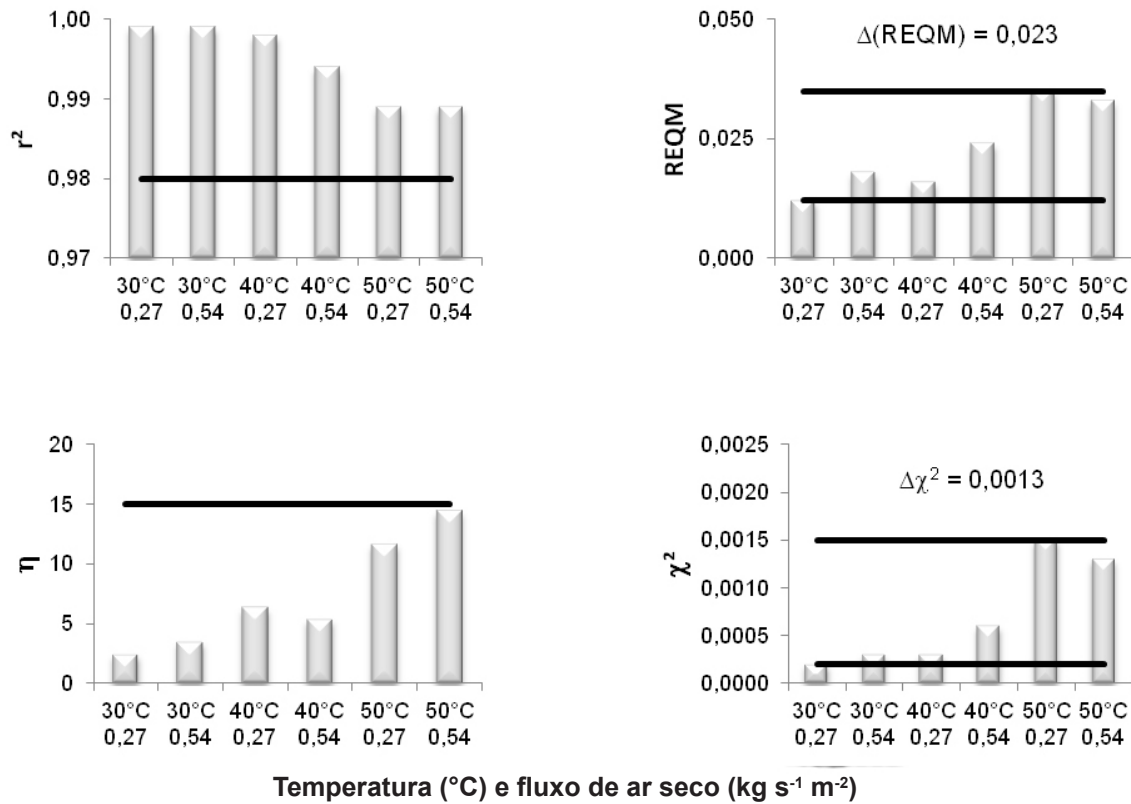


FIGURA 5. Desempenho do modelo 4 na descrição da secagem de *P. brevipedunculata*, a 30, 40 e 50 °C e fluxo de ar seco de 0,27 e 0,54 kg s⁻¹ m⁻².

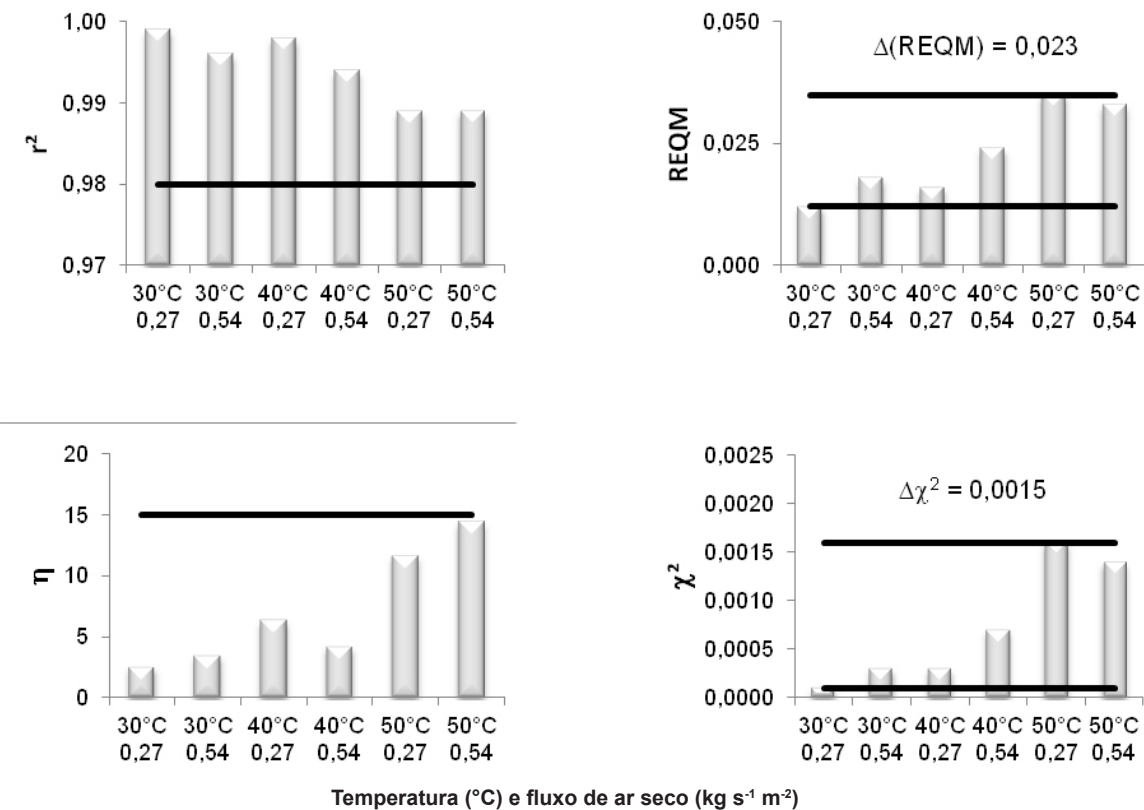


FIGURA 6. Desempenho do modelo 5 na descrição da secagem de *P. brevipedunculata*, a 30, 40 e 50°C e fluxo de ar seco de 0,27 e 0,54 kg s⁻¹ m⁻².

Unal, 2005; Doymaz et al., 2006; Goyal et al., 2006; Silva et al., 2008). No entanto, como demonstrou Willmott (1982), o uso exclusivo de r^2 como único parâmetro de avaliação de modelos matemáticos pode levar a falsas interpretações dos resultados.

Os valores de $\Delta(\text{REQM})$ variaram entre 0,022 e 0,030, intervalo semelhante ao obtido por diversos autores ao elegerem os melhores modelos de secagem (Togrul & Pehlivan, 2002; Demir et al., 2004; Doymaz, 2006; Silva et al., 2008). No presente trabalho, nenhum modelo poderia ser descartado *a priori* em função da magnitude do intervalo de variação da REQM. No entanto, quanto a proximidade do intervalo de variação $\Delta(\text{REQM})$ do valor zero, há um grupo de modelos com desempenho visivelmente superior (modelos 2, 3, 4 e 5) ao modelo de Lewis (modelo 1), como mostram as Figuras 2 a 6. Aliás, esse último modelo foi também o que teve o desempenho menos satisfatório pelo critério do r^2 .

Quanto ao valor limite imposto para o erro percentual absoluto médio η (15%), verifica-se que apenas os modelos 3, 4 e 5 atendem o critério para todas as condições de secagem avaliadas. Portanto, considerando-se os três parâmetros estatísticos avaliados até o momento, esses três modelos foram os que melhor se adequaram à descrição das curvas experimentais de secagem de *P. brevipedunculata*. Valores de η inferiores a 10% na escolha dos modelos mais satisfatórios na descrição das curvas de secagem de diversos produtos agrícolas foram relatados por Madamba et al. (1996), Sacilik & Unal (2005), Abalone et al. (2006) e Corrêa et al. (2007).

De acordo com Panchariya et al. (2002), o modelo mais acurado é também aquele que possui o chi-quadrado reduzido χ^2 mais próximo do valor zero. Para os modelos 3, 4 e 5 os valores do chi-quadrado reduzido, à exceção da secagem à 50°C, foram consistentemente inferiores a 0,0010. Além disso, esses modelos encontram-se entre aqueles que também apresentaram os menores valores de $\Delta(\chi^2)$, 0,0011 e 0,0015. Valores consideravelmente superiores aos encontrados no presente trabalho têm sido julgados satisfatórios por diversos pesquisadores na escolha dos melhores modelos de secagem de diversos produtos agrícolas (Yaldiz et al., 2001; Demir et al., 2004; Goyal et al., 2006; Zanoelo et al., 2007).

Entretanto, além da avaliação quantitativa dos diversos parâmetros estatísticos propostos, os modelos de secagem somente podem ser considerados satisfatórios se na descrição das curvas experimentais de secagem os resíduos obtidos deverem-se, exclusivamente, a erros aleatórios de medição das variáveis envolvidas. De acordo com Byler et al. (1987), se for observada qualquer relação funcional entre os resíduos

e os valores estimados da razão de umidade, ou com o tempo de secagem, pode-se inferir que o modelo é inapropriado, indicando que os parâmetros empregados no seu desenvolvimento são insuficientes para explicar a variação dos dados experimentais.

As dispersões dos resíduos em função do tempo de secagem e de valores estimados da razão de umidade, obtidas por meio do modelo 3, ou seja, modelo exponencial simples de três parâmetros, para todos os tratamentos avaliados, estão apresentadas nas Figuras 7 e 8, respectivamente. A análise dos dados apresentados na Figura 7 mostra um afunilamento dos valores dos resíduos entre os períodos inicial e final de secagem, ou seja, não houve uma distribuição ideal dos resíduos ao redor do valor zero. Quanto à dispersão dos resíduos em função do RU estimado, Figura 8, observa-se um maior grau de aleatoriedade em torno do valor zero, mostrando desempenho satisfatório do modelo na descrição do fenômeno estudado. Além disso, observa-se na Figura 9 que o modelo representa os valores experimentais com a devida acurácia, pois os resíduos estão distribuídos aleatoriamente ao redor da linha contínua que representa a correspondência ideal entre os valores experimentais e estimados de RU. As curvas de dispersão dos resíduos para os modelos 4 e 5, bem como os respectivos gráficos de correspondência, foram similares aos mostrados nas Figuras 7 a 9.

Portanto, dos cinco modelos avaliados, apenas os modelos 3, 4 e 5 podem ser considerados adequados na descrição da secagem de hastes, folhas e capítulos florais de *P. brevipedunculata*, podendo ser empregados com segurança em programas de simulação de secagem, bem como em projetos de secadores. No entanto, quando há diversos modelos, como no presente caso, que explicam com diferentes graus de complexidade, porém com a mesma acurácia, um determinado fenômeno, deve-se considerar o Princípio da Parcimônia (Lark, 2001). Sendo assim, o melhor modelo para descrever a secagem de *P. brevipedunculata*, dentre os modelos 3, 4 e 5, é aquele que contém em sua formulação o menor número de parâmetros, ou seja, o modelo 3 ou modelo exponencial simples de três parâmetros. Apresentam-se, na Tabela 3, os valores das constantes de secagem k e das constantes a e b , referentes ao modelo exponencial simples de três parâmetros para todos os tratamentos avaliados.

No presente trabalho, foram obtidos valores elevados do coeficiente de determinação para todos os modelos testados. Entretanto, o fato de dois modelos haverem sido considerados inadequados para a descrição acurada do processo de secagem de *P. brevipedunculata*, depois de seu desempenho ter sido também avaliado pelos demais parâmetros

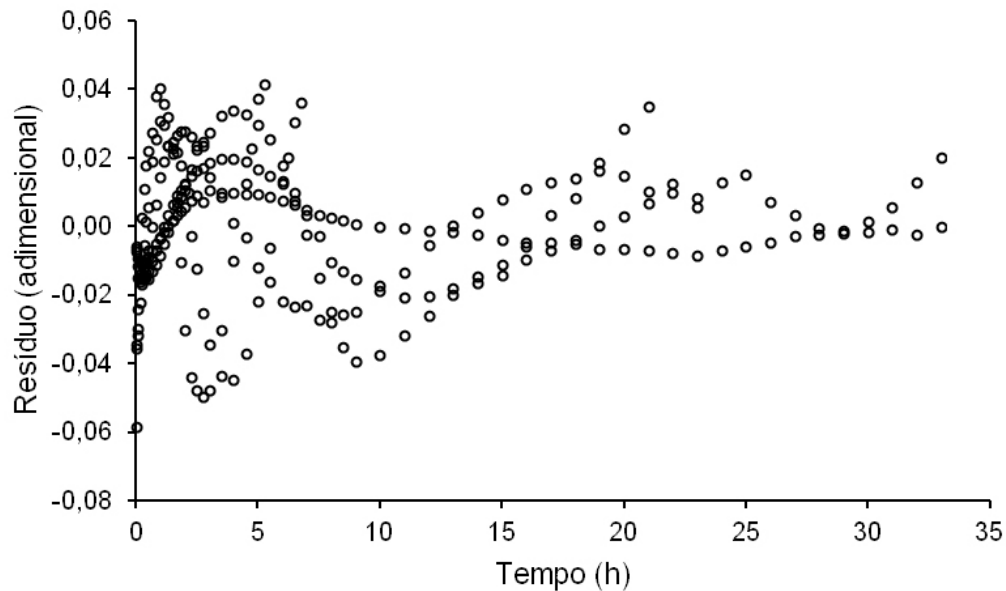


FIGURA 7. Dispersão dos resíduos em função do tempo, para o modelo exponencial simples de três parâmetros, na simulação de secagem de *P. brevipedunculata* por convecção, a 30, 40 e 50°C, e fluxo de ar seco de 0,27 e 0,54 kg s⁻¹ m⁻².

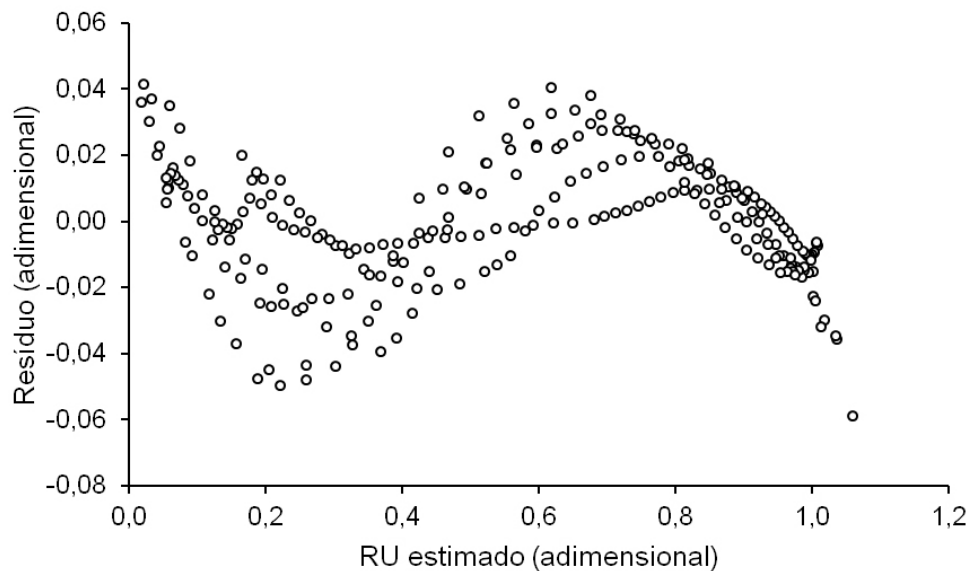


FIGURA 8. Dispersão dos resíduos em função da razão de umidade estimada, para o modelo exponencial simples de três parâmetros, na simulação de secagem de *P. brevipedunculata* por convecção, a 30, 40 e 50°C, e fluxo de ar seco de 0,27 e 0,54 kg s⁻¹ m⁻².

estatísticos, sugere que a utilização exclusiva do r^2 para a comparação desses modelos pode não ser um procedimento correto. Proposição similar foi feita por Chen & Wu (2001) e por Abalone et al. (2006). Além disso, diversos autores não consideram a dispersão dos resíduos na escolha de modelos matemáticos de secagem, o que pode reduzir a confiabilidade dos resultados apresentados (Ertekin & Yaldiz, 2004; Saciliki & Unal, 2005; Soysal et al., 2006; Kaya et al., 2007).

Apesar de o modelo de Lewis não ter sido

considerado um dos mais adequados na descrição da secagem de *P. brevipedunculata*, trata-se de um modelo que permite verificar se a temperatura é a variável com maior influência sobre a taxa de secagem. Para tanto, utilizou-se uma equação semelhante ao modelo de Arrhenius para explicitar a relação existente entre a constante de secagem k e a temperatura absoluta de secagem no decorrer do processo (Laws & Parry, 1983). Esse procedimento resultou nas Eqs. (1) e (2), para fluxos mássicos de ar seco de 0,27 e 0,54 kg s⁻¹ m⁻², com coeficientes

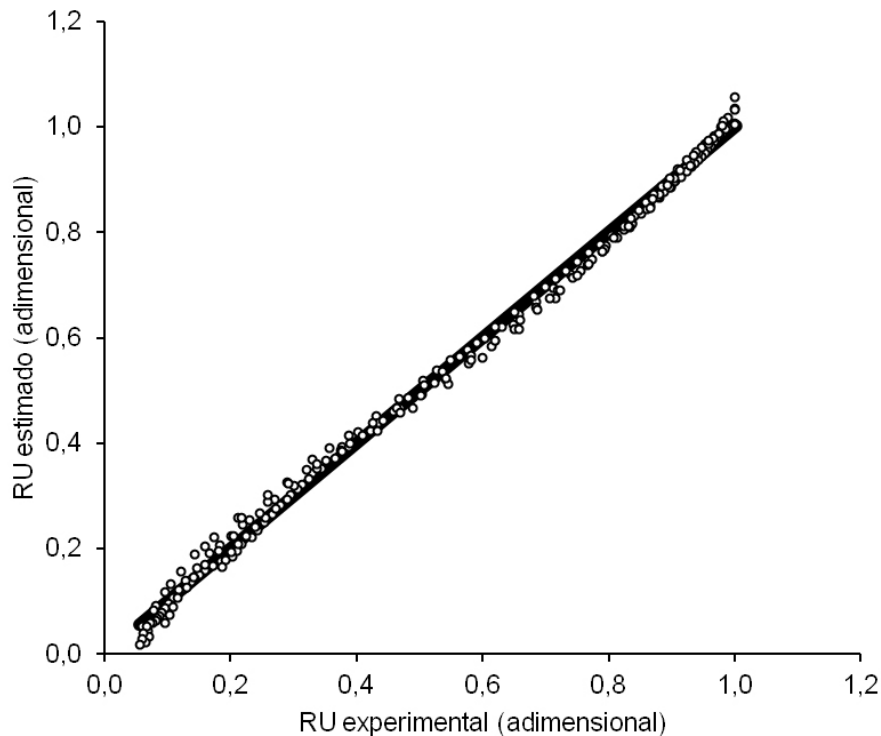


FIGURA 9. Gráfico de correspondência entre os valores experimentais e estimados de RU, para o modelo exponencial simples de três parâmetros, na simulação de secagem de *P. brevipedunculata* por convecção, a 30, 40 e 50°C, e fluxo de ar seco de 0,27 e 0,54 kg s⁻¹ m⁻².

TABELA 3. Valores estimados dos parâmetros do modelo exponencial simples de três parâmetros [RU = a exp(-kt) + b], considerado o mais adequado para representar as curvas de secagem em camada delgada de *P. brevipedunculata*, a 30, 40 e 50°C, fluxo de ar seco de 0,27 e 0,54 kg s⁻¹ m⁻², razão de mistura de 0,019 kg kg⁻¹ e teor de água inicial de 79,4 ± 2,2% b.u.

| Temperatura (°C) | Fluxo de ar seco (kg s ⁻¹ m ⁻²) | Parâmetros dos modelos | | |
|---------------------|---|------------------------|----------|---------|
| | | a | b | k |
| 30 | 0,27 | 0,94930 | 0,05789 | 0,07989 |
| | 0,54 | 1,26874 | -0,26232 | 0,03295 |
| 40 | 0,27 | 0,98833 | 0,04713 | 0,21371 |
| | 0,54 | 1,08194 | -0,07597 | 0,09859 |
| 50 | 0,27 | 1,11512 | -0,05655 | 0,50360 |
| | 0,54 | 1,14691 | -0,11243 | 0,32128 |

de determinação de 0,98 e 0,94, respectivamente, confirmando que a equação de Arrhenius é satisfatória na descrição da relação funcional entre k e T_{abs} . Esse resultado estabelece que a

temperatura é realmente o fator preponderante na secagem das partes aéreas de *P. brevipedunculata*, em comparação com outras variáveis, como o fluxo mássico de ar seco.

$$k = 7,4183^{10} \exp\left(-\frac{8312,98}{T_{\text{abs}}}\right) \quad (1)$$

$$k = 1,3731^{10} \exp\left(-\frac{7886,99}{T_{\text{abs}}}\right) \quad (2)$$

CONCLUSÃO

Dos cinco modelos de secagem avaliados, três deles (exponencial simples de três parâmetros, exponencial duplo de quatro parâmetros e exponencial triplo de seis parâmetros), descrevem com grau de acurácia similar a secagem das partes aéreas de *Pectis brevipedunculata*. No entanto, o modelo considerado mais adequado para representar a variação da razão de umidade em função do tempo de secagem, considerando o princípio da parcimônia, foi o modelo exponencial simples de três parâmetros. Embora o modelo de Lewis não tenha sido considerado adequado na descrição das curvas de secagem, observou-se que a equação de Arrhenius representa a relação funcional entre a constante de secagem k e a temperatura absoluta do ar de secagem.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem o apoio financeiro oferecido pelas seguintes instituições: CAPES, CNPq, FAPERJ, FINEP e IFS (*International Foundation for Science*).

REFERÊNCIA

- ABALONE, R. et al. Thin layer drying of amaranth seeds. **Biosystems Engineering**, v.93, n.2, p.179-88, 2006.
- AGRA, M.F. et al. Medicinal and poisonous diversity of the flora of “Cariri Paraibano”, Brazil. **Journal of Ethnopharmacology**, v.111, n.2, p.383-95, 2007.
- ASABE. Moisture Measurement – Forages: Standard S358.2 DEC1988, R2008. In: AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS (Ed.). **Standards, Engineering Practices, and Data**. St. Joseph: ASABE, 2010. p.684-5.
- AZEVEDO, C.S. **Anatomia e ultra-estrutura foliar de *Pectis brevipedunculata***: ontogenia de cavidades secretoras e estrutura Kranz. 2007. 45p. Dissertação (Mestrado – Área de concentração em Botânica) – Departamento de Biologia Vegetal, Universidade Federal de Viçosa.
- BLASCO, M. et al. Effect of blanching and air flow rate on turmeric drying. **Food Science and Technology International**, v.12, n.4, p.315-23, 2006.
- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grain and oilseeds**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.450p.
- BYLER R.K.; ANDERSON, C.R.; BROOK, R.C. Statistical methods in thin layer parboiled rice drying models. **Transactions of the ASAE**, v.30, n.2, p.533-38, 1987.
- CHEN, C.; WU, P. Thin-Layer drying model for rough rice with high moisture content. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.80, n.1, p.45-52, 2001.
- CORRÊA, P.C. et al. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. **Engenharia na Agricultura**, v.27, n.2, p.501-10, 2007.
- DEMIR, V. et al. Mathematical modelling and the determination of some quality parameters of air-dried bay leaves. **Biosystems Engineering**, v.88, n.3, p.325-35, 2004.
- DOYMAZ, I. Thin-layer drying behavior of mint leaves. **Journal of Food Engineering**, v.74, n.3, p.370-75, 2006.
- DOYMAZ, I.; TUGRUL, N.; PALA, M. Drying characteristics of dill and parsley leaves. **Journal of Food Engineering**, v.77, n.3, p.559-65, 2006.
- ERTEKIN, C.; YALDIZ, O. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. **Journal of Food Engineering**, v.63, n.3, p.349-59, 2004.
- GOYAL, R.K. et al. Thin-layer drying kinetics of raw mango slices. **Biosystems Engineering**, v.95, n.1, p.43-9, 2006.
- GUNHAN, T. Mathematical modelling of drying of bay leaves. **Energy Conversion and Management**, v.46, n.11-12, p.1667-79, 2005.
- KAYA A.; AYDIN, O.; DEMIRTA^a, C. Drying kinetics of Red Delicious apple. **Biosystems Engineering**, v.96, n.4, p.517-24, 2007.
- KARATHANOS, V.T. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. **Journal of Food Engineering**, v.39, n.4, p.337-44, 1999.
- LARK, R.M. Some tools for parsimonious modelling and interpretation of within-field variation of soil and crop systems. **Soil & Tillage Research**, v.58, n.3-4, p.99-111, 2001.
- LAWS, N.; PARRY, J.L. Mathematical modeling of heat and mass transfer in agricultural grain drying. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences**, v.385, n.1788, p.169-87, 1983.
- LEWIS, W.K. The rate of drying of solid materials. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v.13, n.5, p.427-32, 1921.
- MADAMBA, S.P.; DRISCOLL, H.R.; BUCKLE, K.A. The thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v.29, n.1, p.75-97, 1996.
- MARTINAZZO, A.P. Modelagem matemática e parâmetros qualitativos da secagem de folhas de capim-limão [*Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf]. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v.12, n.4, p.488-98, 2010.
- OLIVEIRA, M.T.R.; BERBERT, P.A.; MARTINAZZO, A.P.; BERBERT MOLINA, M.A. Drying kinetics of lemon scented grass. *Transactions of the ASABE*, v.54, n.5, p.1837-1846, 2011.
- PAGE, G.E. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers**. 1949. Unpublished M.S. Thesis, Purdue University, West Lafayette.
- PANCHARIYA, P.C.; POPOVIC, D.; SHARMA A.L. Thin-layer modelling of black tea drying process. **Journal of Food Engineering**, v.52, n.4, p.349-57, 2002.
- PARRY, J.L. Mathematical modeling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying: A Review. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.32, n.1, p.1-29, 1985.
- RADÜNZ, L.L. et al. Study of the essential oil from guaco leaves submitted to different drying air temperatures. **Engenharia na Agricultura**, v.18, n.3, p.241-47, 2010.
- RASKIN, I. et al. Plants and human health in the twenty-first century. **Trends in Biotechnology**, v.20, n.12, p.522-31, 2002.
- SACILIK, K.; UNAL, G. Dehydration characteristics of Kastamonu garlic slices. **Biosystems Engineering**, v.92, n.2, p.207-15, 2005.

SHARMA, A.D.; KUNZE, O.R.; TOLLEY, H.D. Rough rice drying as a two-compartment model. **Transactions of the ASAE**, v.25, n.1, p.221-24, 1982.

SILVA, A.S. et al. Drying kinetics of coriander (*Coriandrum sativum*) leaf and stem. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.6, n.1, p.13-9, 2008.

SOYSAL, Y.; ÖZTEKIN, S.; EREN, Ö. Microwave drying of parsley: Modelling, kinetics, and energy aspects. **Biosystems Engineering**, v.93, n.4, p.403-13, 2006.

STATSOFT. **Statistica**: System reference. Tulsa: StataSoft, Inc., 2001. 1098p.

TOGRUL, I.T.; PEHLIVAN, D. Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. **Journal of Food Engineering**, v.55, n.3, p.209-16, 2002.

WILHELM, L.R. Numerical calculation of psychrometric properties in SI units. **Transactions of the ASAE**, v.19,

n.2, p.318-21, 25, 1976.

WILLMOTT, C.J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.63, n.11, p.1309-13, 1982.

YAGCIOGLU, A.; DEGIRMENCIOGLU, A.; CAGATAY, F. Drying characteristics of laurel leaves under different conditions. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON AGRICULTURAL MECHANIZATION AND ENERGY, 7., 1999, Adana. **Proceedings...** Adana: Çukurova University, 1999. p.26-7.

YALDIZ, O.; ERTEKIN, C.; UZUN, H.I. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. **Energy**, v.26, n.5, p.457-65, 2001.

ZANOELO, E.F.; di CELSO, G.M.; KASKANTZIS, G. Drying kinetics of mate leaves in a packed bed dryer. **Biosystems Engineering**, v.96, n.4, p.487-94, 2007.