



Avaliação da cinética de secagem de caju mediante um planejamento experimental



Josivanda P. G. de Gouveia¹, Rodrigo S. F. de Moura², Francisco de A. C. Almeida¹,
Alexsandra M. de V. Oliveira³ & Manassés M. da Silva⁴

¹ DEAg/CCT/UFCG. Av. Aprígio Veloso 882, Bodocongó, CEP 58109-970, Campina Grande, PB. Fone: (83) 310-1287. E-mail: josi@deag.ufpb.br (Foto) e diassis@deag.ufpb.br

² Aluno de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola - CCT/UFCG

³ DEQ/CCT/UFCG. E-mail: alexsandrameira@deq.ufpb.br

⁴ DEAg/CCT/UFCG. E-mail: manasses.m.s@bol.com.br

Protocolo 33 - 21/3/2001

Resumo: Objetivou-se, com este estudo, avaliar a cinética de secagem de caju em um secador de leito fixo, utilizando-se um planejamento experimental. A temperatura, variando de 35 a 65 °C e a velocidade do ar de 0,9 a 1,9 m s⁻¹, formaram as variáveis do processo. Os pseudofrutos foram fatiados em pedaços circulares de aproximadamente 0,5 cm de espessura. Mediante análise de regressão, verificou-se efeito significativo da temperatura sobre a redução da razão de umidade do caju e, ainda, que o modelo quadrático foi o que melhor representou os dados experimentais, sendo a temperatura o fator controlador do processo.

Palavras-chave: *Anacardium occidentale* L., secador, planejamento fatorial

Evaluation of kinetics of cashew drying by an experimental planning

Abstract: The objective of the present study was to evaluate the kinetics of cashew drying in a fixed bed dryer, using a planned experiment. The temperature varied from 35 to 65 °C and air speed from 0.9 to 1.9 m s⁻¹, forming the variables of the process. The cashew fruits were sliced in circular pieces of approximately 0.5 cm of thickness. By regression analysis, significant effect of the temperature was verified on the reduction of the moisture ratio of cashew and that the quadratic model was the one that best represented the experimental data, temperature being the controlling factor of the process.

Key words: *Anacardium occidentale* L., experimental factorial, dryer

INTRODUÇÃO

O cajueiro (*Anacardium occidentale* L.) pertencente à família *Anacardiaceae*, destaca-se entre as plantas frutíferas tropicais, em face da crescente comercialização do fruto conhecido por castanha de caju e do pseudofruto, que é o pedúnculo hipertrofiado e carnoso - o hipocarpio, geralmente chamado apenas caju, cuja casca é muito frágil, o que dificulta o seu transporte das áreas de produção aos mercados de consumo ou à indústria. Além de frágil, este produto é altamente perecível, apresentando mecanismos aceleradores de degradação microbiológica contribuindo, assim, para a rejeição ou perda de centenas de milhares de toneladas do produto (Cruz, 1989).

Na conservação de alimentos, a desidratação ou secagem é apontada como um dos procedimentos mais importantes para a diminuição da atividade de água (a_w) favorecendo o transporte e a manipulação do produto, além de prolongar sua vida de prateleira (Gabas, 1998).

Existem métodos empíricos, teóricos e semiteóricos para se descrever matematicamente o processo de secagem. O método empírico é utilizado para análise de secagem usando-se dados experimentais, que podem ser determinados em laboratório e na utilização da análise adimensional; geralmente, este método se baseia nas condições externas de secagem, não fornecendo indicações sobre o transporte de energia e massa no interior do produto, muito embora forneça informações práticas para elaboração de projetos (Fortes & Okos, 1980).

Krokida et al. (2000) verificaram, para maçãs, que a cinética de secagem foi grandemente afetada pelo tamanho das amostras e pela temperatura do ar de secagem. Um modelo empírico de transferência de massa envolvendo uma ampla escala de dimensões das amostras e condições do ar de secagem (temperatura, umidade relativa e velocidade superficial) para maçã, pêra, kiwi e banana, foi estudado por Kiranoudis et al. (1997) que estabeleceram a constante de secagem como uma função das variáveis do processo e verificaram, também, que os parâmetros

do modelo considerado foram muito afetados pelas dimensões das amostras e pela temperatura do ar de secagem.

A importância das variáveis em um processo pode ser determinada por meio da adoção de um método de planejamento experimental, o qual possibilita o planejamento e a execução de forma organizada, com um número reduzido de ensaios ao mínimo necessário. Este método permite, ainda, a verificação dos efeitos individuais e de interação de todas as variáveis sobre a resposta, a definição das variáveis mais importantes para o processo, a avaliação dos erros experimentais e de regressão e a modelagem empírica dos resultados, em função das variáveis escolhidas, usando-se programas estatísticos de regressão.

Diversos são os planejamentos que podem ser usados para montar a série de experimentos adicionais. Box & Wilson (1951) criaram o chamado Planejamento Composto Central, também denominado configuração estrela. Tal planejamento consiste de um fatorial 2^k , com três repetições no ponto central e dois pontos sobre o eixo de cada variável, a uma distância $\pm \alpha$ do ponto central.

Sendo o planejamento experimental um método baseado e executado com técnicas estatísticas, é de fundamental importância a avaliação dos modelos empíricos, obtidos por meio de regressão dos dados experimentais, mediante uma análise estatística, utilizando-se o coeficiente de determinação (R^2) e o valor estimado para o teste F. Para a regressão não ser apenas estatisticamente significativa, mas útil para fins preditivos, o valor de $F_{\text{calculado}}$ deve ser no mínimo quatro a cinco vezes o valor de F_{tabelado} (Barros Neto et al., 1995).

Gouveia et al. (1999) utilizaram o planejamento experimental na avaliação da cinética de secagem de gengibre, para a identificação dos efeitos da temperatura e velocidade do ar de secagem e verificaram que a temperatura foi o fator que exerceu maior influência no processo e, ainda, que o modelo de segunda ordem fornecido pelo planejamento, foi o melhor para representar a cinética de secagem desse produto.

O presente trabalho foi desenvolvido visando à utilização do planejamento experimental no estudo da cinética de secagem para camadas finas, em intervalos de temperatura e velocidade do ar variando de 35 a 65 °C e 0,9 a 1,9 m s⁻¹, respectivamente.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Processos Químicos do Departamento de Engenharia Química, em conjunto com o Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas, ambos pertencentes ao Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande, utilizando-se pseudofrutos do cajueiro - o caju, da variedade vermelha.

A secagem foi realizada em camada fina, em um secador de leito fixo (Fig. 1) em que o caju foi cortado em fatias circulares de aproximadamente 0,5 cm de espessura e as amostras foram colocadas em uma cesta de material metálico, em tela de arame de malha fina. O conjunto (cesta + amostra) foi pesado manualmente e colocado na câmara de secagem, procedendo-se ao início da operação. O teor de umidade perdido durante o processo foi obtido por pesagens descontínuas das amostras

e o esquema de pesagem seguiu intervalos de 5, 10, 30 e 60 min, até o final do processo. As pesagens foram realizadas até que as variações de massa fossem insignificantes e, depois, as amostras foram colocadas em estufa, a uma temperatura de 65 °C por 24 h, para determinação da matéria seca.

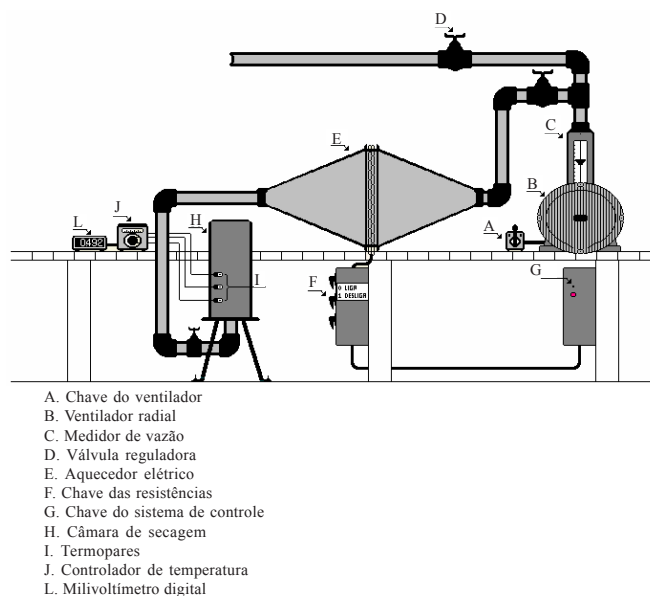


Figura 1. Secador de leito fixo

Definiu-se a temperatura e a velocidade do ar como as variáveis do processo de secagem, estudando-as em dois níveis, codificados como -1 e +1; os valores reais correspondentes a esses níveis, foram: 40 °C (-1) e 60 °C (+1) para a temperatura e 1,0 m s⁻¹ (-1) e 1,8 m s⁻¹ (+1) para a velocidade. O número de experimentos foi 2^n (n é o número de variáveis) com três repetições no ponto central.

Ampliaram-se as faixas de variação no estudo das variáveis observadas, realizando-se um planejamento fatorial $2^2 +$ configuração estrela com deslocamento axial (níveis $-\alpha$ e $+\alpha$) a fim de se obter modelos matemáticos empíricos de primeira e segunda ordem, modelo linear e quadrático, respectivamente.

No deslocamento axial utilizou-se a equação desenvolvida por Box & Wilson (1951):

$$\alpha = (2^k)^{1/4} \quad (1)$$

em que:

$$k - \text{número de variáveis independentes (2); logo: } \alpha = \pm \sqrt{2}.$$

Os valores reais e codificados dos níveis dos fatores estudados no planejamento fatorial completo e a matriz do planejamento dos experimentos estão contidos na Tabela 1.

Os dados experimentais foram expressos na forma de razão de umidade (RU):

$$RU = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} \quad (2)$$

em que:

X - umidade “absoluta”, base seca (bs)

Tabela 1. Matriz do planejamento dos experimentos, em sua forma codificada e real

Ensaio	Temperatura		Velocidade do Ar	
	Codificada	Real (°C)	Codificada	Real (m s ⁻¹)
1	-1	40	-1	1,0
2	+1	60	-1	1,0
3	-1	40	+1	1,8
4	+1	60	+1	1,8
5	0	50	0	1,4
6	0	50	0	1,4
7	0	50	0	1,4
8	$-\sqrt{2}$	35	0	1,4
9	0	50	$+\sqrt{2}$	1,9
10	$+\sqrt{2}$	65	0	1,4
11	0	50	$-\sqrt{2}$	0,9

X_e - umidade de equilíbrio, bs

X_o - umidade inicial, bs

Os dados de razão de umidade (RU) foram submetidos à análise de regressão usando-se o programa computacional Statistica versão 5.0, a fim de se obter os efeitos principais das variáveis estudadas, bem como a análise de variância para a verificação dos modelos empíricos (linear e quadrático) obtidos a partir do planejamento experimental. Utilizou-se o coeficiente de determinação (R^2) e o teste F, como parâmetros de escolha do melhor modelo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de regressão dos dados experimentais mostrou efeito significativo da temperatura sobre a redução da razão de umidade do caju (Tabela 2). Observa-se, mediante a referida tabela, que esses efeitos são crescentes até o tempo de 1,5 h, indicando que, neste período de secagem, a mudança do nível -1 (40 °C) para o nível +1 (60 °C) ocasiona uma redução de 0,238 RU no teor de umidade do caju. Este efeito negativo, ocasionado pela mudança do nível inferior para o nível superior de temperatura, resultando na redução do teor de umidade do produto, ocorre devido ao efeito significativo da temperatura sobre o processo de secagem. Para a faixa de velocidade do ar de secagem estudada (0,9 a 1,9 m s⁻¹) não se observou efeito significativo sobre o processo.

A cinética de secagem do caju (para as temperaturas mais baixas e a mais elevada - consideradas no estudo) é apresentada na forma de RU (Eq. 2) em função do tempo (Fig. 2) onde

Tabela 2. Valores de razão de umidade (RU) de polpa do caju em diferentes períodos de secagem

Período (h)	RU
0,25	-0,105
0,50	-0,154
1,00	-0,209
1,50	-0,238
2,00	-0,235
3,00	-0,185
4,00	-0,121
5,00	-0,078

verifica-se diminuição no tempo gasto para secar o caju, em função da elevação da temperatura, ou seja, a maior taxa de secagem é obtida na temperatura mais elevada. Observa-se, também, que o tempo gasto (12 h) para secar o caju a temperaturas mais baixas (35 e 40 °C) é o dobro do tempo despendido para secá-lo a temperatura mais elevada (65 °C).

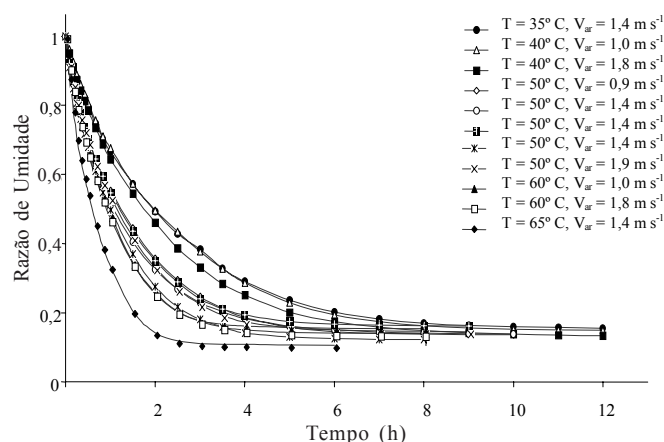


Figura 2. Cinética de secagem do caju para diferentes temperaturas e velocidades do ar de secagem

Mediante a exposição desses dados, verifica-se que a temperatura é o principal fator que afeta o processo de secagem, cujos resultados se encontram respaldados por vários pesquisadores, que consideram a temperatura do ar de secagem como o parâmetro que exerce maior influência na cinética de secagem de alimentos, dentre eles, Yoshida (1997), Prado (1998) e Gouveia et al. (1999) que trabalharam com secagem de milho superdoce, tâmaras e gengibre, respectivamente. Kiranoudis et al. (1997) investigaram uma ampla escala de dimensões das amostras e condições do ar (temperatura, umidade e velocidade superficial) na cinética de secagem de maçã, pêra, kiwi e banana, e verificaram que os parâmetros do modelo considerado foram por demais afetados pelas dimensões das amostras e pela temperatura do ar de secagem; igualmente, Krokida et al. (2000) chegaram à mesma conclusão em estudo realizado com maçã.

Verifica-se, conforme os dados contidos na Tabela 3, que o modelo de segunda ordem apresenta maior coeficiente de determinação (R^2) em relação ao modelo de primeira ordem, e que a relação entre $F_{\text{calculado}}$ e F_{tabelado} (ao nível de 95% de confiança) é de 5,40 para o modelo de primeira ordem e de 18,69 para o modelo de segunda ordem. Este modelo apresentou maior valor de R^2 para os demais tempos de secagem e relação $F_{\text{calculado}}/F_{\text{tabelado}}$ variando de 6,04 a 19,83, enquanto para o outro modelo esta relação foi de 0,27 a 5,40. O teste F confirma a escolha do modelo de segunda ordem para representar a cinética de secagem do caju, uma vez que $F_{\text{calculado}}$ foi superior a seis vezes o valor de F_{tabelado} , podendo ser utilizado para fins preditivos (Barros Neto et al., 1995). Na Tabela 4 encontram-se os modelos empíricos de segunda ordem ajustados para cada tempo de secagem, verificando-se que os parâmetros destacados foram aqueles estatisticamente significativos. Esses resultados se respaldam em Gouveia et al. (1999) que utilizaram o planejamento experimental na avaliação da cinética de secagem de gengibre.

Tabela 3. Resultados da ANOVA para a cinética de secagem no tempo 1,5 h

Fonte de Variação	Grau de Liberdade		Soma dos Quadrados		Média da Soma dos Quadrados		Teste F	
	1ª Ordem	2ª Ordem	1ª Ordem	2ª Ordem	1ª Ordem	2ª Ordem	1ª Ordem	2ª Ordem
Devido a regressão	1	1	0,0466	0,1132	0,0466	0,1132	35,68	95,67
Resíduos	5	9	0,0065	0,0106	0,0013	0,0012		
Falta de ajuste	3	7	0,0043	0,0084	0,0014	0,0012		
Erro puro	2	2	0,0023	0,0023	0,0011	0,0011		
Total	6	10	0,0531	0,1238				
R ²	0,88	0,91						
F _{tabelado}							6,61	5,12
F _{tab} /F _{calc}							5,40	18,69

Tabela 4. Modelos ajustados para cada tempo de secagem das amostras de caju em função da temperatura e velocidade do ar

Tempo (h)	Modelo*
0,25	$RU = 0,817 - 0,052 T + 0,002 T^2 - 0,004 V + 0,013 V^2 + 0,004 TV$
0,50	$RU = 0,701 - 0,077 T + 0,003 T^2 - 0,006 V + 0,017 V^2 + 0,004 TV$
1,00	$RU = 0,538 - 0,104 T + 0,002 T^2 - 0,009 V + 0,024 V^2 + 0,005 TV$
1,50	$RU = 0,423 - 0,119 T + 0,003 T^2 - 0,008 V + 0,024 V^2 + 0,006 TV$
2,00	$RU = 0,340 - 0,118 T + 0,009 T^2 - 0,010 V + 0,022 V^2 + 0,008 TV$
3,00	$RU = 0,243 - 0,093 T + 0,021 T^2 - 0,010 V + 0,015 V^2 + 0,011 TV$
4,00	$RU = 0,194 - 0,060 T + 0,019 T^2 - 0,008 V + 0,009 V^2 + 0,006 TV$
5,00	$RU = 0,169 - 0,039 T + 0,013 T^2 - 0,006 V + 0,006 V^2 + 0,004 TV$

*Ru = (X-Xe)/(Xo-Xe), T – Temperatura (°C), V – Velocidade do ar (m s⁻¹)

CONCLUSÕES

- Os resultados obtidos no planejamento experimental mostraram efeitos significativos para a temperatura do ar de secagem, sobre a perda do teor de umidade do caju.
- O modelo empírico de segunda ordem é o que melhor representa a cinética de secagem de caju, podendo ser utilizado para fins preditivos.
- A temperatura é o fator controlador do processo.

LITERATURA CITADA

- Barros Neto, B. de; Scarminio, I.S.; Bruns, R.E. Planejamento e otimização de experimentos. Campinas: Editora da UNICAMP, 1995. 299p.
- Box, G.E.P.; Wilson, K.B. On the experimental attainment of optimum conditions. Journal Royal Statistics Society, New York, B13, 1951. 38p.
- Cruz, V.M.F. da. Secagem de produtos agrícolas: obtenção de fruta-passa a partir do pseudofruto do cajueiro (*Anacardium occidentale*, L.). Natal: UFRN, 1989. 101p. Dissertação Mestrado
- Fortes, M.; Okos, M.R. Drying theories; their bases and limitations as applied to foods and grains. In: Mujundar, A.S., (ed.). Advances in drying. New York: Science Press, 1980. p.153-162.
- Gabas, A.L. Secagem de uva Itália em leito fixo. Campinas: UNICAMP, 1998. 135p. Dissertação Mestrado
- Gouveia, J.P.G. de; Almeida, F. de A.C.; Silva, F.L.H. da; Murr, F.E.X. Estudo da cinética de secagem de gengibre em um secador de leito fixo. Revista Brasileira de Armazenamento, Viçosa, v.24, n.2, p.20-27, 1999.
- Kiranoudis, C.T.; Tsami, E.; Maroulis, Z.B.; Marinos-Kouris, D. Drying kinetics of some fruits. Drying Technology, New York, v.15, n.5, p.1399-1418, 1997.
- Krokida, M.K.; Kiranoudis, C.T.; Maroulis, Z.B.; Marinos-Kouris, D. Drying related properties of apple. Drying Technology, New York, v.18, n.6, p.1251-1267, 2000.
- Prado, M.E.T. Secagem de tâmaras (*Phoenix dactylifera* L.) para a obtenção de tâmara passa. Campinas: UNICAMP, 1998. 149p. Tese Doutorado
- Yoshida, C.M.P. Cinética de secagem do milho super doce. Campinas: UNICAMP, 1997. 149p. Dissertação Mestrado