

## **CINÉTICA DE SECAGEM E MODELAGEM MATEMÁTICA DO FRUTO DE BURITI (*Mauritia flexuosa*)**

E. V. dos ANJOS<sup>1</sup>, J. A. da SILVA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade do Estado do Amapá, Colegiado de Engenharia Química

<sup>2</sup> Universidade do Estado do Amapá, Colegiado de Engenharia Química

E-mail para contato: endersonengenheirodemolay@gmail.com

**RESUMO** – O buriti é um fruto característico da região Amazônica muito utilizado em alimentos, cosméticos, fármacos, antioxidante e, recentemente, como biodiesel, sendo a secagem uma operação unitária necessária para a retirada da água e consequente uso da polpa desta matéria-prima. O objetivo deste trabalho é determinar a cinética de secagem da polpa do fruto de buriti através de modelos matemáticos empíricos e semiteóricos de secagem. O experimento foi realizado de acordo com o método 930.15 da AOAC de 1997. A secagem foi feita nas temperaturas de 80, 90 e 105°C em estufa. O modelo de difusão líquida usado foi da forma geométrica de placa plana. Os dados obtidos foram manipulados no software Statistica 7.0. A taxa de secagem foi diretamente proporcional à temperatura e diminuiu ao longo do tempo. O método que apresentou os melhores resultados foi o de Midilli e os menores foi o de Wang e Sing. A geometria do tipo placa plana proporcionou resultados satisfatórios para a cinética de secagem.

### **1. INTRODUÇÃO**

Segundo Ferreira (2005), o buriti (*Mauritia flexuosa*), também chamado de miriti, muriti, muritim, coqueiro-buriti, palmeira-do-brejo, carandá-guaçu e carnadaí-guaçu, é uma palmeira da família *Arecaceae*, de origem Amazônica, que se localiza em terrenos alagados, às margens de rios e igarapés, e úmidos da região Norte, Nordeste e Centro-Oeste do país.

Para Pinto *et al.* (2012), o buriti é muito utilizado na culinária, como geleia, sorvetes, cremes, doces e óleo comestível. Aquino *et al.* (2012) cita que o óleo de buriti é usado como antioxidante, em alimentos, cosméticos, fármacos, materiais poliméricos e biodiesel.

Costa (2007) afirma que a secagem é uma das operações industriais mais empregadas na prática, podendo ser usada para o acabamento final ou equilíbrio da umidade de materiais processados com o ar ambiente, como a madeira e seus derivados, borrachas, couros, plásticos, celulose e seus derivados, etc.; e para melhor conservação, como em cereais, alimentos e materiais perecíveis. A secagem também é utilizada nas indústrias farmacêuticas.

De acordo com Meneghetti *et al.* (2011), a secagem garante a qualidade e estabilidade do material, pois reduz a quantidade de água, a atividade biológica e as alterações físico-químicas que ocorrem no armazenamento.

Haghi e Amanifard (2008) falam que a secagem envolve simultaneamente a transferência de calor, massa e quantidade de movimento.

A cinética de secagem pode ser avaliada por modelos empíricos, teóricos e semiteóricos.

Segundo Martinazzo *et al.* (2007), o método empírico está baseado em dados experimentais e análise dimensional, relacionando a umidade e o tempo de secagem, porém não considera os fundamentos do processo e seus parâmetros não possuem significado físico.

Para Souza *et al.* (2011), nos métodos teóricos normalmente se consideram as condições externas sob as quais a operação ocorre, como também os mecanismos internos de transferência de energia e massa e seus efeitos.

De acordo com Martinazzo *et al.* (2007), existem também os modelos semiteóricos, em que há a harmonia entre a teoria e a facilidade de uso, fundamentados na Lei de Newton de resfriamento aplicada a transferência de massa.

O objetivo deste trabalho é determinar a cinética de secagem do fruto de buriti, através da modelagem matemática, a partir de alguns modelos empíricos e semiteóricos de secagem.

## 2. MATERIAS E MÉTODOS

Os frutos de buriti foram obtidos no município de Afuá-PA. Os testes foram feitos no laboratório de química orgânica, da Universidade do Estado do Amapá (UEAP).

A metodologia usada neste trabalho foi adaptada da norma 930.15 da AOAC de 1997.

Inicialmente, os frutos do buriti foram imersos em banho quente, a temperatura de 80°C, durante o período de 15 horas, para o amolecimento da casca da matéria-prima. Depois, foi realizado o descascamento e despulpamento manual dos frutos.

A polpa foi armazenada em um dessecador por duas horas, a fim de evitar o contato com a umidade externa. O material foi dividido em três grupos (A, B e C), cada um com 5 g, e levado para a secagem na estufa.

Foram utilizadas três temperaturas (80, 90 e 105°C) para cada secagem, totalizando 9 testes. As amostras foram submetidas a pesagens em tempos de 10, 15, 30, 60 e 120 minutos. O teste ocorreu até que as massas das amostras fossem constantes.

A umidade de equilíbrio do produto foi obtida pelo método padrão da estufa, a  $105 \pm 3^\circ\text{C}$ , por 24 horas.

As curvas foram construídas a partir dos dados de pesagem obtidos dos testes. As razões de umidade foram calculadas através da Equação 1.

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} \quad (1)$$

Sendo RU (adimensional) a razão de umidade, U a umidade do produto b. s. (base seca),  $U_i$  a umidade inicial no produto b.s. e  $U_e$  a umidade de equilíbrio no produto b.s.

Os modelos matemáticos foram ajustados aos dados experimentais da secagem, frequentemente utilizados para representar a cinética de secagem de produtos agrícolas. O ajuste dos modelos ocorreu através da análise de regressão não-linear, pelo método Gauss-Newton, por meio do software *Statística 7.0*.

Para avaliação da qualidade dos ajustes dos modelos aos dados experimentais, foram utilizados o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o erro médio relativo (P), e o erro médio estimado ou desvio-padrão da estimativa (SE), como visto na Equação 2 e na Equação 3.

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - Y_o|}{Y} \quad (2)$$

$$SE = \sqrt{\sum \frac{(Y - Y_o)^2}{GLR}} \quad (3)$$

Sendo Y o valor de RU experimental,  $Y_o$  o valor de RU estimado pelo modelo, n o número de observações experimentais e GLR o grau de liberdade do modelo.

O coeficiente de difusão efetivo foi obtido a partir do ajuste do modelo matemático da difusão líquida. Essa equação é uma solução para a segunda lei de Fick da difusão, para a forma geométrica placa plana, desconsiderando a contração volumétrica e a condição de teor de água conhecida na superfície da forma, que é apresentada na Equação 4.

$$RU = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \cdot \exp \left[ \frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{ef} t}{4L^2} \right] \quad (4)$$

Sendo  $D_{ef}$  ( $m^2.s^{-1}$ ) a difusividade efetiva, L (m) a semiespessura da camada da polpa e t (h) o tempo de secagem. Na geometria de placa plana, o  $D_{ef}$  depende do coeficiente de secagem k ( $s^{-1}$ ) e de L, como fornece a Equação 5.

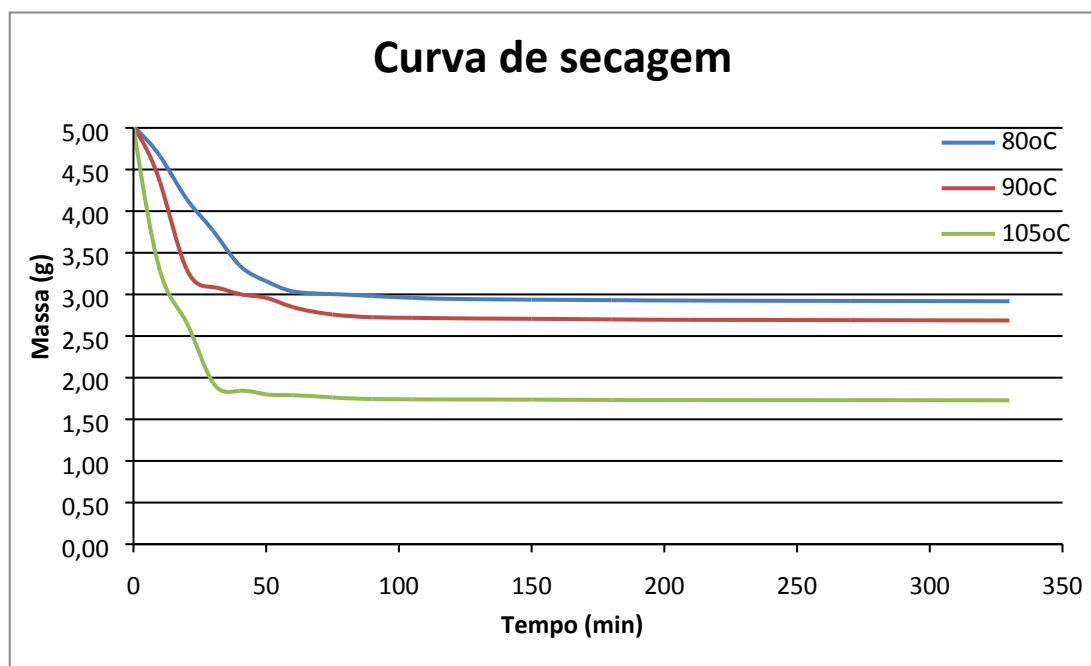
$$D_{ef} = 4kL^2 \quad (5)$$

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A umidade inicial da polpa do fruto de buriti foi, em média, próximo de 65,7% e final de aproximadamente 52,1%. Notou-se que a taxa de secagem foi maior na temperatura de 105°C, depois a 90°C e por último a 80°C.

Observou-se que o aumento da temperatura proporcionou diminuição do teor de água em tempo menor, devido ao aumento do potencial de secagem em decorrência da elevação da temperatura do ar, diminuindo a umidade relativa do ar de secagem. Logo, a taxa de secagem é proporcional a sua temperatura e diminui ao longo do tempo, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 – Gráfico de secagem da polpa de buriti



Os parâmetros encontrados a partir dos modelos matemáticos podem ser encontrados na Tabela 1, sendo a, b e c (adimensionais) os coeficientes dos modelos.

Tabela 1 – Parâmetros dos modelos matemáticos de secagem

Modelo	T (°C)	R <sup>2</sup>	SE	k (s <sup>-1</sup> )	a	b	c	Res
Page	80	0,9971	0,0057	0,0081	-	-	-	AL
	90	0,9829	0,2935	0,0520	-	-	-	TD
	105	0,9963	0,0063	0,0766	-	-	-	AL
Midilli	80	0,9995	0,0011	0,0049	0,9959	0,0007	-	AL
	90	0,9890	0,0189	0,0266	1,0141	0,0011	-	AL
	105	0,9971	0,0049	0,0637	0,9979	0,0003	-	AL
H&P	80	0,9892	0,0212	0,0329	1,0623	-	-	AL
	90	0,9828	0,0294	0,0461	1,0122	-	-	AL
	105	0,9963	0,0064	0,0683	0,9967	-	-	AL
H&P mod	80	0,9892	0,0212	0,0329	0,0312	0,0312	-	AL
	90	0,9870	0,0224	-0,0077	0,0155	0,0155	-	AL
	105	0,9971	0,0049	0,0699	0,9968	-0,9976	-	AL
Aprox. por difusão	80	0,9979	0,0042	0,1228	-0,5780	0,3614	-	AL
	90	0,9836	0,0282	1,1834	-0,1094	0,0428	-	AL
	105	0,9964	0,0063	0,5449	0,0498	0,1199	-	AL
Dois termos	80	0,9892	0,0212	-	0,5311	0,5311	-	AL
	90	0,9870	0,0223	-	0,9889	0,0402	-	AL
	105	0,9963	0,0064	-	0,4983	0,4983	-	AL
Expone.	80	0,9864	0,0266	0,0310	0,9998	-	-	AL
	90	0,9843	0,0270	0,0697	0,4693	-	-	AL
	105	0,9964	0,0063	1,2979	0,0504	-	-	AL

Logarit.	80	0,9907	0,0183	0,0286	1,1153	-	-0,0651	AL
	90	0,9870	0,0224	0,0551	0,9715	-	0,0582	AL
	105	0,9907	0,0183	0,0286	1,1153	-	-0,0651	AL
Thomp.	80	0,9800	0,0343	-	1,1888	8,2638	-	AL
	90	0,9843	0,0270	-	19,4312	1,9679	-	AL
	150	0,9907	0,0181	-	36,7281	-3,4995	-	AL
Newton	80	0,9963	0,0065	0,0685	-	-	-	AL
	90	0,9827	0,0296	0,0455	-	-	-	TD
	105	0,9963	0,0065	0,0685	-	-	-	AL
Verna	80	0,9864	0,0266	0,0310	0,0751	-	-	AL
	90	0,9865	0,0233	-0,0071	0,0311	-	-	AL
	105	0,9971	0,0049	0,0699	0,9975	-	-	AL
Wang e Sing	80	0,9959	0,0081	-	-0,0242	0,0002	-	AL
	90	0,9577	0,0716	-	-0,0303	0,0002	-	AL
	105	0,9377	0,1044	-	-0,0353	0,0003	-	TD

A análise do melhor modelo foi feito através do maior valor de  $R^2$  e menor valor de SE.

Exceto o modelo de Wang e Sing, os demais apresentaram  $R^2$  maior que 0,98. A equação de Midilli mostrou os maiores valores de  $R^2$ , em todas as temperaturas. O método de Thompson apresentou o menor valor de  $R^2$  a 80°C e o método de Wang e Sing a 90 e 105°C.

O modelo de Midilli resultou os menores valores de SE, em todas as temperaturas; e o método de Thompson o maior valor de SE a 80°C, seguido da equação de Page a 90°C e o modelo de Wang e Sing a 105°C. Assim, o modelo de Midilli foi o que melhor representou a secagem da polpa do buriti, enquanto o modelo de Wang e Sing o que menos se aproximou.

Apenas os métodos de Page, Newton e Wang e Sing apresentaram resultados tendenciosos, sendo que a maioria das equações mostraram resultados aleatórios.

Foi observado que na temperatura de 105°C, o valor da constante  $k$  foi 0,0058, resultando no  $D_{ef}$  de  $1,6472 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . A 90°C, o  $k$  foi de 0,0037 e o  $D_{ef}$  foi  $1,0615 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Em 80°C, o valor de  $k$  foi 0,0025 e o de  $D_{ef}$  foi  $7,2555 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Percebeu-se que quanto maior a temperatura, maior também o valor de  $k$  e  $D_{ef}$ .

## 4. CONCLUSÃO

As curvas de secagem da polpa do fruto de buriti mostraram resultados compatíveis com a temperatura e taxa de secagem: quanto maior a temperatura, mais rápida a secagem e a massa da amostra ficar constante.

Todos os modelos empíricos e semiteóricos apresentaram resultados satisfatórios de secagem, sendo a equação de Midilli aquela que apresentou os melhores resultados e o método de Wang e Sing aquele que mostrou os menores resultados.

O modelo de difusão líquida da forma geométrica de placa plana se ajustou bem aos dados da secagem, originando valores de  $R^2$  próximos a 1 e de baixos SE. Assim, a geometria do modelo ratificou a escolha do mesmo, além de ser o mais próximo do real teste.

Para futuros trabalhos é recomendado: realizar a secagem com outras temperaturas; utilizar outras geometrias para o modelo de difusão líquida; determinar as cinéticas de

secagem por outros meios, como por túnel, balança gravimétrica e outros; e fazer as pesagens em outros tempos regulares, como 5 e 20 minutos.

## 5. REFERÊNCIAS

- AOAC INTERNACIONAL. *Official methods of analysis: method 930.15*. Gaithersburg: AOAC, 1997.
- AQUINO, J. S.; PESSOA, D. C. N. P.; ARAÚJO, K. L. G. V.; EPAMINONDAS, P. S.; SHULER, A. R. P.; SOUZA, A. G. de; STAMFORD, T. L. M. Refining of Buriti Oil (*Mauritia flexuosa*) Originated from the Brazilian Cerrado: Physicochemical, Thermal-Oxidative and Nutritional Implications. *J. Braz. Chem. Soc.*, v. 23, n. 2, p. 212-219, 2012.
- COSTA, E. C. da. *Secagem Industrial*. São Paulo: Editora Blucher, 2007.
- FERREIRA, M. G. R. *Buriti (Mauritia flexuosa L.)*. Porto Velho: EMBRAPA, 2005.
- HAGHI, A. K.; AMANIFARD, N. Analysis of heat and mass transfer during microwave drying of food products. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 25, n. 03, p. 491-501, 2008.
- MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MELO, E. C. Análise e discriminação matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. *Revista Brasileira de Agrícola e Ambiental*, v. 11, n. 3, p. 301-306, 2007.
- MENEGHETTI, V. L.; AOSANI, E.; ROCHA, J. C. da; OLIVEIRA, M. de; ELIAS, M. C.; POHNDORF, R. S. Modelos matemáticos para a secagem intermitente de arroz em casca. *Revista Brasileira de Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 10, p. 1115-1120, 2011.
- PINTO, M. V. S.; SILVA, D. L. da; SARAIVA, A. C. F. Obtenção e caracterização de carvão ativado de caroço de buriti (*Mauritia flexuosa* L. f.) para a avaliação do processo de adsorção de cobre (III). *Acta Amazonica*, v. 42, n. 4, p. 541-548, 2012.
- SOUZA, K. A. de; RESENDE, O.; CHAVES, T. H.; COSTA, L. M. Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). *Revista Ciência Agronômica*, v. 42, n. 4, p. 883-892, 2011.