

MODELAGEM MATEMÁTICA E PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DA CINÉTICA DE SECAGEM DO MESOCARPO DE TUCUMÃ (*Astrocaryum aculeatum*) E PUPUNHA (*Bactris gasipaes*)

Cayck Trindade Ribeiro¹ – Unifesspa
cayckeq@gmail.com

Tamyris Thaise Costa de Souza² - Unifesspa
ttsouza@unifesspa.edu.br

Agência Financiadora: CNPq

Eixo Temático/Área de Conhecimento: Engenharia Química

1. INTRODUÇÃO

A região amazônica apresenta uma grande diversidade de frutos com diferentes e importantes valores nutricionais e econômicos, devido a isso, essa região desperta interesse de diversas áreas, como por exemplo, farmacêutica, cosmética e alimentícia. O tucumã é uma fruta rica em vitaminas A, na forma de β -caroteno, B, C e ômega 3, ou seja, o tucumã tem propriedade antioxidante, eficiente no combate aos radicais livres, retardando o envelhecimento e controlando o índice de açúcar no sangue [1] [2]. A pupunha é um fruto rico em lipídeos, amido e carotenoides totais, uma importante fonte de β -caroteno, pois apresenta os aminoácidos essenciais [3]. Além disso, apresenta uma considerável quantidade de vitaminas A e C, que auxiliam no fortalecimento da imunidade [4]. O β -caroteno é um antioxidante que ajuda na proteção de doenças cardiovasculares [5].

A secagem é um dos processos utilizados para a conservação dos alimentos, redução do volume, facilitando assim armazenamento e transporte do produto, uma vez que diminui o peso do produto e a atividade microbiana. [6] [7]. Modelagem matemática pode descrever o processo de secagem, importante no projeto de equipamentos e nas buscas por melhorias no processo [8].

O presente trabalho teve como objetivo estudar a cinética de secagem das polpas de tucumã e pupunha a 60, 70 e 80°C aplicando modelos matemáticos, avaliar a estatística dos ajustes dos modelos e determinar as propriedades termodinâmicas do processo, entalpia (ΔH), entropia (ΔS) e energia de Gibbs (ΔG).

2. MATERIAS E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no laboratório de alimentos da Unidade II, Campus Marabá. Os frutos foram obtidos no mercado Ver-o-Peso em Belém do Pará. Os frutos adquiridos foram selecionados e lavados. As lavagens aconteceram utilizando água corrente. Em seguida separou-se a polpa de ambos os frutos e as mesmas foram trituradas e armazenadas em um freezer a -18°C. Para o descongelar o material foi transferido para a geladeira a 4°C por 24h e posteriormente colocadas na bancada do laboratório até atingir a temperatura ambiente. Na Figura 1 é apresentado o fluxograma do processo.

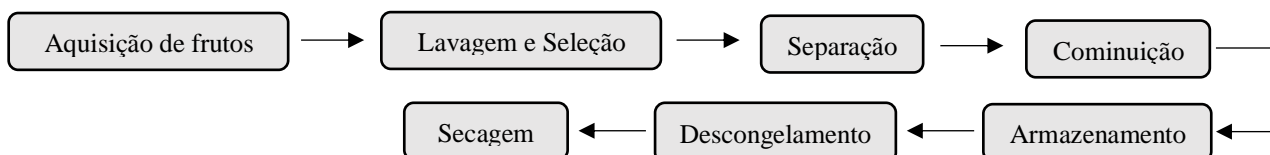


Figura 1. Fluxograma da preparação do mesocarpo de tucumã e pupunha para o processo de secagem.

As secagens ocorreram a 60, 70 e 80°C. As amostras colocadas na estufa para a secagem até o equilíbrio, ou seja perda de massa (umidade) desprezível. Para o tucumã e pupunha a massa inicial utilizada

¹Graduando em Engenharia Química - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará

²Doutora em Engenharia Química - Professora Adjunta da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (FEMMA/IGE/Unifesspa).

foi de 19,77g e 25,25g respectivamente. As razões de umidade (r_u) foram determinadas utilizando a Equação 1.

$$r_u = \frac{U^t - U_e}{U^i - U_e} \quad (1)$$

Onde, U^t é o teor de água presente na amostra no tempo t (g água/g da amostra seca), U_e é o teor de água presente no equilíbrio e U^i o teor de umidade da amostra no tempo inicial [9].

Para avaliar o ajuste da cinética de secagem foram utilizados alguns modelos matemáticos, Tabela 1.

Tabela 1. Modelos utilizados nos ajustes das curvas da cinética de secagem.

Denominação	Modelo	Equação
Dois termos	$r_u = a \cdot e^{(-kt)} + b \cdot e^{(-K_1t)}$	(2)
Verna	$r_u = a \cdot e^{(-kt)} + (1 - a) \cdot e^{(-K_1t)}$	(3)
Logarítmo	$r_u = a \cdot e^{(-kt)} + c$	(4)
Aproximação da Difusão	$r_u = a \cdot e^{(-kt)} + (1 - a) \cdot e^{(-kbt)}$	(5)

Para a validação do modelo, foram avaliados os parâmetros estatísticos, coeficiente de determinação (R^2) e desvio quadrático médio (DQM), Equação 6.

$$DQM = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Na determinação da constante cinética de secagem (k) utiliza-se a equação de Arrhenius, Equação 7.

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (7)$$

Em que, Onde k_0 o fator pré-exponencial (s^{-1}), R a constante universal dos gases ($8,314 \text{ kJ.kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), E_a a energia de ativação (kJ.mol^{-1}) e T a temperatura (K). Como o cálculo de (k) relaciona a redução de r_u com o tempo em diferentes temperaturas [9], k pode ser utilizado para mensurar as propriedades termodinâmicas do processo. Na literatura tem – se que a equação de Arrhenius apresenta uma satisfatória relação entre a mobilidade de moléculas de água no processo de secagem com a temperatura [10].

As propriedades termodinâmicas, entalpia (ΔH), entropia (ΔS) e energia de Gibbs (ΔG), são obtidas utilizando as Equações 8, 9 e 10, respectivamente.

$$\Delta H = E_a - RT \quad (8)$$

$$\Delta S = R \left[\ln(D_0) - \ln\left(\frac{k_b}{h_p}\right) - \ln T \right] \quad (9)$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (10)$$

Em que, ΔH é a variação da entalpia específica (J.mol^{-1}); ΔS a variação da entropia específica ($\text{J.mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); ΔG energia livre de Gibbs (J.mol^{-1}); k_b a constante de Boltzmann, igual a $1,38 \times 10^{-23} \text{ (J.K}^{-1}\text{)}$; h_p a constante de Planck igual a $6,626 \times 10^{-34} \text{ (J.s}^{-1}\text{)}$ e T a temperatura de secagem (K).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a aceitação do modelo das cinéticas, foram analisados os parâmetros estatísticos, R^2 e DQM. Na Tabela 2, são mostrados os resultados de DQM, R^2 e os parâmetros dos modelos que tiveram os melhores ajustes.

Tabela 2. Parâmetros estatísticos e dos melhores modelos das cinéticas de secagens.

Modelos	Fruto	Temp (°C)	Parâmetros dos modelos	R ²	DQM
Dois termos		60	a = 0,6218; b = 0,3910; k = 0,4204; k ₁ = 0,1417	0,99936	0,01111
Verna	Pupunha	70	a = 12,2804; k = 0,6303; k ₁ = 0,6583	0,99954	0,00894
Verna		80	a = 23,0741; k = 0,8143; k ₁ = 0,8355	0,99914	0,01148
Logaritmo		60	a = 1,0013; c = -0,0021; k = 0,3032	0,99996	0,00310
Verna	Tucumã	70	a = -26,114; k = 0,8384; k ₁ = 0,8181	0,99785	0,01899
Verna		80	a = 0,1604; k = 71,926; k ₁ = 0,6167	0,99718	0,01780

k = constantes de secagem (s⁻¹); K₁, a, b, c = coeficientes dos modelos; Temp. = Temperatura; SE = desvio padrão de estimativa; DQM = Desvio Quadrático Médio e R² = coeficiente de determinação.

Os baixos valores de DQM e altos valores de R² justificam o bom ajuste dos modelos com os dados experimentais. De modo geral, valores de R² superiores a 0,98 são considerados aceitáveis, e quando elevados valores de R² estão associados a baixos valores de desvio médio, tem – se um ajuste satisfatório [11] [12]. Na Tabela 2, observa-se que k aumenta proporcionalmente com a temperatura, uma vez que em maiores temperaturas o produto atinge mais rapidamente o equilíbrio hídrico [13]. Com a constante k, determinou-se a energia de ativação, que é a energia necessária para iniciar o processo de difusão [14]. Em produtos agrícolas a E_a tem variações entre 12,7 a 110 kJ.mol⁻¹ [15]. A pupunha e tucumã apresentando as seguintes energias de ativação 263,31 e 32,275 kJ.mol⁻¹.

Na Tabela 3 são mostradas as propriedades termodinâmicas para os processos de secagem.

Tabela 3. Parâmetros termodinâmicos dos processos de secagem.

Fruto	Temperatura (°C)	Parâmetros Termodinâmicos		
		ΔH (kJ mol ⁻¹)	ΔS (kJ mol ⁻¹ K ⁻¹)	ΔG (kJ mol ⁻¹)
Pupunha	60	29,5054	-0,1563	81,5696
	70	29,4223	-0,1565	83,1338
	80	29,3391	-0,1568	84,7004
Tucumã	60	262,7214	0,5364	84,0266
	70	262,6383	0,5361	78,6635
	80	262,5551	0,5359	73,3028

ΔH = entalpia; ΔS = entropia; ΔG = energia livre de Gibbs.

Com base na Tabela 3 percebe-se que nas diferentes temperaturas para ambos os frutos os processos que a entalpia decresce com o aumento da temperatura. A ΔH, é a energia necessária para a retirada das moléculas de água presentes no produto [16]. O processo caracteriza-se endotérmico [17]. As ΔS diminuem com o aumento da temperatura, devido às restrições dos movimentos das moléculas, uma vez que reduz a umidade e os sítios disponíveis [18]. Os valores negativos, para a pupunha, podem estar relacionados à existência de distorção química e/ou modificações estruturais do produto durante a secagem [13]. Os valores positivos de ΔG caracterizam o processo como não espontâneo [19] [20].

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, conclui-se que dentre os modelos aplicados os que apresentaram melhores desempenhos foram os modelos, Logaritmo, Dois Termos e Verna. Além disso, os processos são caracterizados como endotérmicos, termodinamicamente desfavorável devido a diminuição da entropia, que tende a ordem do sistema, além disso o processo é classificado não espontâneo, ou seja, necessita de energia externa.

REFERÊNCIAS

[1]. AUR. D. Tucumã – a fruta pura saúde. Combate diabetes e muito mais. Greenme, 2018. Disponível em: <<https://www.greenmebrasil.com/usos-beneficios/6624-tucuma-diabete-beneficios/>>. Acesso em 05 de outubro de 2018.



- [2]. HENRIQUES. I. Benefícios do tucumã para a saúde. Terra, 2018. Disponível em: <<https://www.terra.com.br/vida-e-estilo/culinaria/tudogostoso/beneficios-do-tucuma-para-a-saude-confira,0fdfe1b60702d480f8f164d5bc28c743w5ze7f4o.html>>. Acesso em 05 de outubro de 2018.
- [3]. SOUZA, C. S.; JESUS, J. H.; BRONDANI, F. M. M.; RACOSKI, B. Análise físico-química do teor de lípidos da pupunha (*bactris gasipaes kunth*) com e sem caroço. *Revista Saber Científico*, vol. 7, no. 1, p. 23–33, 2018.
- [4]. ALMEIDA. L. Os 13 benefícios da pupunha para a saúde. Chico Terra. Disponível em: <<https://chicoterra.com/2019/06/11/os-13-beneficios-da-pupunha-para-a-saude/>>. Acesso em: 05 de outubro de 2019.
- [5]. AMBRÓSIO C.L.; CAMPOS F.A.; FARO Z.P. Carotenóides como alternativa contra a hipovitaminose A. *Rev Nutr.* 2006; 19(2):233-43
- [6]. CELESTINO, S. M. C. Princípios de Secagem de Alimentos. Planaltina, DF: Embrapa, 2010.
- [7]. LEONARDI, J. G.; AZEVEDO, B. M. Métodos de conservação de alimentos. *Revista Saúde em foco*, vol. 10, no. 1, p. 1–11, 2018.
- [8]. SOUSA, K. A., RESENDE, O., CHAVES, T. H., & COSTA, L. M. (2011). Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). *Revista Ciência Agronômica*, 42(4), 883–892.
- [9]. OLIVEIRA, G. H. H.; ARAGÃO, D. M. S.; OLIVEIRA, A. P. L. R.; SILVA, M. G.; GUSMÃO, A. C. Modelagem e propriedades termodinâmicas na secagem de morangos. *Brazilian Journal of Food Technology*, vol. 18, no. 4, p. 314–321, 2015.
- [10]. SILVA, D. P.; SANTOS, S. G. F.; SILVA, I. L. ; SILVA, H. W. ; RODOVALHO, R. S. Cinética de secagem e propriedades termodinâmicas de folhas de melão amargo (*Momordica charantia* L.). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 24, no. 10, p. 707–712, 2020.
- [11]. CÔRREA FILHO, L. C.; ANDRADE, E. T.; MARTINAZZO, A. P.; D’ANDREA, E. M.; SOUSA, F. A.; FIGUEIRA, V.G. Cinética de secagem, contração volumétrica e análise da difusão líquida do figo (*Ficus carica* L.). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 19, no. 8, p. 797–802, 2015.
- [12]. MURTHY, T. P. K.; MANOHAR, B. Hot air-drying characteristics of mango ginger: Prediction of drying kinetics by mathematical modeling and artificial neural network. *Journal of Food Science and Technology*, vol. 51, no. 12, p. 3712–3721, 2014.
- [13]. CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; BOTELHO, F. M.; GONELI, A. L. D.; CARVALHO, F. M. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. *Revista Ceres*, vol. 57, no. 5, p. 595–601, 2010.
- [14]. OJEDIRAN, John; RAJI, A O. Thin layer drying of millet and effect of temperature on drying characteristics. *International Food Research Journal*, vol. 17, p. 1095–1106, 2010
- [15]. ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture Diffusivity Data Compilation in Foodstuffs. *Drying Technology*, vol. 14, no. 10, p. 2225–2253, 1996.
- [16]. GUIMARÃES, R. M.; OLIVEIRA, D. E. C.; RESENDE, O.; SILVA, J. S.; REZENDE, T. A. M.; EGEEA, M. B. Thermodynamic properties and drying kinetics of “okara.” *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 22, no. 6, p. 418–423, 2018
- [17]. COSTA, C. F.; CORRÊA, P. C.; VANEGAS, J. D. B.; BAPTESTINI, F. M.; CAMPOS, R. C.; FERNANDES, L. S. Mathematical modeling and determination of thermodynamic properties of jabuticaba peel during the drying process. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 20, no. 6, p. 576–580, 2016.
- [18]. CAGNIN, C., LIMA, M. S. DE, SILVA, R. M. DA, SILVA, M. A. P. DA, PLÁCIDO, G. R., FREITAS, B. S. M.
- [19]. ALVES, J. J.; RODOVALHO, R. S. Cinética de Secagem em Camada de Espuma da Polpa de Abacate cv ‘Quintal’ (*Persea americana* Mill). *Revista Agrotecnologia - Agrotec*, vol. 7, p. 86–98, 2016
- [20] SILVA, H. W.; RODOVALHO, R. S.; VELASCO, M. F.; SILVA, C. F.; VALE, L. S. R. Kinetics and thermodynamic properties related to the drying of “Cabacinha” pepper fruits. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 20, no. 2, p. 174–180, 2016.