

Modelagem matemática de secagem de frutos de *Physalis*

P. G. SILVEIRA*, J. R. J. JUNQUEIRA,
OLIVEIRA.H. M, MELLO JR. R.E e J. L.G. CORRÊA
Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência dos Alimentos
E-mail para contato*: pagiarolla@gmail.com

RESUMO – A secagem convectiva de frutos de *physalis* (*Physalis peruviana*) foi realizada à temperatura de 60°C e velocidade de ar de 2 m.s⁻¹ sem e com diferentes pré-tratamentos (congelamento rápido com nitrogênio líquido, congelamento lento). A secagem foi realizada até o teor de umidade final de 0,08 ± 0,02 kg.kg⁻¹ (b.s). Aos dados de cinética de secagem foram aplicadas seis Equações empíricas (Page, Page Modificado, Logarítmica, Midilli, Wang & Singh e Parabólica). Dentre as Equações avaliadas, a Equação de Wang & Singh foi a que melhor se ajustou aos dados experimentais, com valores de R² maiores que 0,99.

1. INTRODUÇÃO :

O *physalis* (*Physalis peruviana*) é um fruto comestível da família das solanáceas rico em vitaminas A e C, fósforo e ferro, além de apresentar flavonoides, alcaloides e fitoesteróides. Comumente consumida na forma *in natura*, o fruto apresenta sabor agridoce. É também ingrediente para molhos, compotas, doces, geleias, sorvetes e licores. Folhas, frutos e raízes são usados na medicina popular para combater diabetes, reumatismo crônico, doenças de pele, da bexiga e do fígado (Ramadan, 2011).

A superfície do fruto é coberta por uma mistura de substâncias que a tornam impermeável (álcoois, alcanos, aldeídos, cetonas e ésteres feitos de ácidos graxos de cadeia longa) e dificultam a remoção de umidade do interior do fruto. Dentre os processos de conservação de alimentos, a secagem é um dos mais importantes contribuindo para extensão da vida útil do produto, distribuição em todas as regiões e épocas do ano e diferenciação de produtos (Silva e Corrêa, 2005; Corrêa *et al.*, 2011). Devido à presença desses compostos na camada externa, tratamentos na casca são necessários para facilitar a retirada de umidade do fruto (Doymaz e Özdemir, 2014). Durante o congelamento rápido ocorre a formação de muitos cristais pequenos promovendo uma estrutura mais aberta quando comparada ao congelamento lento (Dermesonlouoglou *et al.*, 2008) sendo também verificado em um trabalho complementar sobre secagem de *physalis* com o uso do congelamento como pré-tratamento (Junqueira *et al.*, 2017).

A modelagem matemática durante a secagem de alimentos é aplicada na avaliação do comportamento da secagem. Dentre as equações empregadas para a modelagem dos dados experimentais de secagem, semi-teóricas apresentam maior compromisso com os fenômenos envolvidos durante a transferência de calor e de massa, são facilmente aplicáveis. A maioria destas equações são derivadas da solução analítica da segunda lei de Fick (Cranck, 1975).

O objetivo deste trabalho foi ajustar seis equações empíricas (Page, Page Modificado, Logarítmica, Midilli, Wang & Singh e Parabólica) aos dados experimentais de secagem de frutos de *physalis* pré-tratados fisicamente por congelamento em diferentes taxas (congelamento rápido com nitrogênio líquido e congelamento lento em freezer doméstico) e sem pré-tratamento (Ketata *et al.*, 2013; Zielinska e Michalska, 2016).

2. Material e métodos

Os *physalis* foram coletados na Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brasil. Os frutos foram escolhidos visualmente por tamanho uniforme, peso, cor, intensidade e firmeza. Antes de cada pré-tratamento, o cálice dos frutos foi manualmente retirado. O teor inicial de umidade ($3,11 \pm 0,01 \text{ kg.kg}^{-1}$ em base seca (b.s.) foi determinado em estufa à vácuo a 70°C (AOAC, 2010).

Os pré-tratamentos na superfície do fruto foram: (i) congelamento rápido por imersão em nitrogênio líquido (-196°C) durante 10s seguido de descongelamento a 25°C , (ii) congelamento lento, inserindo os frutos num congelador doméstico (modelo Electrolux, DC51, Brasil) a $-18 \pm 2^\circ\text{C}$, seguido de descongelamento a 25°C durante 2 horas (Ketata *et al.*, 2013). Frutos tratados e não tratados foram submetidos à secagem convectiva em secador de túnel (Eco Engenharia Educacional, modelo MD018, Brasil) com fluxo paralelo a 60°C e 2 m.s^{-1} . A massa inicial da amostra de frutos foi $0,100 \pm 0,003\text{kg}$, o que corresponde entre 30 e 35 frutos. Os experimentos foram realizados até o teor de umidade final de $0,08 \pm 0,02 \text{ kg.kg}^{-1}$ (b.s.). Durante a secagem, a massa das amostras foi monitorada empregando-se uma balança digital (Marte Científica, modelo AD33000, Brasil) acoplado ao suporte de amostras. Os experimentos foram efetuados em triplicata.

Para modelagem matemática, o teor de umidade adimensional (MR) foi calculado, conforme a Equação 1:

$$MR = \frac{X_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \approx \frac{X_t}{X_0} \quad (1)$$

Onde X_t , X_0 e X_{eq} são os teores de umidade no tempo (t), inicial e de equilíbrio [kg.kg^{-1} (b.s.)], respectivamente. Nas condições experimentais, o valor de X_{eq} é relativamente pequeno em comparação a X_0 , portanto, seu valor foi considerado zero neste estudo (Doymaz, 2016). As seis equações empíricas (Junqueira *et al.*, 2016) aplicadas na secagem de frutos de *physalis* estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1- Equações empíricas de curva de secagem.

Modelo	Equação	Número
Wang & Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	(2)
Parabólico	$MR = a + bt + ct^2$	(3)

$$\text{Page} \quad MR = \exp(-kt^n) \quad (4)$$

$$\text{Page modificado} \quad MR = \exp[-(kt)^n] \quad (5)$$

$$\text{Midilli} \quad MR = a \cdot \exp(-kt^n) + bt \quad (6)$$

$$\text{Logarítmico} \quad MR = a \cdot \exp(-kt^n) + b \quad (7)$$

Onde MR é o teor de umidade adimensional, a, b, c, n e k são coeficientes de ajuste e t é o tempo, em segundos.

As análises estatísticas dos dados experimentais foram realizadas utilizando o software Statistica (Statistica 8.0, Statsoft Inc., Tulsa, OK). O coeficiente de determinação (R^2), erro quadrático médio (EQM) e qui-quadrado reduzido (χ^2) foram utilizados para determinar a qualidade do ajuste das Equações. Estes parâmetros podem ser calculados usando as Equações 8 e 9:

$$EQM = \sqrt{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pred,i} - MR_{exp,i})^2 \right]} \quad (8)$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(MR_{pred,i} - MR_{exp,i})^2}{N - n'} \quad (9)$$

onde MR_{exp} e MR_{pred} representam os teores de umidade adimensional experimentais e preditos, respectivamente; N é o número de observações e n' é o número de constantes das Equações.

Como esses parâmetros apresentados não são suficientes para avaliar modelos matemáticos não-lineares, o módulo de desvio relativo médio (P%) também foi usado para selecionar a melhor Equação:

$$P(\%) = \frac{100}{n'} \sum_{i=1}^N \left| \frac{MR_{exp} - MR_{pred}}{MR_{exp}} \right| \quad (10)$$

3. Resultados e discussão:

Os teores adimensionais de umidade obtidos nos diferentes tratamentos foram ajustadas a seis Equações empíricas listadas na Tabela 1. Os coeficientes das Equações de secagem e os critérios de comparação são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficientes das Equações de secagem e critérios de comparação.

Equação	Tratamentos	Coeficientes	R^2	RMSE	χ^2
Page	Sem tratamento	k=0,000017 n=1,140256	0,9918	0,0293	0,0009

	Congelamento lento	k=0,000035 n=1,049927	0,9731	0,0514	0,0029
	Congelamento rápido	k=0,000039 n=1,054533	0,9816	0,0421	0,0019
Page modificado	Sem tratamento	k=0,000064 n=1,148189	0,9987	0,0116	0,00014
	Congelamento lento	k=0,000058 n=1,324365	0,9953	0,0214	0,00050
	Congelamento rápido	k=0,000065 n=1,293942	0,9941	0,0236	0,00061
Midilli	Sem tratamento	a=1,016024 k=0,000014 n=1,148189	0,9991	0,0097	0,000114
	Congelamento lento	a=1,035007 k=0,000106 n=0,884750	0,9970	0,0169	0,00035
	Congelamento rápido	a=1,020584 k=0,000114 n=0,901552	0,9975	0,0155	0,00029
Wang & Singh	Sem tratamento	a=-0,000049 b=0,000000	0,9989	0,0104	0,000118
	Congelamento lento	a=-0,000042 b=0,000000	0,9988	0,0102	0,000083
	Congelamento rápido	a=-0,000049 b=0,000000	0,9992	0,0087	0,000085
Logaritimica	Sem tratamento	a=1,247685 k=0,000048	0,9975	0,0160	0,00029

	Congelamento lento	c=-0,210065 a=1,381580 k=0,000037	0,9971	0,0166	0,00032
	Congelamento rápido	c=-0,342378 a=1,318081 k=0,000044 c=-0,298292	0,9978	0,0144	0,00024
Parabólico	Sem tratamento	a= 1,020969 b=-0,00005 c=0,000000	0,9996	0,0061	0,00004
	Congelamento lento	a=1,016080 b=-0,00004 c=0,000000	0,9992	0,0084	0,000083
	Congelamento rápido	a=0,996795 b=-0,00004 c=0,000000	0,9992	0,0087	0,000087

De acordo com a Tabela 2, os valores de R^2 variaram entre 0,9731 e 0,9992. Os valores de EQM e χ^2 variaram de 0,006 a 0,051 e de 0,00042 a 0,00291, respectivamente. A equação que melhor se ajusta aos dados experimentais deve apresentar altos valores de R^2 e baixos valores de EQM, χ^2 e P (Kaushal e Sharma, 2016). Segundo os autores anteriormente mencionados, valores de P inferiores a 5, indicam um excelente ajuste, enquanto valores maiores que 10 são indicativos de baixo ajuste. Dentre as equações utilizadas, a que apresentou maior valor de R^2 e menores valores de EQM e χ^2 para todos os tratamentos foi a equação de Wang & Singh. Essa equação também apresentou bons ajustes na secagem de crambe (Costa, 2011). Segundo a Tabela 2, dentre as equações avaliadas, a equação de Wang & Singh apresentou menores valores de R^2 . Durante a secagem de maracujá amarelo (Menezes, 2013), essa equação também apresentou baixos valores de R^2 . O caráter polinomial desta equação aliado à constante unitária para tempo igual a zero contribuem para o bom ajuste da mesma.

4. Conclusão

Foi possível ajustar os dados experimentais de secagem convectiva de frutos de physalis, com e sem pré-tratamento físicos por congelamento a seis equações empíricas. Dentre as avaliadas, a que apresentou maior ajuste aos dados experimentais foi a de Wang & Singh, com altos valores de R^2 e baixos valores de EQM, χ^2 e P(%).

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a Fapemig, à CAPES e ao CNPq.

6. REFERÊNCIAS:

- AOAC. Official Methods of Analysis, 18th ed. Gaithersburg, MD: AOAC ,2010.
- CORRÊA, J. L. G.; DEV, S. R. S.; GARIPEY, Y.; RAGHAVAN, G. S. V. Drying of Pineapple by Microwave-Vacuum with Osmotic Pretreatment. *Drying Technology*, v. 29, p. 1556-1561, 2011.
- COSTA, L. M.; RESENDE, O.; SOUSA, K. A.; GONÇALVES, D. N. Coeficiente de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de sementes de crambe. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, p. 1089, 2011.
- CRANK, J. The mathematics of diffusion, 2nd ed, 1975.
- DERMESONLOUOGLU, E. K.; POURGOURI, S.; TAOUKIS, P. S. Kinetic study of the effect of the osmotic dehydration pre-treatment to the shelf life of frozen cucumber. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, v. 9, p. 542-549, 2008.
- DOYMAZ, I.; ÖZDEMİR, Ö. Effect of air temperature, slice thickness and pretreatment on drying and rehydration of tomato. *Int J Food Sci Technol.*, v. 49, p. 558–564, 2014.
- DOYMAZ, İ. Hot-Air Drying and Rehydration Characteristics of Red Kidney Bean Seeds. *Chem Eng Commun.*, v. 203, p. 599–608, 2016.
- JUNQUEIRA, J. R. J.; MENDONÇA, K. S; CORRÊA, J. L. G. Microwave drying of sweet potato slices: influence of the osmotic pretreatment. *Journal Defect and Diffusion Forum.*,v. 367, p. 167-174, 2016.
- JUNQUEIRA, J. R. J.; CORRÊA, J. L. G.; OLIVEIRA, H. M.; AVELAR, R. I. S.; PIO, L. A. S. Convective drying of cape gooseberry fruits: Effect of pretreatments on kinetics and quality parameters. *Food Science and Technology*, v. 82, p. 404-410, 2017.
- KAUSHAL, P.; SHARMA, H. K. Osmo-convective dehydration kinetics of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*). *J Saudi Soc Agric Sci* .,v.15, p. 118–126, 2016.
- KETATA, M.; DESJARDINS, Y.; RATTI, C. Effect of liquid nitrogen pretreatments on osmotic dehydration of blueberries. *Journal Food Eng.*, v. 116, p. 202–212, 2013.
- MENEZEZ, M. L.; SHOHER, A. P.; PEREIRA, N. C.; BARROS, S. T. D. Análise da cinética e ajustes de modelos matemáticos aos dados de secagem do bagaço de maracujá amarelo. *Engevista.*, v. 15, p. 176-186, 2013.
- RAMADAN, M. F. Bioactive phytochemicals, nutritional value, and functional properties of cape gooseberry (*Physalis peruviana*): An overview. *Food Res Int.*, v. 44, p. 1830–1836, 2011.
- SILVA, M. A. ; CORRÊA, J. L. G. . Academic Research on Drying in Brazil. *Drying Technology*, v. 23, p. 1345-1359, 2005.
- ZIELINKA, M.; MICHALSKA, A. Microwave-assisted drying of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) fruits: Drying kinetics, polyphenols, anthocyanins, antioxidant capacity, colour and texture. *Food Chemistry.*, v. 212, p. 671-680, 2016.