

COEFICIENTE DE DIFUSIVIDADE EFETIVO E MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM DE BERINJELA

Rafaela Duarte Almeida Araújo¹; Renata Duarte Almeida²; Anastácia Maria Mikaella Campos Nóbrega André³; Ruth Brito de Figueiredo Melo⁴; Ramon Viana de Sousa⁵

Universidade Federal de Campina Grande - rafaeladual@gmail.com¹; renatadual@yahoo.com.br²; anastaciamikaella@gmail.com³; ruthmeload@gmail.com⁴; Prof.Orientador - ramon.sousa@ifrn.edu.br⁵

RESUMO: No presente trabalho, objetivou-se obter as curvas de cinética de secagem em leito fixo da berinjela para as temperaturas de 40, 50 e 60°C e a aplicação de três modelos matemáticos para representação do processo de secagem. Com o modelo Fick, determinou-se a difusividade e a energia de ativação. O ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais foi realizado através de análise de regressão não-linear, utilizando o programa computacional Statistica, versão 7. Os modelos foram selecionados tomando-se como parâmetro a magnitude do coeficiente de determinação (R^2) e do desvio quadrático médio (DQM). Através das curvas de cinética de secagem, observou-se que a temperatura exerce grande influência na secagem da berinjela, pois quando se aumenta a temperatura ocorre uma diminuição do tempo de secagem. Verificou-se também que a difusividade efetiva da berinjela aumentou com a elevação da temperatura do ar de secagem, apresentando valores entre $6,611 \times 10^{-10}$ a $16,3835 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. A relação do coeficiente de difusividade efetiva com a temperatura de secagem pode ser descrita pela equação de Arrhenius, que apresenta uma energia de ativação para a difusão do líquido de $37,676 \text{ kJ mol}^{-1}$. A análise dos resultados possibilita concluir que as equações de Page e Henderson e Pabis representam, de forma satisfatória, o processo de secagem em todas as condições de temperaturas.

Palavras-chaves: Secagem, modelagem, difusividade efetiva.

INTRODUÇÃO

A berinjela é uma *Solanácea* rica em vitaminas e minerais, especialmente ferro, em comparação com outros produtos hortícolas comumente consumidos, e é comparável nutricionalmente ao tomate (KALOO, 1993). Sua textura remete à carne e são utilizados para a alimentação em todo o mundo.

De acordo com DIPLOCK et al. (1999), em sua composição possui substâncias bioativas e tem sido citada por diversos autores como uma das culturas que pode ser classificada como alimento funcional, que podem ser definidos como sendo aqueles que beneficiam uma ou mais funções orgânicas, além da nutrição básica, contribuindo para melhorar o estado de saúde e bem-estar e reduzir o risco de doenças.

Por ser um produto com teor de água elevado o que se reflete em uma alta perecibilidade, a berinjela precisa ser avaliado quanto

ao seu comportamento quando submetido à secagem, processamento importante para a exploração comercial de produtos agrícolas. Algumas vantagens de se utilizar a secagem são: maior vida de prateleira, agregação de valor ao produto e facilitação do transporte. A secagem é uma operação de retirada da água de um material úmido por meio da aplicação de calor, com o propósito de vaporizar parte do conteúdo de água deste material, obtendo um produto seco (BARBANTI; MASTROCOLA; SEVERINI, 1994; LEWISCKI; JAKUBCZYK, 2004).

Uma das maneiras de reduzir as perdas e diversificar o uso da berinjela seria a secagem e sua transformação em farinhas para incorporação em diversos produtos. Neste sentido, o trabalho foi realizado com o objetivo de desidratar a berinjela em secador com circulação de ar, nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C, e de estudar o ajuste de modelos matemáticos de secagem aos dados experimentais.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi conduzido no Laboratório de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Campina Grande, campus de Campina Grande. Utilizou-se como matéria-prima berinjela (*Solanum melongena*, L.) provenientes do município de Boqueirão, PB.

Inicialmente, os frutos *in natura* foram selecionados com o objetivo de eliminar injúrias e higienizados. As cascas e partes verdes dos frutos foram removidas e descartadas, a polpa restante foi fatiada originando formato de placas planas retangulares 20 x10 x 10 mm com teor de água inicial de 87% base úmida. Amostras de 100g foram colocadas em bandejas de aço inoxidável, e uniformemente espalhadas, formando uma camada fina. A seguir, as bandejas foram colocadas em um secador com circulação forçada de ar para a realização da secagem da berinjela nas temperaturas de 40, 50 e 60°C. Durante a secagem se fez o acompanhamento da perda de massa e no final das secagens foram determinadas as massas secas e calculados os teores de água de acordo com IAL (2008).

Os modelos de secagem de Fick (Eq.1 - considerando o formato de placas planas retangulares), Page (Eq.2) e de Henderson & Pabis (Eq.3), foram ajustados aos dados da cinética de secagem, utilizando-se o programa computacional STATISTICA versão 7.0.

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

$$RX = \exp(-k \cdot t^n) \quad (2)$$

$$RX = a \cdot \exp(-kt) \quad (3)$$

Em que: RX - razão de teor de água (adimensional); k, n, a, c - constantes do modelo; L - Dimensão característica meia espessura da placa (m); D_{ef} - Difusividade efetiva (m^2/s) e t - tempo (minutos).

Para determinação da difusividade efetiva da massa constante no interior do fruto, foi utilizada a teoria da difusão, fundamentada na segunda lei de Fick, representado pela seguinte Eq. 4 e através da equação de Arrhenius (Eq.5) foi descrita a relação entre a difusividade efetiva e a temperatura.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla(D_{ef} \nabla X) \quad D_{ef}: \text{difusividade efetiva, } m^2 s^{-1}; X: \text{teor de água, \% b.s.}; t: \text{tempo, s s.} \quad (4)$$

$$D_{ef} = D_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad D_0: \text{coeficiente de difusão limite, } m^2 s^{-1}; E: \text{energia de ativação, } J kg^{-1}; R: \text{constante do vapor d'água, } J kg^{-1} K^{-1}. \quad (5)$$

Para a determinação do melhor ajuste dos modelos aos dados experimentais os critérios usados foram, o coeficiente de determinação (R^2) e o desvio quadrático médio (DQM).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabelas 1 encontram-se os valores dos parâmetros dos modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais das cinéticas de secagem da berinjela nas temperaturas de 40, 50 e 60°C, os coeficientes de determinação (R^2) e os desvios quadráticos médios (DQM).

Tabela 1- Parâmetros, coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM) dos modelos ajustados às curvas de secagem

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros		R ²	DQM
$D_{ef} (10^{-10} m^2 s^{-1})$					
Fick	40	6,6611		93,83%	0,0908
	50	8,9690		97,07%	0,0592
	60	16,3835		99,36%	0,0252
k n					
Page	40	--	0,001332 1,253719	99,87%	0,0129
	50	--	0,005333 1,050383	99,81%	0,0148
	60	--	0,024198 0,853738	99,76%	0,0149
k a					
Henderson & Pabis	40	--	0,005388 1,049179	99,060%	0,0348
	50	--	0,006905 1,004762	99,754%	0,0168
	60	--	0,011767 0,947220	99,471%	0,0223

Fonte: Dados da pesquisa

Observa-se, pela análise da Tabela 1, que o coeficiente de difusividade efetiva (D_{ef}) na secagem da berinjela, estimado pelo modelo Fick, aumentou com a elevação da temperatura, isto ocorre, pois a difusividade representa a velocidade com que a água migra do interior para a superfície do produto. A magnitude do coeficiente de difusividade efetiva obtidos nesta pesquisa variaram entre $6,6611 \times 10^{-10}$ a $16,3835 \times 10^{-10} m^2 s^{-1}$ para o teor de água inicial analisado. Segundo Madamba (2003) os valores do coeficiente de difusividade para produtos alimentícios encontram-se dentro de uma faixa de 10^{-11} a $10^{-9} m^2 s^{-1}$.

Na Figura 1 é apresentado os valores do coeficiente de difusividade para berinjela em diferentes condições de temperatura. Observa-se que o modelo linear apresenta um ajuste satisfatório aos dados experimentais, com elevado coeficiente de determinação (95,67%).

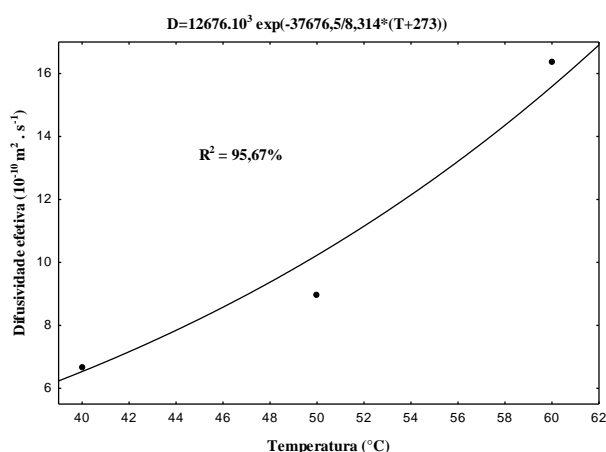


Figura 1. Efeito da temperatura na difusividade efetiva para diferentes condições de temperatura.

A energia de ativação para difusão líquida para berinjela foi de $37,676 kJ mol^{-1}$. Segundo Zogzas et al. (1996) para os produtos

agrícolas a energia de ativação deve estar entre 12,7 a 110 kJ mol⁻¹. Logo, o valor encontrado no trabalho de pesquisa apresenta-se dentro da faixa.

Constata-se também que a temperatura tem efeito significativo sobre os parâmetros k e n da equação de Page. Conforme Corrêa et al. (2007), o efeito das condições externa de secagem está representado pela constante “ k ” de secagem e o parâmetro “ n ” mostra a resistência interna do produto estudado. Portanto, a maior resistência do produto ao processo de secagem ocorreu na temperatura de 40°C.

Verifica-se que, dentre os modelos testados, os de Page e Henderson e Pabis, foram os que melhores se ajustaram aos dados experimentais em todas as temperaturas, tendo em vista que apresentaram elevados valores de determinação (R^2), superior a 99% e reduzidos valores para o desvio quadrático médio (DQM).

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos conclui-se que:

- O aumento da temperatura de secagem promoveu elevação da difusividade efetiva. Os valores do coeficiente de difusividade efetiva obtidos nesta pesquisa variaram entre $6,6611 \times 10^{-10}$ a $16,3835 \times 10^{-10}$ m² s⁻¹ para o teor de água inicial analisado.
- A relação entre o coeficiente de difusividade efetiva e a temperatura pode ser descrita pela equação de Arrhenius, que apresenta uma energia de ativação de 37,676 kJ mol⁻¹.
- O aumento da temperatura de atuação exerce efeito importante na cinética de secagem. Observou-se que a relação entre a temperatura utilizada no processo de secagem é inversamente proporcional ao tempo gasto para que os mesmos atingissem o teor de água de equilíbrio.
- As constantes “ k ” e “ n ” de secagem, ajustadas pelo modelo Page, variaram linearmente com a temperatura do ar de secagem. O tempo necessário para a secagem da berinjela atingisse o teor de água de equilíbrio foi de 520, 480 e 420 minutos, para as temperaturas de 40, 50 e 60°C, respectivamente.
- Dentre os modelos testados, os de Page e Henderson e Pabis apresentaram, para todas as temperaturas, os melhores parâmetros de ajustes para as amostras da berinjela.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

BARBANTI,D.; MASTROCOLA, D.; SEVERINI, C. Air drying of plums. A comparison among twelve cultivars. **Sciences des Aliments**, n.14,p. 61-73, 1994.

CHAVES, M.G.; SGROPPO, S.C.; AVANZA, J.R. Cinética de secado de berenjenas (*Solanum melongena* L.). **Comunicaciones Científicas y Tecnológicas**, Corrientes, E- 060, p.1-4, 2003.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO A. P.; GONELI, A. L. G.; BOTELHO, F. M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, Viçosa, MG, v. 27, n. 2, p. 501-510, 2007.

DIPLOCK, A. T.; AGGETT, P. J.; ASHWELL, M.; BORNET, F.; FERN, E. B.; ROBERFROID, M. B. Scientific concepts of functional foods in Europe: consensus document. **British Journal of Nutrition**, 88: S1-S27 (Suppl. 1), 1999.

IAL- INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4 ed. Brasília: Ministério da Saúde, 2005. 1018p.

KALOO, G. Eggplant – *Solanum melongena* L. In: KALOO, G.; BERGH, B. O. Genetic Improvement of vegetable crops. **Oxford: Pergamon Press**. P.587-604, 1993.

LEWICKI, P.P.; JAKUBCZYK, E. Effect of hot air temperature on mechanical properties of dried apples. **Journal of Food Engineering**, v.64, p.307-314, 2004.

MADAMBA, P. S. Thin layer drying models for osmotically pré-dried young coconut. **Drying technology**, v.21, n.9, p.1759-1780, 2003.

STATSOFT, STATISTICA for Windows version 7.0. Computer program manual. Tulsa: Statsoft, Inc., 2007.

ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; MARINOSKOURIS,D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. **Drying Technology**, New York, v.14, n.10, p. 2225-2253,1996.