

Desidratação osmótica de goiaba: Metodologia experimental e estudo por meio de modelos difusivos bidimensionais

Juarez Everton de Farias Aires¹, Kalina Lígia Cavalcante de Almeida Farias Aires¹, Aluizio Freire da Silva Júnior², Deise Souza de Castro², Cleide Maria Diniz Pereira da Silva e Silva², Wilton Pereira da Silva²

¹Instituto Federal de Ciência e Tecnologia da Paraíba

²Universidade Federal de Campina Grande.

Resumo

Experimentos de desidratação osmótica de goiaba (*Psidium guajava* L.) foram realizados utilizando-se soluções hipertônicas de sacarose com concentrações de 40 e 50 °Brix, sob temperaturas de operação de 30 e 40 °C, respectivamente. Soluções analíticas da equação de difusão bidimensional, em coordenadas retangulares, com condição de contorno de primeiro tipo, foram utilizadas na predição das cinéticas de perda de água e captação de sólidos, assim como na determinação das distribuições de água e de sacarose no interior do produto. As difusividades efetivas de massa, para água e para sacarose, foram determinadas por meio de um otimizador baseado em método inverso. A modelagem matemática mostrou-se adequada para a descrição das mencionadas cinéticas de desidratação osmótica de goiaba e os valores encontrados para as difusividades efetivas de massa foram compatíveis com aqueles encontrados na literatura.

Palavras chave: Difusividade efetiva de massa, otimização, geometria bidimensional.

1. Introdução

A goiaba (*Psidium guajava* L.) pertencente à família *Myrtaceae*, é um fruto amplamente cultivado em regiões tropicais e subtropicais, sendo originária dos trópicos americanos. Segundo Vieira et al. (2012), seu único e penetrante sabor desperta grande aceitação para o consumo *in natura*, além de apresentar um largo espectro de aplicação industrial no que toca à produção de sucos, doces, sorvetes e polpas concentradas. Além disso, constitui-se como uma fonte considerável de vitaminas A, B e C, sendo que, no último caso, apresenta um índice três vezes maior do que a laranja (GANJLOO et al., 2012).

As qualidades organolépticas e nutricionais da goiaba *in natura*, assim como seu potencial para a fabricação de outros produtos, tem recebido a atenção da indústria alimentícia e da comunidade científica, no que diz respeito a tratamentos que lhe propicie um maior tempo pós-colheita e de armazenamento, assim como maior valor agregado. A desidratação osmótica, bem como a secagem de goiaba, para os mais diversos fins, tem sido objeto de estudos no que toca aos seus efeitos sobre a qualidade do produto final, à otimização do processo e à modelagem matemática, dentre outros aspectos. Consiste em um processo isotérmico de remoção parcial de água de um produto por meio de sua imersão em uma solução hipertônica, tendo como força motriz, para a migração de massa, a maior pressão osmótica do meio hipertônico. Em outros termos, há, na desidratação osmótica, a retirada de parte da água da célula do produto biológico, de um meio com maior atividade de água para outro com menor atividade de água (YAO e MAGUER, 1996). Neste sentido, a desidratação osmótica é uma técnica usual de conservação e preservação das qualidades nutricionais da goiaba. Além disso, quando combinada com outros tratamentos, como a secagem e o congelamento, permite a elaboração de produtos estáveis com altas qualidades nutricionais e sensoriais, com características similares à da fruta fresca (MUHAMMAD, 2012). Com efeito, a desidratação osmótica apresenta inúmeras vantagens uma vez que promove uma remoção de água concomitante com captação de sólidos, viabilizando o fornecimento de *commodities* minimamente processadas ou ingredientes utilizados na panificação e nas indústrias de sorvetes, dentre outras aplicações. Além disso, tem importância industrial no que toca à eficiência energética, haja vista que não requer mudança de fase da água durante o processo (PANARESE et al., 2012).

Embora sofram críticas, por reduzirem todos os efeitos estruturais e seus mecanismos a um único parâmetro, nomeadamente a difusividade efetiva de massa, os modelos difusivos são amplamente encontrados na literatura para descrever a cinética de desidratação osmótica (SIMAL et al., 1997; RASTOGI e RAGHAVARAO, 2004; GARCIA et al., 2007; CONCEIÇÃO et al., 2010; RUIZ-LÓPEZ et al., 2010; ZÚÑIGA e PEDRESCHI, 2011). Nos termos de Silva et al. (2012), esses modelos têm a vantagem de predizerem a distribuição de teor de água e de solutos em qualquer instante de tempo do processo, permitindo a predição de tensões internas ao produto que podem danificá-lo.

O principal objetivo deste trabalho diz respeito à modelagem matemática do processo de desidratação osmótica de fatias de goiaba, variedade Paluma, por meio do uso de soluções analíticas da equação de difusão bidimensional com condição de contorno de primeiro tipo.

2. Materiais e métodos

Nesta seção dispõe-se acerca da metodologia matemática e experimental utilizada para o estudo da desidratação osmótica de fatias de goiaba.

2.1 Equação de difusão

Para a descrição da migração de massa no processo de desidratação osmótica, a equação de difusão bidimensional, em coordenadas retangulares, tem a forma

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right), \quad (1)$$

em que Φ representa a grandeza de interesse (quantidade de água ou de sacarose), t o tempo, x e y , as variáveis de posição e Γ^Φ é a difusividade efetiva de massa (da água ou da sacarose). Para a obtenção de soluções analíticas da Equação (1) algumas hipóteses são, ainda, consideradas, a saber:

- O sólido é considerado homogêneo e isotrópico;
- a difusividade efetiva de massa mantém-se constante no transcurso do processo;
- não se considera o encolhimento;
- a difusão de água não interfere na difusão de sólidos e vice-versa.

Considerando essas hipóteses, além de uma condição inicial uniforme e a condição de contorno do primeiro tipo, tem-se a seguinte solução para a Equação (1) (LUIKOV, 1968; CRANK, 1992):

$$\frac{\Phi(x, y, t) - \Phi_{eq}}{\Phi_0 - \Phi_{eq}} = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} A_n A_m \cos \left(\mu_n \frac{x}{(L_x/2)} \right) \cos \left(\mu_m \frac{y}{(L_y/2)} \right) \times \exp \left[- \left(\frac{\mu_n^2}{(L_x/2)^2} + \frac{\mu_m^2}{(L_y/2)^2} \right) \Gamma^\Phi t \right], \quad (2)$$

em que

$$A_l = \frac{2(-1)^{l+2}}{\mu_l} \text{ e } \mu_l = \frac{(2l+1)\pi}{2}, \quad (3)$$

e o subscrito l representa os inteiros m e n . Em alguns casos, como no processo de otimização, necessita-se do valor médio de Φ , que é expresso por (LUIKOV, 1968; CRANK, 1992):

$$\frac{\bar{\Phi}(t) - \Phi_{eq}}{\Phi_0 - \Phi_{eq}} = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} B_n B_m \times \exp \left[- \left(\frac{\mu_n^2}{(L_x/2)^2} + \frac{\mu_m^2}{(L_y/2)^2} \right) \Gamma^\Phi t \right] \quad (4)$$

na qual

$$B_l = \frac{2}{\mu_l^2} \quad (5)$$

em que, mais uma vez, l representa os inteiros m e n .

2.2 Estimativa da difusividade efetiva de massa

Para a estimativa da difusividade efetiva de massa, a partir de dados experimentais, foi utilizado um otimizador desenvolvido por Silva et al. (2009) acoplado às soluções analíticas da equação de difusão que fundamenta-se na minimização da função objetivo qui-quadrado, assim definido:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_p} \left[\overline{\Phi}_{t_i}^{\text{exp}} - \overline{\Phi}_{t_i}^{\text{ana}} \right]^2 \cdot \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (6)$$

em que $\overline{\Phi}_{t_i}^{\text{exp}}$ é o valor experimental médio de Φ correspondente ao tempo t_i , $\overline{\Phi}_{t_i}^{\text{ana}}$ é o correspondente valor médio de Φ calculado por meio da Equação (4) considerando-se, neste trabalho, 25 termos em cada somatório. N_p é o número de pontos experimentais e $1/\sigma_i^2$ é o peso estatístico referente ao i -ésimo ponto experimental que, não sendo conhecido, deve ser tomado com valor comum para todos os pontos, como considerado neste trabalho.

De forma sucinta, o processo de otimização se processa da seguinte forma (SILVA et al., 2009): atribui-se um valor inicial, próximo de zero, à difusividade D , e obtém-se a solução correspondente ao modelo 1. Com a solução obtida, determinam-se os teores de água médios, em instantes nos quais se tem os valores experimentais correspondentes e, com isso, calcula-se o χ^2 . Em seguida, dobra-se o valor da difusividade D , calcula-se um novo valor para a função χ^2 e compara-se o valor atual com o obtido no estepe anterior. Caso o valor atual de χ^2 seja menor do que o anterior, dobra-se novamente o valor de D e calcula-se, outra vez, o valor de χ^2 , comparando-o com seu antecessor. O processo é repetido até que o valor de χ^2 seja maior do que o seu antecessor. Nesse ponto, o antepenúltimo e o penúltimo valores de D , denotados por D_a e D_b são os extremos do intervalo que contém o valor de D que minimiza a função χ^2 . O intervalo com extremos D_a e D_b é refinado dividindo-o em um número finito de subintervalos uniformemente distribuídos e o processo de procura do valor de D que minimiza a função χ^2 é repetido até que se atinja um critério de convergência estipulado.

2.3 Experimento de desidratação osmótica

Goiabas maduras foram descascadas e tiveram suas sementes retiradas. Em seguida suas polpas foram cortadas em paralelepípedos com dimensões médias $L_x = 9,56$ e $L_y = 20,03$ mm. Foram feitos dois experimentos de desidratação osmótica: utilizando uma solução com uma concentração de 40 °Brix a 30 °C e outro, cuja concentração da solução hipertônica foi de 50 °Brix a uma temperatura de 40 °C. A razão entre as massas de frutas e

da solução foi de 1:15 e a solução não sofreu agitação durante o experimento. As cinéticas foram acompanhadas em termos de quantidade de água no produto em relação à quantidade de água inicial, $\bar{W}$, e da quantidade de sacarose em relação à massa seca inicial do produto, $\bar{S}$ calculadas por:

$$\bar{W} = \frac{m_w(t)}{m_w(0)} \times 100 \text{ e } \bar{S} = \frac{m_s(t)}{m_s(0)} \times 100, \quad (7)$$

em que $m_w(0)$ e $m_w(t)$ são as massas de água no instante inicial e no instante t , respectivamente. $m_s(0)$ e $m_s(t)$ as massas de sacarose no instante inicial e no instante t . A metodologia experimental seguiu, basicamente, os seguintes passos em ambos os experimentos: dez amostras em triplicata foram imersas nas soluções desidratantes e outra específica foi colocada em estufa a 105 °C, por 24 horas, para determinação de sua massa seca inicial e quantidade de água inicial, o que permitiu estimar as massas e as massas secas iniciais de qualquer das demais amostras imersas na solução. Para cada instante previamente estipulado, uma amostra específica foi retirada da solução e teve sua massa e massa seca determinadas. Esse procedimento permitiu estimar a massa e a massa seca de qualquer das amostras que permaneceram na solução. A única amostra que permaneceu na solução até o final do processo foi a décima que teve sua massa e massa seca determinadas. Para essa amostra pôde-se determinar a massa e a massa seca em todos os instantes de acompanhamento do experimento. Observe-se que, a cada retirada, a amostra correspondente foi lavada com água destilada, para retirada do filme de solução formado em sua superfície e enxugada, com papel toalha, para a retirada do excesso de água em sua superfície. A Tabela 1 mostra os valores iniciais e de equilíbrio em cada experimento, em que os subscritos '0' e 'eq' denotam os valores iniciais e de equilíbrio, respectivamente.

Tabela 1: Dados iniciais e de equilíbrio para as amostras de goiaba

Experimento	Valores iniciais (%)		Valores de equilíbrio (%)	
40 °Brix 30°C	$m_0 = 100$	$S_0 = 0$	$m_{eq} = 33,8$	$S_0 = 72,0$
50 °Brix 40°C	$m_0 = 100$	$S_0 = 0$	$m_0 = 100$	$S_0 = 74,2$

3. Resultados e discussão

Com as metodologias descritas na seção 2 foram obtidos os dados experimentais e se pôde estimar os valores para as difusividades efetivas de massa para a água e a sacarose em ambos os experimentos de desidratação osmótica. Com isso, foi possível descrever as cinéticas de perda de água e captação de sólidos por meio de soluções analíticas da equação de difusão com condição de contorno de primeiro tipo. Os resultados obtidos e as respectivas discussões são feitas na seção seguinte.

3.1 Resultados

A Tabela 2 apresenta os valores das difusividades efetivas de massa para a água e para sacarose relativas aos experimentos de desidratação osmótica, obtidos por meio do otimizador.

Tabela 2: Valores das difusividades efetivas de massa obtidas pelo otimizador.

Experimento		D (m ² min ⁻¹)	χ^2	R ²
40 °Brix 30°C	água	1,99×10 ⁻⁸	42,29	0,9883
50 °Brix 40°C	água	2,27×10 ⁻⁸	9,04	0,9983
40 °Brix 30°C	sacarose	4,45×10 ⁻⁸	53,68	0,9890
50 °Brix 40°C	sacarose	5,11×10 ⁻⁸	35,71	0,9930

Com os dados das Tabelas 1 e 2 as cinéticas de perda de água e captação de sólidos foram descritas por meio de soluções analíticas da equação de difusão bidimensional com condição de contorno de primeiro tipo. A Figura 1 apresenta os resultados para o experimento realizado com uma solução com uma concentração de 40 °Brix a uma temperatura de 30 °C.

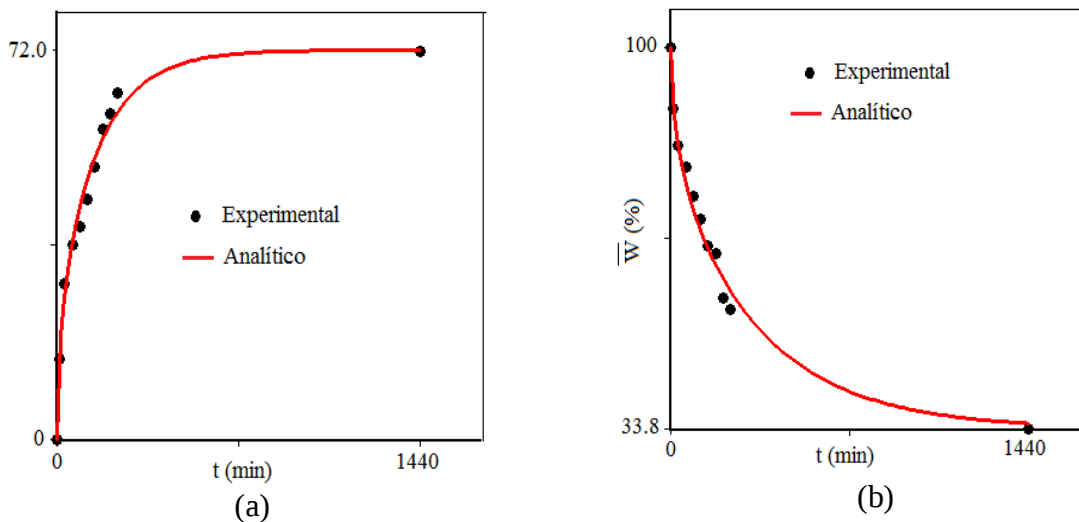


Figura 1: Cinéticas de desidratação osmótica obtidas pelo modelo analítico.

A Figura 4 apresenta as mesmas cinéticas para a concentração de 50 °Brix a 40 °C.

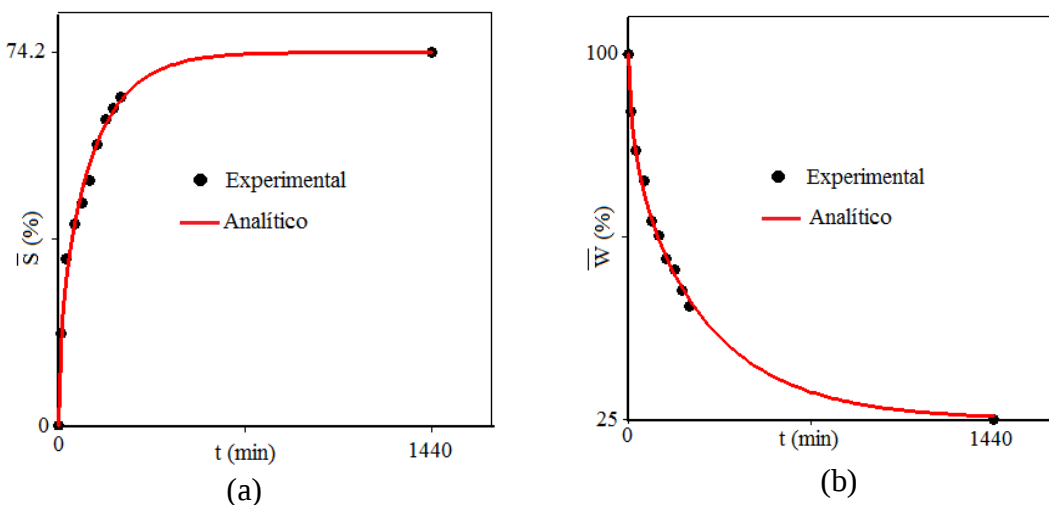


Figura 2: Cinéticas de desidratação osmótica obtidas pelo modelo analítico.

Uma das vantagens da utilização de modelos difusivos é a possibilidade de se prever a distribuição da grandeza de interesse no interior do produto. Nesta linha, na Figura 3 tem-se a distribuição de água e de sacarose para o instante de tempo de 120 minutos para o experimento desenvolvido a 40 °Brix e 30 °C.

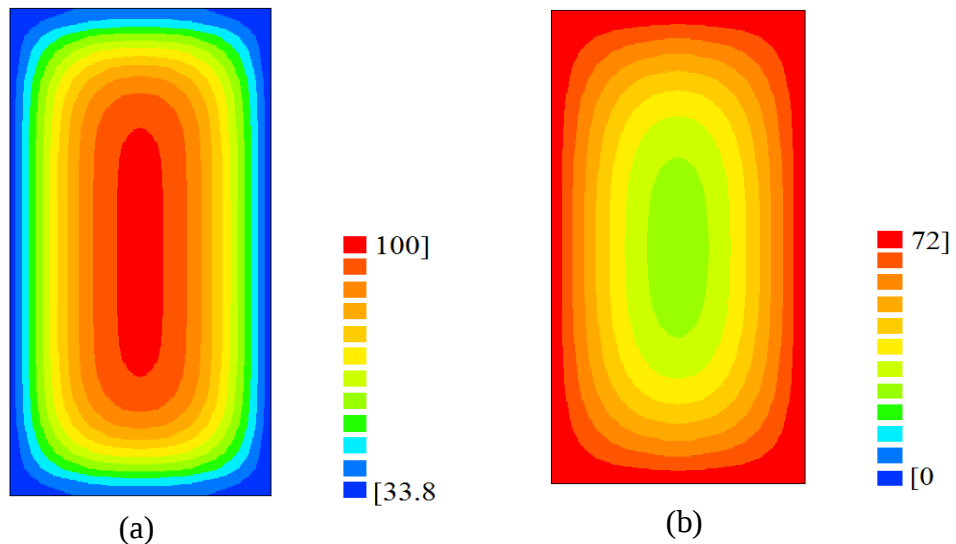


Figura 3: Predição da distribuição de água e de sacarose na fatia de goiaba transcorridos 120 minutos do início do experimento a 40 °Brix e 30 °C.

A Figura 4 mostra as mesmas distribuições para o experimento de desidratação osmótica a 50 °Brix e 40 °C.

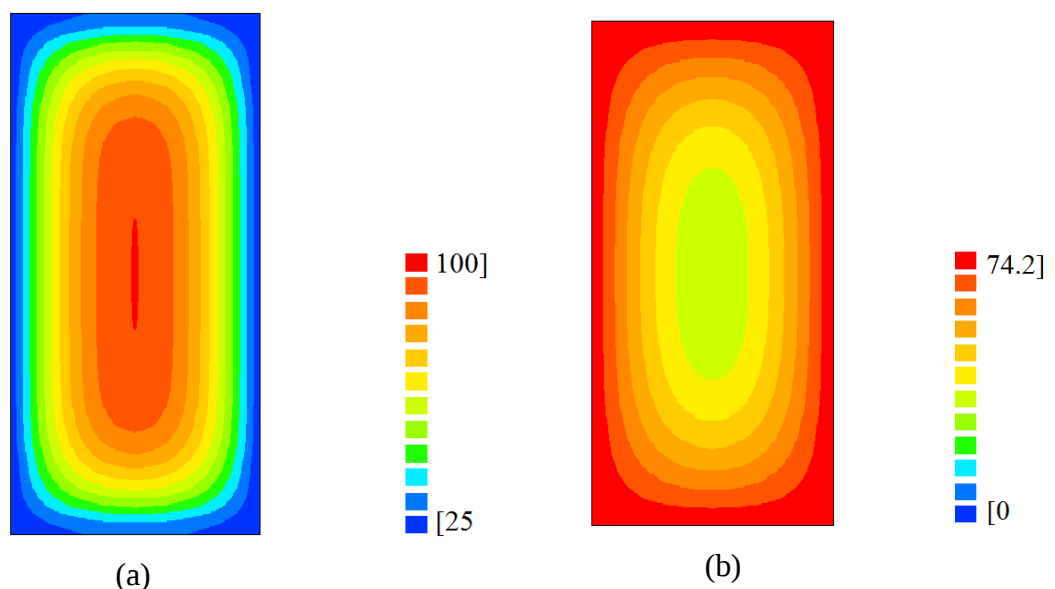


Figura 4: Predição da distribuição de água e de sacarose na fatia de goiaba transcorridos 120 minutos do início do experimento a 50 °Brix e 40 °C.

3.2 Discussão

Observando-se as Figuras 1 e 2 e os indicadores estatísticos mostrados na Tabela 2, pode-se afirmar que o modelo difusivo proposto descreve satisfatoriamente as cinéticas de perda de água e captação de sólidos referentes à desidratação osmótica de fatias de goiaba nas duas condições operacionais descritas. Percebe-se que o aumento na temperatura e na concentração favoreceu a perda de água e a captação sacarose por parte produto. Resultados neste sentido foram encontrados por Ganjloo et al. (2012) no estudo da desidratação osmótica de cubos de goiaba sob diversas condições operacionais. Com efeito, os autores afirmam que em todos os casos estudados um aumento na concentração da solução e na temperatura provocou uma maior taxa de transferência de massa.

Registre-se, ainda, que os valores encontrados para as difusividades efetivas de massa foram condizentes com aqueles encontrados na literatura, atestando a viabilidade do otimizador utilizado que, como adverte Silva et. al. (2009) apresenta a vantagem de não necessitar de valores ou intervalos iniciais para a determinação de difusividade.

Embora não se tenha usado qualquer meio de agitação do meio desidratante, a condição de contorno de primeiro tipo mostrou-se adequada no presente estudo, a exemplo de outros trabalhos que a utilizam no estudo da desidratação osmótica (MERCALI et al., 2011; PORCIUNCULA et al., 2013).

De acordo com as Figuras 3 e 4, percebe-se que o fluxo de água ocorre do interior do produto para fora, como esperado, tendo em vista que a quantidade de água é maior na parte mais interna do produto. Por outro lado, o fluxo de sacarose se dá no sentido inverso, haja vista que a quantidade de sacarose é maior nas partes mais externas das fatias de goiaba. Nota-se, ainda, que o modelo bidimensional apresenta uma boa adequação no que se refere ao comportamento nos cantos da placa, como se pode atestar pelas Figuras 3 e 4. Essa análise não seria adequada caso um modelo unidimensional tivesse sido utilizado. Por outro lado espera-se que um modelo tridimensional apresente um resultado mais satisfatório por levar em conta os fluxos de água e de sacarose desprezados na abordagem bidimensional. Registre-se, no entanto, que o tempo gasto para a estimativa das difusividades efetivas de massa seria relativamente maior neste caso.

4. Conclusão

O modelo difusivo apresentado neste trabalho mostrou-se adequado para a descrição das cinéticas de perda de água e ganho de sólidos referentes à desidratação osmótica de fatias de goiaba, como atestam os indicadores estatísticos apresentados. Além disso, proporciona a predição das distribuições de água e de sacarose em tempos específicos, o que auxilia na análise de tensões internas no produto que podem acarretar-lhe danos irreversíveis.

Os valores encontrados para as difusividades efetivas de massa para a água e a sacarose são condizentes com aqueles encontrados na literatura para produtos biológicos.

Por fim, observe-se, no entanto, que a não consideração do encolhimento inerente à desidratação osmótica, além da consideração de difusividade efetiva de massa constante, apresentam-se como limitações do presente modelo em comparação com modelos numéricos nos quais tais limitações praticamente inexistem. Contudo, em muitas situações, como a mostrada neste trabalho, a modelagem por meio de soluções analíticas apresenta boa acurácia, além de constituir um bom subsídio em termos de valores iniciais para a estimativa de parâmetros através de otimizadores acoplados a soluções numéricas da equação de difusão, como também de se mostrarem como importante ferramenta de validação para tais modelos.

Referências

- Conceição, S.M.A.; Corrêa, J. L. G.; Silva, Z. E. **Application of inverse methods in the osmotic dehydration of acerola**. International Journal of Food Science & Technology, v. 45(12), p. 2477-2484, 2010.
- Crank, J. **The mathematics of diffusion**. Oxford Science Publications, New York 1992, 414 p.
- Ganjloo, A.; Rahman, R.A.; Bakar Jamilah, O.; Azizah, B.M. **Kinetics modeling of mass transfer using Peleg's equation during osmotic dehydration of seedless guava (*Psidium guajava* L.): effect of process parameters**. Food Bioprocess Technol, v. 5, p. 2151–2159, 2012.
- Garcia, C. C.; Mauro, M. A.; Kimura, M. **Kinetics of osmotic dehydration and air-drying of pumpkins (*Cucurbita moschata*)**. Journal of Food Engineering, v. 82(3), p. 284-291, 2007.
- Luikov, A. V. **Analytical heat diffusion theory**. Academic Press, New York and London, 1968, 685 p.
- Mercali, G.D.; Marczak, L.D.F.; Tessaro, I.C.; Noreña, C.P.Z. **Evaluation of water, sucrose and NaCl effective diffusivities during osmotic dehydration of banana (*Musa sapientum*, *shum.*)**. LWT - Food Science and Technology, v.44, 82-91, 2011.
- Muhammad, S.(Ed). Tropical and subtropical fruits: Postharvest Physiology, processing and packanging. First Edition, John Wiley & Sons, Inc, 2012.
- Panarese, V.; Tylewicz, U.; Santagapita, P.; Rocculi, P.; Rosa, M. D. **Isothermal and differential scanning calorimetries to evaluate structural and metabolic alterations of osmo-dehydrated kiwi fruit as a function of ripening stage**. Innovative Food Science and Emerging Technologies, v. 15, p. 66–71, 2012.
- Porciuncula, B.D.A.; Zotarelli, M.F.; Carciofi, B.A.M.; Laurindo, J.B. **Determining the effective diffusion coefficient of water in banana (Prata variety) during osmotic dehydration and its use in predictive models**. Journal of Food Engineering, v. 119, p. 490–496, 2013.
- Rastogi N.K.; Raghavarao K.S.M.S. **Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple: considering Fickian diffusion in cubical configuration**. Lebensm.-Wiss. u.-Technol, v 37, p. 43–47, 2004.
- Ruiz-López, I.I.; Castillo-Zamudio, R. I.; Salgado-Cervantes, M. A.; Rodríguez-Jimenes, G. C.; García-Alvarado, M. A. **Mass transfer modeling during osmotic dehydration of hexahedral pineapple slices in limited volume solutions**. Food Bioprocess Technol, v.3, p. 427–433, 2010.

Silva, W. P.; Amaral, D. S.; Duarte, M.E.M.; Mata, M.E.R.M.C.; Silva, C.M.D.P.S.; Pinheiro, R.M.M. **Description of the osmotic dehydration and convective drying of coconut (*Cocos nucifera* L.) pieces: a three-dimensional approach.** Journal of Food Engineering, v. 115(1), p. 121–131, 2012a.

Silva, W.P.; Precker, J.W.; Silva, C.M.D.P.S.; Silva, D.D.P.S. **Determination of the effective diffusivity via minimization of the objective function by scanning: Application to drying of cowpea.** Journal of Food Engineering v. 95, p. 298–304, 2009.

Simal, S.; Deyá E.; Frau, M.; Rosselk, C. **Simple modelling of air drying curves of fresh and osmotically pre-dehydrated apple cubes.** Journal of Food Engineering v. 33, p. 139 - 150, 1997.

Vieira, G.S.; Pereira, L.M.; Hubinger, M.D. **Optimisation of osmotic dehydration process of guavas by response surface methodology and desirability function.** International Journal of Food Science and Technology, v. 47, p. 132–140, 2012.

Zúñiga, R.N.; Pedreschi, F. **Study of the pseudo-equilibrium during osmotic dehydration of apples and its effect on the estimation of water and sucrose effective diffusivity coefficients.** Food Bioprocess Technol, v. 5, p. 2717–2727, 2011.