



Modelagem matemática para a descrição da cinética de secagem do fruto da palma (*Opuntia ficus indica*)

Mathematical modeling for description of the pulp drying kinetics of palm fruit (Opuntia ficus indica)

Aline Elias dos Santos¹, Georgiana Maria Vasconcelos Martins², Morgana Fabíola Cunha Silva Canuto³, José Etimógenes Duarte Vieira Segundo⁴, Renata Duarte Almeida⁵

Resumo: O presente trabalho teve como objetivo estudar a secagem em camada fina do fruto da palma (*Opuntia ficus indica*) nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C em estufa com circulação forçada de ar. Foram empregados os modelos matemáticos de Aproximação da difusão, Logarítmico, Midilli e Page. Como critério de avaliação utilizou-se o coeficiente de determinação e o desvio quadrático médio (). Mediante os resultados obtidos observou-se que o aumento da temperatura diminuiu o tempo de secagem do fruto. Dentre os modelos aplicados o Logarítmico apresentou os maiores valores de coeficiente de determinação R² e os menores valores de DQM para a faixa de temperatura e espessura estudadas.

Palavras-chaves: Fruto da palma, Temperatura de Secagem, Espessura da Camada, Modelos Matemáticos.

Abstract: This work aimed to study the thin layer drying of palm fruit at temperatures of 122, 140 and 158 °F in an oven with forced air circulation. For the representation of the drying kinetics of thin-layer were used mathematical models of the diffusion approximation, logarithmic, and Midilli Kucuk and Page, and as a criterion for evaluating these we used the coefficient of determination and the deviation quadratic mean (DQM). The results obtained showed that the increase in temperature decreases the drying time of the palm fruit. Among the models applied to Logarithmic the had the highest R² values and lower values of DQM for the temperature and layer thickness range studied.

Key words: Palm fruit, drying temperature, layer thickness, Mathematical Models.

*Autor para correspondência

Recebido para publicação em 16/12/2015; aprovado em 10/03/2016

¹Mestranda em Engenharia de Alimentos, UFSC/EQA, Florianópolis - SC; Engenheiro de Alimentos, UFCG/CCTA, Pombal - PB. eng.AlineElias@gmail.com.

² Professora do Curso de Engenharia de Alimentos UFCG/CCTA, Pombal - PB; Doutorado em Engenharia de Processos UFCG - PB; Mestre em Engenharia Química, UFCG - PB; Engenheiro Químico, UFCG - PB. georgiana.82@gmail.com

³ Professora do Curso de Engenharia de Alimentos UFCG - PB; Doutora em Engenharia de Processos, UFCG - PB; Mestre em Engenharia Química, UFCG - PB; Engenheiro Químico, UFCG - PB. morganafabiola@hotmail.com

⁴ Professor do Curso de Engenharia de Alimentos UFCG/Pombal; Doutorando em Engenharia Química UFCG - PB; Mestre em Engenharia Química, UFCG - PB; Engenheiro Químico, UFCG - PB. etimogenes@gmail.com.

⁵ Engenheiro do Curso de Engenharia de Alimentos, UFCG - PB; Doutorado em Engenharia de Processos. UFCG - PB; Mestre em Engenharia Agrícola, UFCG - PB; Engenheiro Agrícola. UFCG - PB. renatinhadual@hotmail.com



INTRODUÇÃO

A palma (*Opuntia ficus indica*) pertence à família das cactáceas e tem sido utilizada tanto na alimentação humana como na alimentação animal. O fruto da palma é conhecido como figo-da-índia e produz praticamente durante o ano todo. O fruto é doce, suculento, comestível, com 5-10 cm de comprimento e 8-10 cm de largura, sua variação de peso é de 100-240g Rico em vitaminas (principalmente C e A) (PIMENTA, 1990).

A secagem é o processo comercial bastante utilizado para a preservação da qualidade dos produtos agrícolas. Consiste na remoção de grande parte de água inicialmente contida no produto logo após a maturidade fisiológica, para que promova longos períodos de armazenamento, sem que ocorram perdas significativas durante o processo (MARTINAZZO, 2010).

As operações de desidratação ou secagem são importantes nas indústrias de processos químicos e alimentícios, e seu objetivo básico é a remoção, total ou parcial, da água para um nível em que o crescimento microbiano seja minimizado. A grande variedade de alimentos desidratados (misturas, sopas, frutas, verduras, entre outros) e a crescente preocupação em reunir as especificações de qualidade e de energia, enfatizam a necessidade de um completo entendimento da operação de secagem (VAGENAS et al., 1990).

A modelagem matemática tem despertado o interesse de vários pesquisadores para os mais diversos produtos agrícolas como pimenta (PÉREZ-ALONSO et al. 2009), banana (RAYAGURU e ROUTHAY, 2012), kiwi (MOHAMMADI et al. 2008), jujuba Chinesa (YI et al. 2012), palma (*Opuntia ficus indica*) (CALLEJAS et al. 2013); fruto da palma e cladódio da palma (*Opuntia ficus indica*) (TOUIL, CHEMKHI e ZAGROUBA (2014)).

O emprego de modelos matemáticos para descrever a cinética de secagem da palma (*Opuntia ficus indica*) foram avaliados por CALLEJAS et al. (2013), onde avaliaram-se oito modelos matemáticos para a representação da secagem da palma (*Opuntia ficus indica*) em um secador solar. Touil, Chemkhi e Zagrouba (2014) estudaram a cinética de secagem do fruto e do cladódio da Palma (*Opuntia ficus indica*) em um infravermelho.

Diante disto, é de fundamental importância o emprego de modelos matemáticos para representar o processo de secagem, haja vista que as informações geradas são de grande valor para o desenvolvimento de equipamentos e predição dos tempos de secagem (SILVA, 2009).

Baseado no exposto, este trabalho teve como objetivo desidratar o fruto da palma (*Opuntia ficus indica*) nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C e nas espessuras de 4, 5 e 6 mm, com a finalidade de estudar o ajuste de modelos matemáticos de secagem aos dados experimentais.

MATERIAL E MÉTODOS

As amostras do fruto da palma foram colhidos na Universidade Estadual da Paraíba – Campus IV. O experimento realizado foi desenvolvido nos Laboratórios da Unidade Acadêmica de Tecnologia de Alimentos (UATA), na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) - Campus Pombal.

Os frutos foram recepcionados e beneficiados de forma que sujidades, unidades defeituosas e partículas sólidas presentes fossem removidas manualmente, em seguida foram sanitizados em hipoclorito de sódio a 100 ppm durante 15 min, logo após foi retirado o excesso de cloro (enxágue) e escurrido o excesso de água. Após a limpeza, as amostras foram conduzidas para a realização da secagem convectiva mediante aplicação do planejamento experimental (Tabela 1).

Tabela 1 – Matriz do Planejamento completo 2²+3 para secagem convectiva do fruto da palma.

Ensaio	Temperatura (codificada)	Espessura (codificado)	Temperatura (°C)	Espessura (mm)
1	-1	-1	50	4
2	+1	-1	70	4
3	-1	+1	50	6
4	+1	+1	70	6
5	0	0	60	5
6	0	0	60	5
7	0	0	60	5

O teor de água inicial foi determinado pelo método padrão da estufa a 105 ± 3 °C, utilizando três sub-amostras de 10 g de polpa acondicionados em cadinhos, onde permaneceram durante 24 hs. Após esse período, foram retirados da estufa, resfriados em dessecador durante 20 min e pesados em balança analítica com precisão de 0,0001g.

A porcentagem de teor de água foi calculada na base da massa úmida aplicando-se a fórmula proposta por Brasil (2005) e o resultado final expresso pela média aritmética em porcentagens das sub-amostras, de acordo com a Equação (1):

$$\% \text{ Teor de água} = \frac{(m_i - m_f)}{(m_i - m_c)} \cdot 100 \quad (1)$$

Sendo:

m_i - massa inicial, massa do recipiente e a massa do fruto úmido, g

m_f - massa final, massa do recipiente e a massa do fruto seco, g

m_c - tara, massa do cadinho, g.

O teor de água inicial do produto foi determinado pelo método gravimétrico, utilizando-se estufa a 105 ± 3 °C, durante 24 hrs, até peso constante, em três repetições de acordo com Brasil (2005).

As amostras com teor de água inicial de (89,56 ± 1,02) % (b.s), foram secas em camada fina em uma estufa com circulação forçada de ar, disponível na dependência do Laboratório de Sementes, campus de Pombal-PB, ajustado

para operar nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C. O experimento foi realizado em triplicata, sendo as pesagens dos frutos realizadas em balança semi-analítica até obtenção do equilíbrio.

O teor de água de equilíbrio foi determinado através de pesagens consecutivas realizadas seguindo intervalos de tempo, iniciando-se a cada 5 min até que as amostras atingissem o equilíbrio. Após a obtenção das massas, calculou-se o teor de água em base úmida, em base seca e a razão de teor de água para as amostras em cada temperatura e intervalo de tempo.

As curvas de secagem foram obtidas pela conversão dos dados referentes à perda de água no parâmetro adimensional razão de teor de água (RX). Para determinação da razão de

teor de água do fruto da palma para as diferentes condições de secagem foi utilizada a Equação (2):

$$RX = \frac{(X_{bs} - X_e)}{(X_{bs, inicial} - X_e)} \cdot 100 \quad (2)$$

Sendo:

RX - razão de teor de água, adimensional

X_e - teor de água de equilíbrio em base seca

X_{bs} - teor de água em base seca

$X_{bs (inicial)}$ - teor de água inicial em base seca

Os valores de RX observados para cada temperatura do ar de secagem foram analisados por cinco diferentes equações empíricas e semi empírica de regressão não linear, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Modelos matemáticos de regressão não linear, avaliados para prever o fenômeno de secagem do fruto da palma.

Designação do modelo	Equação	Designação
Aproximação da Difusão	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k \cdot t)$	(3)
Logarítmico	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + c$	(4)
Midilli et al. (2002)	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	(5)
Page	$RU = \exp(-k \cdot t^n)$	(6)

Os modelos de secagem em camada fina da Aproximação da difusão, Logarítmico, Midilli et al. (2002) e Page foram ajustados aos dados experimentais de secagem do fruto, utilizando-se a análise de regressão não linear, pelo método Quasi-Newton, empregando-se o programa computacional Statistica 5.0®.

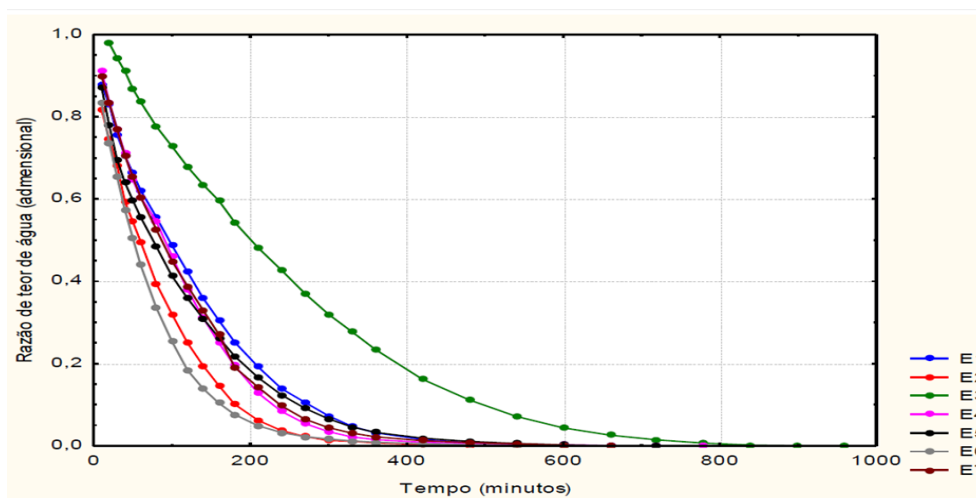
Os critérios usados para determinação do melhor ajuste dos modelos aos dados experimentais foram: coeficiente de determinação (R2) e desvio quadrático médio (DQM).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Cinética de Secagem e Modelagem Matemática

As curvas de secagem do fruto da palma, para as diferentes temperaturas e espessuras estudadas, conforme citado no planejamento experimental, estão representadas na Figura 1. Os valores apresentados no gráfico estão na forma adimensional de razão de teor de água em função do tempo de secagem

Figura 1. Curvas de secagem para as diferentes condições de planejamento experimental. E1: T = 50°C, E = 4mm; E2: T = 70°C, E = 4mm; E3: T = 50°C, E = 6mm; E4: T = 70°C, E = 6mm; E5: T = 60°C, E = 5mm; E6: T = 60°C, E = 5mm; E7: T = 60°C, E = 5mm.



Conforme representado na Figura 1 o processo de secagem foi, em todas as amostras, mais rápido para as espessuras das camadas menores. Este comportamento também foi observado poMelo et al. (2013) ao estudarem a cinética de secagem da polpa do fruto de mandacaru, com três

diferentes espessuras de camada de espuma (0,5; 1,0 e 1,5 cm).

Analisando a influência da temperatura sobre o tempo de secagem pode-se observar que, para a espessura de 4 mm a variação da temperatura de 50°C para 70°C, reduziu o tempo de secagem de 720 minutos para 540 minutos. Semelhante ao

observado por Madureira et al. (2012) ao estudar a polpa do figo da índia em camada de espuma, e Lima et al. (2007) no estudo da polpa de diferentes partes do facheiro. Com isso pode-se observar correlação entre a temperatura e a velocidade de secagem, onde as maiores velocidades de remoção de água foram apresentadas nas amostras desidratadas para temperaturas maiores, fato normalmente observado em outros produtos agrícolas (BABALIS; BELESSIOTIS, 2004; MOHAPATRA; RAO, 2005; ANDRADE et al., 2006; SACILIK, 2007; COSTA et al., 2011; SANTOS et al., 2013).

A secagem do fruto da palma ocorre no período de taxa decrescente, o que indica a difusão como mecanismo físico mais provável a governar o movimento da umidade, através da estrutura da amostra.

A ausência do período de secagem à taxa constante pode ter ocorrido por causa da natureza da umidade, pois mesmo havendo umidade superficial livre, a água pode estar na forma de suspensão de células e de solução (açúcares e outras moléculas), apresentando uma pressão de vapor abaixo da pressão de vapor da água pura, fato também observado em estudos de secagem em camada de espuma de tamarindo (SILVA et al., 2008).

Na Tabela 3 encontram-se os coeficientes de determinação dos modelos matemáticos de Logarítmico, Aproximação da Difusão, Page e Midilli, respectivamente, para os ensaios de 1 a 7 do planejamento experimental referenciado na metodologia, obtidos por regressão não linear, estimados utilizando o programa computacional STATISTICA 5.0.

Tabela 3 –Parâmetros estatísticos, coeficientes de determinação (R^2) e o desvio quadrático médio (DQM) dos modelos de secagem nas diversas temperaturas.

Modelos	Ensaio	Parâmetros					$R^2(\%)$	DQM
		a	b	C	k	n		
Logarítmico	1	0,9964	-	-0,0236	0,0072	-	99,70%	0,0175
	2	0,9773	-	-0,0124	0,0113	-	99,69%	0,0173
	3	1,1252	-	-0,0717	0,0035	-	99,77%	0,0173
	4	1,0281	-	-0,0198	0,0084	-	99,64%	0,0200
	5	0,9498	-	-0,0031	0,0085	-	99,59%	0,0196
	6	0,9888	-	-0,0009	0,0138	-	99,92%	0,0089
	7	1,0198	-	-0,0228	0,0081	-	99,73%	0,0170
Aproximação da Difusão	1	0,0319	0,0139	-	0,5414	-	99,64%	0,0182
	2	0,0571	0,0156	-	0,7274	-	99,77%	0,0173
	3	-31,3940	0,9781	-	0,0070	-	99,81%	0,2546
	4	-71,8660	0,9942	-	0,0129	-	99,72%	0,0178
	5	0,1030	0,0774	-	0,1032	-	99,87%	0,0144
	6	0,0300	0,0152	-	0,8887	-	99,95%	0,0088
	7	-31,8077	0,9893	-	0,0120	-	99,74%	0,0166
Page	1	-	-	-	0,0079	0,9932	99,55%	0,0216
	2	-	-	-	0,0123	0,9528	99,60%	0,0195
	3	-	-	-	0,0000	0,0337	15,93%	0,0197
	4	-	-	-	0,0087	1,0877	99,66%	0,0192
	5	-	-	-	0,0092	0,8794	99,71%	0,0166
	6	-	-	-	0,0140	0,9765	99,91%	0,0090
	7	-	-	-	0,0086	1,0519	99,69%	0,0183
Midilli	1	0,9672	0,0000	-	0,0064	1,0295	99,68%	0,0182
	2	0,9766	0,0000	-	0,0135	0,9676	99,69%	0,0173
	3	1,4428	-0,0017	-	0,5047	0,0000	50,33%	0,2546
	4	0,9752	0,0000	-	0,0045	1,1284	99,71%	0,0178
	5	0,9911	0,0000	-	0,0167	0,8679	99,78%	0,0144
	6	0,9926	0,0000	-	0,0148	0,9851	99,92%	0,0088
	7	0,9782	0,0000	-	0,0057	1,0779	99,74%	0,0166

Dos modelos matemáticos avaliados apresentados na Tabela 3, os de Logarítmico e da Aproximação da Difusão são os que melhores se ajustaram aos dados experimentais. Esses resultados mostram-se semelhantes aos encontrados por Madureira et al. (2012), que trabalhando com a desidratação das amostras de polpa do figo-da-índia em estufa de circulação de ar em camada fina verificaram que, os modelos de Lewis, Henderson & Pabis, Logarítmico e Page se ajustaram bem aos dados experimentais da secagem, podendo ser utilizados na predição das cinéticas de secagem, nas temperaturas de 50, 60 e 70°C, para as concentrações de amido de 20; 25 e 30%. Embora o modelo de Page tenha apresentado os melhores ajustes para o conjunto de condições estudadas. PRATES et. al. (2012), estudando a cinética de secagem de folhas de *Solanum lycocarpum* A. St.-Hil. (fruta-de-lobo), verificaram também que os melhores ajustes matemáticos foram os modelos de Logarítmico e Midilli.

Pode-se observar dos dados da Tabela 3 que o comportamento dos modelos Logarítmico, Aproximação da Difusão e Midilli, a temperatura é referência para a variação do valor do parâmetro k. Verifica-se que o parâmetro k; que representa a constante da taxa de secagem e segundo Corrêa et al. (2007) representa as condições externas de secagem, onde é possível observar seu aumento quando há aumento da temperatura e sua diminuição quando há aumento da espessura; de acordo com Goneli et al. (2009) o “k” tende a aumentar com a elevação da temperatura do ar de secagem.

Pode-se observar que todos os modelos ajustam bem os dados experimentais, sendo que para o ensaio 3 há uma grande variação na aproximação, podendo ter sido causado pelo longo tempo da análise e sua possível interferência; assim Logarítmico é o modelo que melhor representa a cinética de secagem do fruto em estudo, tendo em vista sua excelente aproximação em todos os ensaios.

CONCLUSÕES

O modelo matemático Logarítmico representa satisfatoriamente os dados experimentais para a descrição da cinética de secagem da fruta da palma (Figo da Índia), tendo como padrão as suas médias de Coeficiente de Determinação e Desvio Quadrático Médio. A melhor combinação de variáveis obtida pelo planejamento fatorial para a secagem em estufa com circulação forçada de ar da fruta da palma foi temperatura de 70°C e espessura da fruta palma de 4 mm.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, E. T. et al. Cinética de secagem e qualidade de sementes de feijão. *Engvista, Niterói*, v. 8, n. 2, p. 83-95, 2006.
- BABALIS, S.J.; BELESSIOTIS, V.G. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *Journal of Food Engineering*, v.65, n.3, p. 449-458, 2004.
- BRASIL. Instituto Adolfo Lutz. Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz: Métodos químicos e físicos para análise de alimentos. 4ª ed. Instituto Adolfo Lutz, São Paulo, Brasil, 1018p, 2005.
- CALLEJAS, R.L. et al. Kinetics modeling of the drying of *Opuntia ficus indica* with solar energy. *Revista Mexicana de Física*, v. 59, n.1. p.163–167, 2013.
- CORRÊA, P. C. et al. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, v. 27, n. 2, p. 501-510, 2007.
- COSTA, L. M. et al. Coeficiente de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de sementes de crambe. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande*, v. 15, n. 10, p. 1089-1096, 2011.
- GONELI, A. L. D. et al. Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. *Revista Brasileira de Armazenamento. v. Especial Café*, n. 11, p. 74-80, 2009.
- LIMA, E. E. et al. Cinética de Secagem de Polpa de Facheiro. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande*, v.9, n.1, p.17-28, 2007.
- MADUREIRA, I. A. et al. Cinética de secagem da polpa do figo-da-Índia. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande*, v.14, n. Especial, p.525-534, 2012.
- MARTINAZZO, A. P.; et. al. Modelagem matemática e parâmetros qualitativos da secagem de folhas de capim-limão (*Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf. *Revista Brasileira de Plantas Mediciniais*, v.12. n.4, 2010.
- MELO, K. S. et al. Secagem em Camada de Espuma da Polpa do Fruto do Mandacaru: Experimentação e Ajustes de Modelos Matemáticos. *Revista Caatinga, Mossoró*, v. 26, n. 2, p. 10-17, 2013.
- MOHAMMADI, A. et al. Estimation of Thin layer Drying Characteristics of Kiwifruit (cv. Hayward) with Use of Page's Model. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, v.3, no. 5, p. 802-805, 2008.
- MOHAPATRA, D.; RAO, P.S. A thin layer drying model of parboiled wheat. *Journal of Food Engineering*, v.66, n.4, p.513-8, 2005.
- PÉREZ-ALONSO, C et al. Moisture Diffusion In Allspice (*Pimenta Dioica* L. Merrill) Fruits During Fluidized Bed Drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, V. 35 p. 308–312, 2011.
- PIMIENIA, B. E. El nopal tunero. Univ. de Guadalajara, México, 1990.
- PRATES, M.F.O. et. al; Cinética de secagem de folhas de *Solanum lycocarpum* A. St.-Hil. (fruta-de-lobo); *Rev. Bras. Pl. Med., Botucatu*, v.14, n.3, p.514-521, 2012.
- RAYAGURU, K.; ROURAY, W. Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of stone apple slices. *International Food Research Journal*. V. 19, n.4, p. 1503-1510, 2012.
- SACILIK, K. Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). *Journal of Food Engineering*, v. 79, n. 1, p. 23-30, 2007.

- SANTOS, D. C. et. al. Cinética de secagem de farinha de grãos residuais de urucum. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 17, n. 2, p. 223-231, 2013.
- SILVA, A. S. Avaliação da secagem do bagaço de cajá usando planejamento fatorial composto central, 2008. 70f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- SILVA, L. R. da; ALVES, R. E. Caracterização físico-química de frutos de “mandacaru”. *Revista Acadêmica Ciências Agrárias e Ambientais*, Curitiba, v. 7, n. 2, p. 199-205, 2009.
- SUASSUNA, P. O Projeto Palma no trópico brasileiro. In: *Seminário de Tropicologia. Anais do Seminário de Tropicologia*, Recife: 2004.
- TOUIL, A. et al. Moisture Diffusivity and Shrinkage of Fruit and Cladode of *Opuntia ficus-indica* during Infrared Drying. *Journal of Food Processing*. p. 1-9, 2014.
- VAGENAS, G.K. et al. An analysis of mass transfer in air-drying of foods. *Drying Technology*, v.8, n.2, p.323- 342, 1990.
- YI, X. K. et al. Thin-Layer Drying Characteristics and Modeling of Chinese Jujubes. *Mathematical Problems in Engineering*. p. 1-18, 2012.