

MODELOS DE PREDIÇÃO DA CINÉTICA DE SECAGEM DAS FOLHAS DE *MORINGA OLEÍFERA* LAM

¹Matheus Serrano Medeiros, ²Wilton Pereira da Silva, ¹Daniela Dantas de Farias Leite,
³Gabriel Barbosa Câmara, ¹Patrícia Venâncio da Silva Medeiros

¹Doutorandos em Engenharia Agrícola. UFCG/Campina Grande-PB.

²Engenheiro Eletricista, Professor Doutor, Depto. de Física. UFCG/Campina Grande-PB.

³Graduando em Nutrição. FACISA/Campina Grande-PB.

RESUMO

A folha da moringa é pouco explorada industrialmente, mas com grandes possibilidades de uso. Para tanto, torna-se necessário reduzir o seu teor de água, aumentando então a sua vida útil, o que possibilitará a preservação de suas qualidades, tornando-se uma opção viável de produto com alto valor nutricional. Diante do exposto, este trabalho foi realizado com o objetivo de secar as folhas da moringa em estufa de circulação forçada de ar nas temperaturas de 45, 55, 65 e 75 °C e ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais. Dentre os modelos matemáticos testados, o de Aproximação de difusão apresentou os melhores parâmetros de ajuste, resultando no mais adequado para representar o comportamento da secagem.

Palavras-chave: Moringaceae; desidratação; aproximação de difusão.

ABSTRACT

The moringa leaf is little explored industrially, but with great possibilities of use. To do so, it is necessary to reduce its water content, thus increasing its useful life, which will enable the preservation of its qualities, making it a viable product option with high nutritional value. In view of the above, this work was carried out with the objective of drying the leaves of the moringa in a forced circulation air oven at temperatures of 45, 55, 65 and 75 °C and adjust different mathematical models to the experimental data. Among the mathematical models tested, the Diffusion Approach presented the best adjustment parameters, resulting in the most adequate to represent the drying behavior.

Key words: Moringaceae; dehydration; diffusion approximation.

INTRODUÇÃO

A moringa (*Moringa oleifera* Lam.) é uma planta cruciferante pertencente à família Moringaceae, suas folhas, frutas, flores e vagens são utilizadas como um vegetal em dezenas de países, como: Filipinas, Paquistão, Índia, Havaí e África (HE et al., 2018; KOU et al., 2018). É considerada uma planta de múltiplos usos, devido ao seu alto valor nutricional, sendo fonte de vitaminas, cálcio, ferro e proteínas, podendo ser aproveitada na alimentação humana, suas folhas como verduras cruas, as vagens verdes como verduras cozidas e as sementes maduras podem ser torradas para fabricação de farinha (ALVES et al., 2010).

O interesse por produtos com potencial terapêutico, condimentares e aromáticos vem crescendo a cada dia que passa, tanto no Brasil como no mundo (MARTINAZZO et al., 2007; TABALDI et al., 2012). Devido a esta demanda acaba se tornando essencial, além das práticas agrícolas sustentáveis, o desenvolvimento de técnicas eficientes de secagem para que a biomassa produzida pela planta e suas propriedades químicas possam ser aproveitadas de forma integral e efetiva (TABALDI et al., 2012).

Visto como um dos métodos essenciais no processamento de alimentos, devido, à redução da atividade de água, a secagem visa aumentar a segurança dos alimentos e prolongar a sua vida útil (KOWALSKI; SZADZIŃSKA; LECHTAŃSKA, 2013). O processo de secagem aplicado em plantas medicinais é uma operação que tem como objetivo preparar as plantas para o armazenamento seguro, garantindo a permanência de suas propriedades medicinais, tendo o intuito de atender às necessidades exigidas pelas indústrias farmacêuticas de fitoterápicos (LORENZI e MATOS, 2008).

Os métodos e as condições de secagem devem ser adequados as características de cada tipo de produto. Neste sentido, torna-se necessária a obtenção de informações teóricas sobre o comportamento de cada produto durante a secagem. Tais informações podem ser obtidas por meio da simulação da secagem utilizando modelos matemáticos para descrever o processo de perda de água (MARTINAZZO et al., 2010; RESENDE et al., 2008).

Em estudos sobre a secagem de produtos agrícolas em camada delgada são usados três tipos de modelos sendo eles: o modelo teórico, que considera apenas a resistência interna à transferência de calor e água entre o produto e o ar quente, os modelos semiteóricos e os empíricos, que ponderam somente a resistência externa a temperatura e umidade relativa do ar de secagem (PANCHARIYA et al., 2002). O ajuste de modelos matemáticos aos dados experimentais de secagem e as características de cada espécie, são de grande importância na tomada de decisão e contribuem na melhoria da eficiência do processo de secagem (RADÜNZ et al., 2011).

A utilização de modelos matemáticos para prever o fenômeno de secagem em diversos produtos, incluindo plantas medicinais, tem sido objeto de diversos estudos (GONELI et al., 2014; MARTINAZZO et al., 2010; PONTES et al., 2009; PRATES et al., 2012).

A folha da moringa é pouco explorada industrialmente, mas com grandes possibilidades de uso. Para tanto, torna-se necessário reduzir o seu teor de água, aumentando então a sua vida útil, o que possibilitará a preservação de suas qualidades, tornando-se uma opção viável de produto com alto valor nutricional. Diante disso, o objetivo deste trabalho é avaliar a cinética de secagem das folhas de moringa (*Moringa oleifera* Lam.) em diferentes temperaturas e ajustar diferentes modelos matemáticos aos valores experimentais.

MATERIAL E MÉTODOS

A matéria-prima utilizada foi a moringa (*Moringa oleifera* Lam.), coletadas aleatoriamente na cidade de Campina Grande (PB). As hastes da planta foram retiradas, a fim de evitar interferências nos resultados. Em seguida as folhas foram colocadas em cestas, com 5 g e submetidas ao processo de secagem em estufa de circulação forçada de ar nas temperaturas de 45, 55, 65 e 75 °C. Para o desenvolvimento do experimento, utilizou-se secadores experimentais com quatro bandejas, dotado de um sistema de fluxo de ar forçado e controle preciso de fluxo de ar e a temperatura do ar de secagem.

As cinéticas de secagem foram realizadas pesando-se as cestas com as amostras em intervalos regulares de 5, 10, 20, 30 e 60 min, até atingirem o equilíbrio dinâmico com o ar de secagem, sendo então determinada a massa seca em estufa a 105 °C, de acordo com o Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2008). Todas as medidas foram realizadas em balança analítica com preciso de 0,01 g.

Com os dados experimentais das cinéticas de secagem foram calculadas as razões do teor de água das amostras, de acordo com a Equação 1.

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} \quad (1)$$

Em que:

RX – razão do teor de água da amostra (adimensional);

X – teor de água da amostra em um determinado tempo de secagem (b.s.);

X_i – teor de água inicial da amostra (b.s.);

X_e – teor de água de equilíbrio da amostra (b.s.).

Com os dados coletados foram construídas as curvas de cinética de secagem foram e os modelos matemáticos (Tabela 1) Lewis, Thompson, Page, Henderson e Pabis, Exponencial de Dois Termos, Logarítmico, Aproximação de difusão, Dois Termos e Midilli foram ajustados aos dados experimentais, utilizando-se o programa Statistica 7.7.

Tabela 1- Modelos matemáticos utilizados para ajustar os dados da cinética de secagem

Designação do modelo	Modelo	Referência	Eq.
Lewis	$RX = \exp(-k.t)$	Kaleta e Górnicki (2010)	(2)
Thompson	$RX = \exp\left(\frac{-a-(a^2+4bt)^{0,5}}{2b}\right)$	Sousa et al. (2011)	(3)
Page	$RX = \exp(-k.t^n)$	Galdino et al. (2016)	(4)
Henderson e Pabis	$RX = a \exp(-k.t)$	Galdino et al. (2016)	(5)
Exponencial de Dois Termos	$RX = a \cdot \exp(-k.t) + (1-a) \exp(-k.a.t)$	Ferreira et al. (2012)	(6)
Logarítmico	$RX = a \exp(-k.t) + c$	Diógenes et al. (2013)	(7)
Aproximação de Difusão	$RX = a \cdot \exp(-k.t) + (1-a) \cdot \exp(-k.b.t)$	Faria et al. (2012)	(8)

Dois termos $RX = a \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$ Jittanit (2011) (9)

Midilli $RX = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$ Galdino et al. (2016) (10)

Onde: RX - razão do teor de água, adimensional; a, b, k, n, q – parâmetros dos modelos; t - tempo de secagem, min.

Para avaliar qual modelo produziu o melhor ajuste foram utilizados, como parâmetros, o coeficiente de determinação (R^2) e o desvio quadrático médio (DQM), este último de acordo com a Equação 11.

$$DQM = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (RX_{pred,i} - RX_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

Em que:

DQM - desvio quadrático médio;

RX_{pred} - razão de água predita pelo modelo;

RX_{exp} - razão de água experimental;

n - número de observações realizadas durante o experimento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresentam-se, na Tabela 2, os parâmetros dos modelos matemáticos de Lewis, Thompson, Page, Henderson e Pabis, Exponencial de Dois Termos, Logarítmico, Aproximação de difusão, Dois Termos e Midilli, ajustados aos dados experimentais das cinéticas de secagem das folhas de moringa e seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM).

Verifica-se que os modelos matemáticos testados, com exceção de Thompson, resultaram em bons ajustes aos dados experimentais para a secagem das folhas de moringa, com R^2 superiores a 0,99 e baixos valores de DQM.

Tabela 2 - Parâmetros obtidos, coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM) dos modelos matemáticos ajustados aos dados de secagem das folhas de moringa

Modelo	Parâmetro				
	T (°C)	K		R ²	DQM
Lewis	45	0,048463		0,9978	0,0148
	55	0,082845		0,9982	0,0121
	65	0,072539		0,9977	0,0145
	75	0,072308		0,9990	0,0098
Thompson	T (°C)	A	b	R ²	DQM
	45	0,001791	0,003602	0,9137	0,0930
	55	0,001868	0,004527	0,9471	0,0666
	65	0,002435	0,005150	0,9321	0,0794
Page	75	0,007217	0,010658	0,9385	0,0762
	T (°C)	K	n	R ²	DQM

	45	0,042637		1,042131	0,9981	0,0138	
	55	0,087526		0,978217	0,9983	0,0118	
	65	0,071916		1,003222	0,9977	0,0145	
	75	0,081688		0,954392	0,9993	0,0082	
	T (°C)	A		k	R ²	DQM	
Henderson e Pabis	45	1,016097		0,049409	0,9981	0,0139	
	55	1,000615		0,082903	0,9984	0,0120	
	65	1,001938		0,072700	0,9977	0,0145	
	75	0,994348		0,071827	0,9990	0,0097	
	T (°C)	a		k	R ²	DQM	
Exponencial de dois termos	45	0,003356		14,36811	0,9977	0,0151	
	55	0,581030		0,104797	0,9986	0,0108	
	65	0,999734		0,072539	0,9977	0,0145	
	75	0,563124		0,093900	0,9994	0,0078	
	T (°C)	a	K	c	R ²	DQM	
Logarítmico	45	1,015778	0,049473	0,000472	0,9981	0,0139	
	55	0,995935	0,084481	0,006622	0,9986	0,0109	
	65	1,001085	0,072946	0,001213	0,9978	0,0144	
	75	0,990129	0,073137	0,006220	0,9992	0,0087	
	T (°C)	a	K	b	R ²	DQM	
Aproximação de difusão	45	-0,050585	1,709561	0,030104	0,9985	0,0119	
	55	0,958341	0,088448	0,199998	0,9988	0,0096	
	65	1,029153	0,071381	0,588868	0,9977	0,0145	
	75	0,354168	0,108715	0,542527	0,9994	0,0078	
	T (°C)	a	k0	b	k1	R ²	DQM
Dois termos	45	0,50805	0,04941	0,50805	0,04941	0,9980	0,0139
	55	0,96028	0,08951	0,04587	0,01859	0,9989	0,0095
	65	0,50097	0,07270	0,50097	0,07270	0,9977	0,0145
	75	0,33094	0,11248	0,67098	0,05955	0,9994	0,0077
	T (°C)	a	k	n	b	R ²	DQM
Midilli	45	1,00982	0,04478	1,03019	0,000005	0,9982	0,0135
	55	1,00369	0,08829	0,97679	0,000015	0,9984	0,0116
	65	1,00165	0,07219	1,00283	0,000011	0,9976	0,0144
	75	1,00187	0,08171	0,95580	0,000023	0,9994	0,0080

A: Distribuição aleatória; T: Distribuição tendenciosa

Diante da análise dos parâmetros de ajuste utilizados como requisito para escolher o modelo que melhor ajustou-se aos dados da secagem da folha de moringa primeiramente foi o modelo de Aproximação de difusão, pois foram constatados os menores quadrados médios e maiores coeficientes de determinação para as quatro temperaturas estudadas, o segundo modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais foi o de Dois termos, sendo que no geral, os outros modelos matemáticos possuíram um coeficiente de determinação acima de 0,99 com exceção do modelo de Thompson que apresentou um coeficiente de determinação de 0,9137; 0,9471; 0,9321; 0,9385 para as respectivas temperaturas 45°C, 55°C, 65°C e 75°C.

Carvalho et al. (2015) secou folhas de moringa em três temperaturas (40°C, 50°C e 60°C) e utilizou cinco modelos matemáticos para ajustar aos dados experimentais, e utilizando como base o maior coeficiente de determinação dentre os modelos ajustados o que

obteve melhor resultado foi Midilli, a qual o R^2 para as três temperaturas foi um valor acima de 0,99, sendo um resultado coerente com este trabalho realizados que obteve dados aproximados.

Na secagem de folhas de pata-de-vaca foram utilizadas quatro temperaturas (40°C, 50°C, 60°C e 70°C) e analisou-se treze modelos matemáticos sendo o mais representativo o modelo de Valcam (SILVA et al, 2016). Martins et al (2015) secaram folhas de mororó nas temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C e utilizaram sete modelos matemáticos para determinar o qual melhor se ajustou aos dados experimentais. Foi-se utilizado como critério da determinação do melhor modelo matemático o qual ajustou-se aos dados experimentais foram: coeficiente de determinação (R^2) e desvio quadrático médio (DQM), sendo assim, foi constatado que o modelo de Midilli foi o que melhor descreveu processo de secagem das folhas de mororó no intervalo de temperatura determinado.

As curvas de secagem ajustadas pelo modelo de Aproximação de Difusão são apresentadas na Figura 1. O ajuste foi baseado na equação 8, sendo possível observar o bom ajuste deste modelo na descrição dos dados experimentais. Os critérios levados em consideração de melhor ajuste dos modelos aos dados experimentais foram: coeficiente de determinação (R^2) e desvio quadrático médio (DQM).

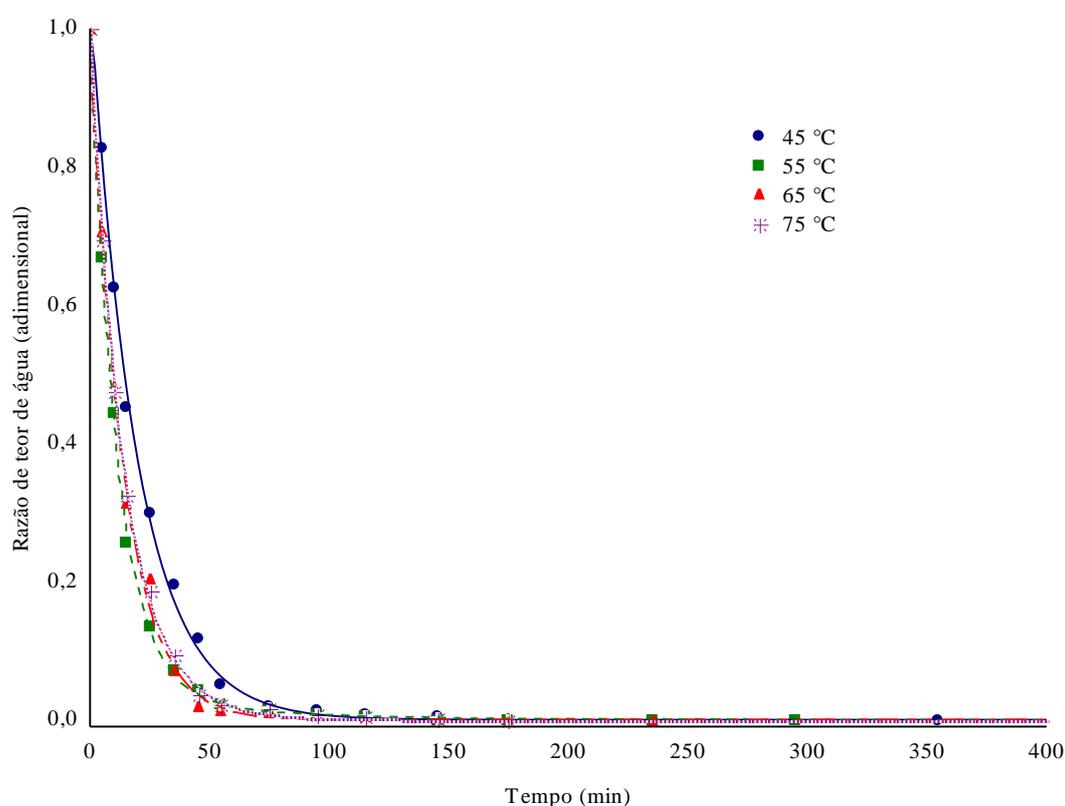


Figura 1 - Cinética de secagem das folhas de moringa ajustadas ao modelo de Aproximação de Difusão, em diferentes temperaturas

Para uma melhor análise do modelo empírico ajustados aos dados experimentais, foi gerada a uma figura comparando os valores observados e estimados da razão de teor de água pelo modelo de Aproximação de difusão durante a secagem das folhas de moringa nas temperaturas entre o intervalo de 45 a 75 °C, em que pode-se verificar a proximidade entre os pontos experimentais e a curva predita pelo modelo matemático.

Para que as folhas de moringa atingissem no final da secagem o teor de água de aproximadamente $0,10 \pm 0,01$ decimal b.s. foram necessárias 355, 295, 235, 175 minutos, respectivamente para as temperaturas 45, 55, 65, 75 °C.

CONCLUSÕES

1. Dentre todos os nove modelos testados o modelo de Aproximação de Difusão foi o que pode ser utilizado para representar a cinética de secagem para as folhas de moringa.
2. Os dados obtidos na cinética de secagem destacam os períodos de taxa decrescente e estacionária durante a secagem das folhas de moringa.
3. Com o aumento da temperatura houve o aumento da perda de água em menor tempo

REFERÊNCIAS

- ALVES, V. N. **Desenvolvimento de uma metodologia de pré-concentração em fluxo utilizando cascas tratadas de *Moringa oleifera* como biadsorvente para determinação de Zn (II) em matrizes alcoólicas.** 2010. 114 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.
- CARVALHO, Y.O.; SILVA, B.R.S.; SOUZA, M.F.; ANDRADE, L.C.T.; SILVA, G.F. Cinética da secagem das folhas de *Moringa oleifera* Lam. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS – ENEMP, 37., 2015, São Carlos. **Anais...** São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2015. p. 1-9. Disponível em: <<http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/cintica-de-secagem-das-folhas-de-moringa-oleifera-lam-20786>>. Acesso em: 20 mar. 2018.
- DIÓGENES, A. M. G.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; SANTOS, D. C. Cinética de secagem de grãos de abóbora. **Revista Caatinga**, v. 26, n. 1, p. 71-80, 2013.
- FARIA, R. Q.; TEIXEIRA, I. R.; DEVILLA, I. A.; ASCHERI, D. P. R.; RESENDE, O. Cinética de secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 5, p. 57-583, 2012.
- FERREIRA, L. F. D.; PIROZI, M. R.; RAMOS, A. M.; PEREIRA, J. A. M. Modelagem matemática da secagem em camada delgada de bagaço de uva fermentado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 6, p. 855-862, 2012.
- GALDINO, P.O.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M.; GALDINO, P. O. Drying kinetics of atemoya pulp. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 7, p. 672-677, 2016.
- GONELI, A. L. D.; VIEIRA, M. C.; VILHASANTI, H. C. B.; GONÇALVES, A. A. Modelagem matemática e difusividade efetiva das folhas de aroeira durante a secagem. **Pesquisa Agropecuária e Tropical**, v. 44, n. 1, p. 56-64, 2014.
- HE, T. B.; HUANG, Y. P.; HUANG, Y.; WANG, X. J.; HU, J. M.; SHENG J. Structural elucidation and antioxidant activity of an arabinogalactan from the leaves of *Moringa oleifera*. **International journal of biological macromolecules**, v. 112, p. 126-133, 2018.
- INSTITUTO ADOLFO LUTZ (São Paulo). **Métodos físico-químicos para análise de alimentos.** São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. 1020p.
- JITTANIT, W. Kinetics and temperature dependent moisture diffusivities of pumpkin seeds during drying. **Kasetsart Journal: Natural Science**, v. 45, n. 1, p. 147-158, 2011.
- KALETA, A.; GÓRNICKI, K. Evaluation of drying models of apple (var. McIntosh) dried in a convective dryer. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 45, n. 5, p. 891-898, 2010.

KOU, X.; LI, B.; OLAYANJU, J. B.; DRAKE, J. M.; CHEN, N. Nutraceutical or pharmacological potential of *Moringa oleifera* Lam. **Nutrients**, v. 10, n. 3, p. 343, 2018.

KOWALSKI, S. J.; SZADZIŃSKA, J.; LECHTAŃSKA, J. Non-stationary drying of carrot: Effect on product quality. **Journal Food Engineering**, v. 118, n. 4, p. 393-399, 2013.

LORENZI, H.; MATOS, F. J. A. **Plantas medicinais no Brasil: Nativas e exóticas**. 2 ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum de Estudos da Flora Ltda., 2008. 544p.

MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MELO, E. C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 3, p. 301-306, 2007.

MARTINAZZO, A. P.; MELO, E. C.; CORRÊA, P. C.; SANTOS, R. H. S. 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, p. 488-498, 2010.

MARTINS, J.J.A.; SOUSA, F.C.; ROCHA, A.P.T.; MARTINS, J.N.; GOMES, J.P. Estudo da cinética de secagem de folhas de *Bauhinia Cheilantha* (Bong.) Steud. (mororó). **Revista Cubana de Plantas Medicinales**, v.20, n.4, p. 397-408, 2015.

PANCHARIYA, P. C.; POPOVIC, D.; SHARMA, A. L. Thin-layer modeling of black tea drying process. **Journal of Food Engineering**, v. 52, n. 4, p. 349-357, 2002.

PONTES, S. F. O.; SANTOS, C. T.; BONOMO, R. C. F.; PONTES, L. V.; FONTAN, R. C. I. Determinação das curvas de secagem em camada delgada de pimenta de cheiro (*Capsicum chinense*) a diferentes temperaturas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 11, n. 2, p. 143-148, 2009.

PRATES, M. F. O.; REIS, R. C.; DEVILLA, I. A.; FARIA, R. Q.; LIMA JUNIOR, A. F. Cinética de secagem de folhas de *Solanum lycocarpum* A. St.-Hil. (fruta-de-lobo). **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v. 14, n. 3, p. 514-521, 2012.

RADÜNZ, L. L.; AMARAL, A. S.; MOSSI, A. J.; MELO, E. C.; ROCHA, R. P. Avaliação da cinética de secagem de carqueja. **Engenharia na agricultura**, v. 19, n. 1, p. 19-27, 2011.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 10, n. 1, p. 17-26, 2008.

SILVA, F.P.; SIQUEIRA, V.C.; JUNQUEIRA, M.H.; MARTINS, E.A.S.; MIRANDA, F.M.N. Cinética de secagem de folhas de bauhinia forficata Link. In: IV CONGRESSO ONLINE DE AGRONOMIA (IV CONVIBRA). [Anais Online]. Road Town, 2016. Disponível em: < http://www.convibra.com.br/upload/paper/2016/83/2016_83_12544.pdf > Acesso em: 20 mar. 2018.

SOUSA, K. A.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H.; COSTA, L. M. Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 4, p. 883-892, 2011.

TABALDI, L. A.; VIEIRA, M. C.; ZÁRATE, N. A. H.; SILVA, L. R.; GONÇALVES, W. L. F.; PILECCO, M.; FORMAGIO, A. S. N.; GASSI, R. P.; PADOVAN, M. P. Cover crops and their effects on the biomass yield of *Serjania marginata* plants. **Ciência Rural**, v. 42, n. 4, p.614-620, 2012.