

## MODELAGEM MATEMÁTICA DAS CURVAS DE SECAGEM DE SEMENTES DE MARACUJÁ 'BRS' PÉROLA DO CERRADO'

### MATHEMATICAL MODELING OF SEED DRYING CURVES OF PASSION FRUIT 'PÉROLA DO CERRADO'

Deyner Damas Aguiar Silva<sup>1</sup>, Igor Leonardo Vespucci<sup>2</sup>, Ivano Alessandro Devilla<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Doutorando em Ciências Agrárias - Instituto Federal Goiano - deynere\_damas@agronomo.eng.br

<sup>2</sup> Doutorando em Agronegócio UFG - igorvespucci@agronomo.eng.br

<sup>3</sup> Engenheiro Agrícola, professor pós-doutor da Universidade Estadual de Goiás (UEG) na Unidade de Ciências Exatas e Tecnol - prp@ueg.br

**Resumo:** o processo de secagem tem papel significativo nas perdas da qualidade do produto, uma vez que seu manejo incorreto ocasiona deterioração do produto, ao longo do armazenamento. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi a determinação e modelagem matemática das curvas de secagem de sementes de maracujá 'BRS' Pérola do Cerrado. Foi utilizado o programa computacional *Statistica* versão 13.0, para ajuste dos modelos utilizados. Foram feitas análises de regressão não linear, pelo método Gauss-Newton. O grau de ajuste de cada modelo considerou a magnitude do coeficiente de determinação, a magnitude do erro médio relativo e do desvio-padrão da estimativa. O tempo necessário para a secagem das sementes de maracujá 'BRS' Pérola do Cerrado até o teor de água de equilíbrio com o ar ambiente foi de 8; 6,5 e 6 horas, para as temperaturas de 30; 40 e 50 °C, respectivamente, evidenciando que o tempo requerido para a secagem dessas sementes, depende da temperatura de secagem. O modelo matemático logarítmico, utilizado para caracterizar a secagem, foi o que melhor representou o processo de secagem das sementes de maracujá ajustando-se satisfatoriamente aos dados experimentais.

**Palavras-chave:** *Passiflora sp.* Cinética de secagem. Teor de água.

**Abstract:** the drying process plays a significant role in the loss of product quality, since its incorrect handling causes deterioration of the product, throughout the storage. Thus, the objective of this work was the determination and mathematical modeling of the drying curves of passion fruit seeds 'BRS' Pérola do Cerrado. Statistica software version 13.0 was used to adjust the models used. Non-linear regression analyzes were performed by the Gauss-Newton method. The degree of fit of each model considered the magnitude of the coefficient of determination, the magnitude of the relative mean error and the standard deviation of the estimate. The time required for drying the passion fruit seeds 'BRS' Pérola do Cerrado to the equilibrium water content with the ambient air was 8; 6.5 and 6 hours, for temperatures of 30; 40 and 50 °C, respectively, evidencing that the time required for the drying of these seeds depends on the drying temperature. The logarithmic mathematical model used to characterize drying was the one that best represented the drying process of passion fruit seeds, adjusting satisfactorily to the experimental data.

**Keywords:** *Passiflora sp.* Kinetics of drying. Water content.

## INTRODUÇÃO

O maracujá (*Passiflora sp.*) é um fruto originário de regiões tropicais com isso, encontra no Brasil excelentes condições para seu cultivo (IBGE, 2009). A cultura do maracujazeiro apresenta grande importância econômica e social para o Brasil, destacando-se como maior produtor mundial, seguido do Peru, Colômbia e Equador (SEAGRI, 2014). A cultivar de maracujazeiro

silvestre BRS Pérola do Cerrado é resultante de um processo de seleção massal de uma população de acessos silvestres de *Passiflora setacea* de diferentes origens visando, principalmente, o aumento de produtividade e aumento do tamanho do fruto, além de resistência às principais doenças (EMBRAPA, 2014).

Conforme (IBGE 2012), o Brasil é o maior produtor mundial de maracujá, produzindo

aproximadamente setecentos e setenta e seis mil toneladas, numa área de 57,8 mil hectares, com o cultivo do maracujá-amarelo em cerca de 95% dos plantios do País, enquanto as outras espécies contribuem com 5% da área plantada. O estado da Bahia lidera a produção nacional, com 320 mil toneladas, numa área de 29 mil hectares de maracujazeiro. Em contrapartida, o estado de Goiás corresponde a oitava maior produção, com 15 mil toneladas em 872 hectares de área.

Os modelos de cálculo da cinética de secagem são aplicados de modo diferente, dependendo do período considerado. Na literatura vários modelos foram propostos para analisar a secagem de produtos higroscópicos (MARTINAZZO et al., 2007). A secagem é uma operação unitária que tem sido utilizada para obtenção de biomassa a fim de aumentar a vida útil, minimizando o crescimento microbiano, deteriorações por reações químicas, além da facilidade de transporte e estocagem pela redução de peso e volume (OLIVEIRA et al., 2010).

Na fase de pós-colheita, a secagem é o processo mais utilizado para assegurar a qualidade e estabilidade do produto considerando que a diminuição da quantidade de água do material reduz a atividade biológica e as mudanças físicas e químicas que ocorrem nos produtos agrícolas durante o armazenamento. No entanto, durante a secagem, em condições de temperatura e umidade relativa do ar com temperaturas elevadas, pode ser comprometida negativamente a qualidade dos produtos (ALMEIDA et al., 2013).

O processo de secagem tem papel significativo nas perdas da qualidade do produto, uma vez que seu manejo incorreto ocasiona

deterioração do produto, ao longo do armazenamento. A temperatura do ar secagem e, conseqüentemente, a taxa de secagem, podem exercer efeito sobre a qualidade final do produto tendo influência no armazenamento (FARONI et al., 2006).

Mediante o exposto, é importante avaliar os aspectos que afetam o processo de pós-colheita para que seja mantida a qualidade do produto até o consumidor final. Existe a necessidade de estudos sobre o comportamento, durante o processo de secagem. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi a determinação e modelagem matemática das curvas de secagem de sementes de maracujá 'BRS' Pérola do Cerrado.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no laboratório de Secagem e Armazenamentos de Produtos Vegetais do Câmpus Anápolis de Ciências Exatas e Tecnológicas - Henrique Santillo, Universidade Estadual de Goiás, na cidade de Anápolis – Goiás. As sementes dos maracujás silvestres 'BRS' Pérola do Cerrado foram obtidas de frutos colhidos no município de Firminópolis – Goiás. Posteriormente a colheita, as sementes foram extraídas manualmente, retirando a mucilagem, foi utilizado óxido de cálcio em sistema de fricção sem que as sementes fossem danificadas.

As amostras utilizadas para secagem tiveram peso padrão a ser determinado no momento da instalação do experimento, de acordo com a capacidade da bandeja (raio de 0,03 m) que tem fundo telado para permitir a passagem do ar através do produto. As sementes foram dispostas

em camada fina, com o objetivo de aproximar o máximo o experimento das condições de trabalho usuais. Anteriormente a realização da secagem das

sementes de maracujá, foi determinado o seu teor de água inicial (% b.u.) utilizando a seguinte expressão (BRASIL, 2009):

$$T.A. (\%) = \frac{100 (P - p)}{P - t} \quad (1)$$

em que,

P = peso inicial, peso do recipiente e sua tampa mais o peso da semente úmida;

p = peso final, peso do recipiente e sua tampa mais o peso da semente seca;

t = tara, peso do recipiente com sua tampa.

O produto foi submetido à secagem em estufa com circulação forçada de ar nas temperaturas de 30; 40 e 50 °C, estas foram colocadas em peneiras removíveis de aço, em uma camada que possibilitou uma cobertura uniforme do fundo telado das mesmas. A temperatura e umidade relativa do ar ambiente, foram monitoradas por meio de um termo-higrômetro digital instalado na sala de secagem. Durante o processo de secagem, as bandejas com as amostras foram pesadas periodicamente, no intervalo de 5 em 5 minutos, aumentando gradativamente o

intervalo de pesagem quando não houvesse variação do peso. A secagem foi finalizada quando, em três pesagens consecutivas não houve variação maior que 0,01g; o que indica o equilíbrio higroscópico. Foi utilizada uma balança semi-analítica com precisão  $\pm 0,01g$ . Aos dados obtidos foram ajustadas 12 equações empíricas e semi-empíricas, frequentemente utilizados para representação da secagem de produtos agrícolas (CORRÊA et al., 2007; MARTINAZZO, 2006), cujas expressões estão apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Modelos de regressão não-linear utilizados para predizer o fenômeno de secagem em camada delgada de sementes de maracujá 'BRS' Pérola do Cerrado.

Designações do modelo	Modelo	
Aproximação por difusão	$RU = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-k b t)$	(2)
Dois Termos	$RU = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	(3)
Exponencial de Dois Termos	$RU = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-k a t)$	(4)
Henderson e Pabis	$RU = a \exp(-k t)$	(5)
Henderson e Pabis Modificado	$RU = a \exp(-k t) + b \exp(-k_0 t) + \exp(-k_1 t)$	(6)
Logarítmico	$RU = a \exp(-k t) + c$	(7)
Midilli	$RU = a \exp(-k t^n) + b t$	(8)
Newton	$RU = \exp(-k t)$	(9)
Page	$RU = \exp(-k \cdot t^n)$	(10)
Thompson	$RU = \exp(( -a - (a^2 + 4 b t)^{0,5}) / 2 b)$	(11)
Verma	$RU = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-k_1 t)$	(12)
Wang e Sing	$RU = 1 + a t + b t^2$	(13)

em que,

RU: razão de umidade do produto (adimensional);

k, k<sub>0</sub>, k<sub>1</sub>: constantes de secagem, h<sup>-1</sup>,

a, b, c, n: coeficientes dos modelos; e

t: tempo de secagem, h.

Para determinar a razão de umidade das sementes de maracujá silvestre para as diferentes condições de secagem, utilizou-se a seguinte expressão:

$$RU = \frac{X - Xe}{Xi - Xe} \quad 14$$

em que,

X: teor de água do produto, decimal (b.u);

Xe: teor de água de equilíbrio do produto, decimal (b.u); e

Xi: teor de água inicial do produto, decimal (b.u).

Foi utilizado o programa computacional *Statistica* versão 13.0, para ajuste dos modelos citados acima (Tabela 1). Foram feitas análises de regressão não linear, pelo método Gauss-Newton. O grau de ajuste de cada modelo considerou a magnitude do coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), a magnitude do erro médio relativo (P) e erro médio estimado (SE). O (P) e o (SE) para cada um dos modelos, foram calculados conforme as seguintes expressões (MARTINAZO, 2006):

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y - \hat{Y}_i|}{Y} \quad 15$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad 16$$

em que,

Y: valor observado experimentalmente;

$\hat{Y}$ : valor estimado pelo modelo;

n: número de observações experimentais;

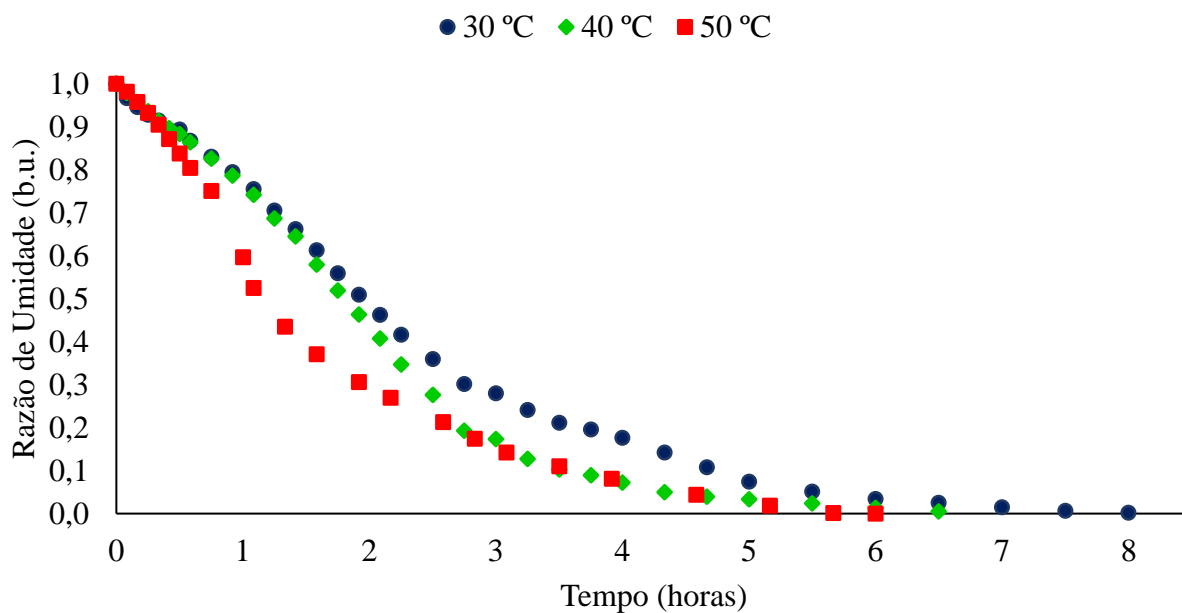
GLR: graus de liberdade do modelo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o processo de terminação das curvas de secagem, a umidade inicial das

sementes de maracujá foi de 70% b.u. Na Figura 1 estão apresentados os valores experimentais das curvas de secagem para as sementes de maracujá estudadas. Nota-se que as sementes apresentaram estabilidade quando a Razão de Umidade (RU), chegou ao valor zero para as três temperaturas em estudo que foram 30; 40 e 50 °C, levando respectivamente 8; 6,5 e 6 horas min.

Com base nos resultados encontrados, observa-se que conforme houve aumento da temperatura de secagem, ocorreu maior retirada de água do produto, tais resultados estão de acordo com pesquisas realizadas com outros produtos, tais como grãos de feijão-caupi (CAMICIA et al, 2015; MORAIS et al, 2013), folhas de capim-limão (MARTINAZZO et al, 2007) e sementes de crambe (FARIA et al, 2012).



**Figura 1.** Pontos experimentais de secagem de sementes de maracujá 'BRS' Pérola do Cerrado para as temperaturas de 30; 40 e 50 °C.

Nas Tabelas 2; 3; e 4, são mostrados os coeficientes de cada modelo matemático na modelagem das curvas de secagem das sementes de maracujá nas temperaturas 30; 40 e 50 °C.

**Tabela 2.** Coeficientes dos modelos matemáticos ajustados da curva de secagem de sementes do maracujá 'BRS' Pérola do Cerrado para a temperatura 30 °C.

Modelo	Coeficientes						
	a	b	c	n	k	k <sub>0</sub>	k <sub>1</sub>
(2)	26,0722	0,9685	-	-	0,1854	-	-
(3)	0,6945	0,3772	-	-	-	0,4205	0,4206
(4)	0,9960	-	-	-	0,3863	-	-
(5)	1,0717	-	-	-	0,4205	-	-
(6)	1,0861	-82,1265	82,0404	-	0,4275	5853,7854	6148,8808
(7)	1,1730	-	-0,1264	-	0,3280	-	-
(8)	0,9751	0,0003	-	1,4479	0,2501	-	-

(9)	-	-	-	-	0,3863	-	-
(10)	-	-	-	1,3695	0,2773	-	-
(11)	-1240,8054	21,8935	-	-	-	-	-
(12)	26,1878	-	-	-	0,1854	-	0,1793
(13)	-0,2942	0,0216	-	-	-	-	-

**Tabela 3.** Coeficientes dos modelos matemáticos ajustados da curva de secagem de sementes do maracujá 'BRS' Pérola do Cerrado para a temperatura 40 °C.

Modelo	Coeficientes						
	a	b	c	n	k	k <sub>0</sub>	k <sub>1</sub>
(2)	26,9471	0,9704	-	-	0,2205	-	-
(3)	0,4185	0,6862	-	-	-	0,5061	0,5064
(4)	0,9932	-	-	-	0,4517	-	-
(5)	1,1048	-	-	-	0,5063	-	-
(6)	1,1286	105,4917	-105,6203	-	0,5190	1163,0932	1224,5242
(7)	1,1875	-	-0,1056	-	0,4100	-	-
(8)	0,9615	0,0017	-	1,8135	0,2330	-	-
(9)	-	-	-	-	0,4516	-	-
(10)	-	-	-	1,6313	0,2789	-	-
(11)	-1028,7023	21,5538	-	-	-	-	-
(12)	27,1293	-	-	-	0,2204	0,2140	-
(13)	-0,3363	0,0273	-	-	-	-	-

**Tabela 4.** Coeficientes dos modelos matemáticos ajustados da curva de secagem de sementes do maracujá 'BRS' Pérola do Cerrado para a temperatura 50 °C.

Modelo	Coeficientes						
	a	b	c	n	k	k <sub>0</sub>	k <sub>1</sub>
(2)	18,6533	0,9678	-	-	0,3243	-	-
(3)	-0,2468	1,2364	-	-	-	4,0425	0,7237
(4)	1,8714	-	-	-	0,8763	-	-
(5)	1,0804	-	-	-	0,6271	-	-
(6)	1,1051	-136,4101	136,3049	-	0,6469	723,6422	761,7686
(7)	1,1162	-	-0,0485	-	0,5623	-	-
(8)	1,0217	0,0012	-	1,2310	0,5297	-	-
(9)	-	-	-	-	0,5652	-	-
(10)	-	-	-	1,2708	0,4991	-	-
(11)	-1071,6247	24,6111	-	-	-	-	-
(12)	18,4463	-	-	-	0,3244	-	0,3138
(13)	-0,4196	0,0436	-	-	-	-	-

Na Tabela 5, são apresentados os valores dos coeficientes de determinação, erros médios, relativo e estimado, para os doze modelos ajustados para a secagem das sementes de maracujá nas temperaturas de 30; 40 e 50 °C.

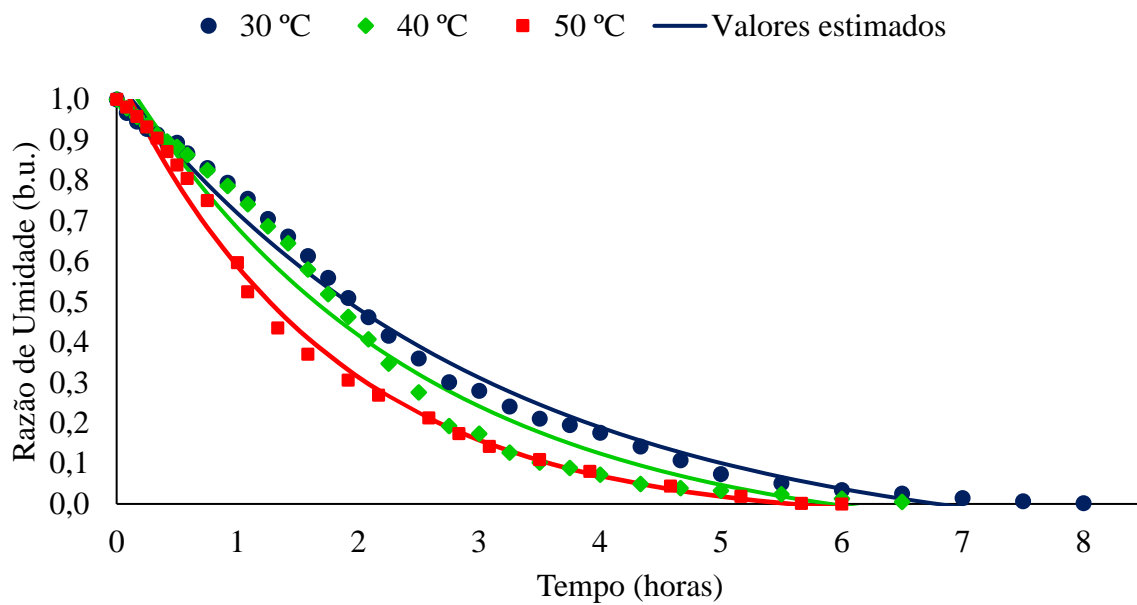
**Tabela 5.** Coeficientes de determinação ( $R^2$ , %), erros médios relativos (P, %), erros médios estimados (SE, decimal) para os doze modelos analisados na secagem de sementes do maracujá 'BRS' Pérola do Cerrado nas temperaturas 30, 40 e 50 °C.

Modelo	30 °C			40 °C			50 °C		
	$R^2$	P	SE	$R^2$	P	SE	$R^2$	P	SE
(2)	98,94	4,96	0,16	97,36	9,57	0,28	98,79	10,18	0,16
(3)	98,31	5,54	0,15	96,97	8,51	0,21	99,76	0,46	0,01
(4)	97,53	1,41	0,05	95,64	1,76	0,06	99,61	2,91	0,06
(5)	98,31	5,54	0,21	96,97	8,51	0,30	99,10	4,49	0,09
(6)	98,46	5,23	0,20	97,26	8,00	0,28	99,37	3,46	0,07
(7)	99,10	0,00	0,00	97,87	0,00	0,00	99,28	0,00	0,00
(8)	99,95	0,07	0,00	99,85	0,17	0,00	99,60	0,37	0,01
(9)	97,53	1,41	0,08	95,64	1,75	0,09	98,18	6,06	0,16
(10)	99,79	2,18	0,08	99,70	2,62	0,09	99,55	3,93	0,08
(11)	97,53	1,42	0,05	95,64	1,74	0,06	99,18	6,06	0,12
(12)	98,94	4,96	0,16	97,36	9,57	0,28	99,79	10,18	0,16
(13)	99,44	2,65	0,10	98,52	6,33	0,22	98,63	2,40	0,05

Observa-se na Tabela 5 que nas três temperaturas utilizadas de secagem das sementes de maracujá, os doze modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais apresentaram coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superiores a 95%, indicando de acordo com Madamba et al. (1996), uma representação satisfatória do processo de secagem. Verifica-se também que os doze modelos exceto os modelos de Aproximação por difusão e Verma para a temperatura de 50 °C, apresentaram a maioria dos valores do erro médio relativo inferiores a 10% para as três temperaturas condições testadas, indicando, de acordo com Mohapatra e Rao (2005), serem adequados para representação do fenômeno. Com relação ao SE, todos os modelos apresentaram valores baixos,

próximos a zero, sendo relevantes para o bom ajuste dos modelos aos dados experimentais.

Baseados nos valores encontrados para o coeficiente de determinação e os erros médios, relativo e estimado o modelo Logarítmico (7) é o mais recomendado, apresentando:  $R^2 = 99,10\%$ ,  $P = 0,00\%$  e  $SE = 0,00$  para 30 °C;  $R^2 = 97,87\%$ ,  $P = 0,00\%$  e  $SE = 0,00$ , para 40 °C e;  $R^2 = 99,28\%$ ,  $P = 0,00\%$  e  $SE = 0,00$  para 50 °C. O modelo de Midilli também representa satisfatoriamente a secagem nas temperaturas estudadas. Na Figura 2 são mostradas as curvas de secagem de sementes de maracujá, experimentais e estimadas pelo modelo matemático Logarítmico, em função do tempo, para as temperaturas em estudo.



**Figura 2.** Curvas experimentais e estimadas, para a equação Logarítmica nas temperaturas estudadas.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O tempo necessário para a secagem das sementes de maracujá 'BRS' Pérola do Cerrado até o teor de água de equilíbrio com o ar ambiente foi de 8; 6,5 e 6 horas, para as temperaturas de 30; 40 e 50 °C, respectivamente, evidenciando que o tempo requerido para a secagem dessas sementes, depende da temperatura de secagem. O modelo matemático Logarítmico, utilizado para caracterizar a secagem, foi o que melhor representou o processo de secagem das sementes de maracujá ajustando-se satisfatoriamente aos dados experimentais.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, D. P.; RESENDE, O.; COSTA, L. M.; MENDES, U. C. Higroscopicidade das sementes de feijão adzuki. **Científica**, Jaboticabal, v. 41, n. 2, p. 130-137, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.15361/1984-5529.2013v41n2p130-137>
- CAMICIA, R. G. M.; CHRIST, D.; COELHO, S. R. M.; CAMICIA, R. F. M. Modelagem do

processo de secagem de sementes de feijão-caupi. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 28, n. 3, p. 206 – 214, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252015v28n323rc>

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Produção de mudas de maracujazeiro silvestre BRS pérola do Cerrado**. Emprapa Cerrados. Planaltina, DF: 2014. 4p.

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.573–583, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012000500014>

FARONI, L. R.; CORDEIRO, I. C.; ALENCAR, E. R.; ROZADO, A. F.; ALVES, W. M. Influência do conteúdo de umidade de colheita e temperatura de secagem na qualidade do feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, p. 148-154, 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662006000100022>

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal:**



- culturas temporárias e permanentes 2012. IBGE. Rio de Janeiro: 2012. v 39.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Tabela de Composição de alimentos**. Rio de Janeiro: IBGE, 2009. 137p.
- MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. The thin layer drying characteristic of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, London, v. 29, n. 1, p. 75-97, 1996. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(95\)00062-3](https://doi.org/10.1016/0260-8774(95)00062-3)
- 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. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662007000300009>
- MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, London, v. 66, n. 4, p. 513-518, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.04.023>
- MORAIS, S. J. S.; DEVILLA, I. A.; FERREIRA, D. A.; TEIXEIRA, I. R. Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 3, p. 455-463, 2013.
- OLIVEIRA, E. G.; DUARTE, J. H.; MORAES, K.; CREXI, V. T.; PINTO, L. A. A. Optimisation of *Spirulina platensis* convective drying: evaluation of phycoyanin loss and lipid oxidation. **International Journal of Food Science and Technology**, v.45, n 8, p. 1572–1578, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02299.x>
- SEAGRI, Secretaria da Agricultura, Pecuária, Irrigação, Pesca e Aquicultura. **Cultura – Maracujá**. Disponível em: <<http://www.seagri.ba.gov.br>>. Acesso em: 23 out. 2015.