



PROCESSO DE SECAGEM DO TRIGO SARRACENO (*Fagopyrum esculentum* Moench): ESTUDO EXPERIMENTAL E MODELAGEM MATEMÁTICA

OLIVEIRA, Maiquiel Schmidt de¹
DI DOMENICO, Camila Nicola Boeri²
KRINDGES, Andrini³
LINK, Lucas⁴

RESUMO

O trigo sarraceno vem ganhando destaque, atualmente, entre os produtos agrícolas, principalmente por suas características nutricionais. Entretanto, informações desses grãos, no que se refere ao processo de secagem, são praticamente inexistentes na literatura da área. Assim, objetivou-se com este estudo, a obtenção das curvas de secagem do trigo mourisco para quatro temperaturas de ar (40, 45, 50 e 55°C), bem como ajustar os dados experimentais por sete modelos matemáticos de secagem. Os resultados obtidos mostraram que a cinética de secagem destes grãos apresenta clara dependência da temperatura do ar, em que o aumento deste parâmetro faz com que a umidade do grão seja removida mais rapidamente. Em relação à modelagem matemática, os modelos de Page e Aproximação da Difusão foram os que apresentaram melhores ajustes, com coeficientes de correlação próximos à unidade e baixos erros médios, quando comparados os dados experimentais aos simulados.

Palavras-chave: Trigo sarraceno; Cinética; Simulação; Modelos Matemáticos.

ABSTRACT

Buckwheat is currently gaining prominence among agricultural products, mainly for its nutritional characteristics. However, information about these grains, regarding the drying process, is practically nonexistent in the literature in the area. Thus, the objective of this study was to obtain the drying curves of buckwheat for four air temperatures (40, 45, 50 and 55°C), as well as to adjust the experimental data by seven mathematical models of drying. The results obtained showed that the drying kinetics of these grains is clearly dependent on the air temperature, in which the increase in this parameter causes the grain moisture to be removed more quickly. Regarding mathematical modeling, the Page and Diffusion Approximation models showed the best adjustments, with correlation coefficients close to the unit and low average errors, when comparing the experimental data to the simulated ones.

Keywords: Buckwheat; kinetic; simulation; mathematical models.

1 INTRODUÇÃO

¹ Departamento Acadêmico de Física, Estatística e Matemática, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Francisco Beltrão / Paraná – Brasil - msoliveira@utfpr.edu.br

² Departamento Acadêmico de Física, Estatística e Matemática, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Francisco Beltrão / Paraná – Brasil - camiladomenico@utfpr.edu.br

³ Graduanda em Engenharia Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Francisco Beltrão / Paraná – Brasil - andrini@alunos.utfpr.edu.br

⁴ Mestre em Ciências Agrárias, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Dois Vizinhos / Paraná – lucas_tlink@hotmail.com

O trigo sarraceno (*Fagopyrum esculentum* Moench), trigo mourisco ou simplesmente trigo preto, apesar do nome, diferencia-se do trigo comum pelo aspecto mais escuro e por não pertencer à mesma família (trigo comum Poaceae e trigo sarraceno Polygonaceae). Por muito tempo foi considerada uma espécie de trigo do mato que não tinha utilidade na culinária, porém com a modernidade e a descoberta de alguns problemas de saúde, como a intolerância ao glúten (doenças celíacas), o cultivar desse pseudo-cereal se tornou muito importante, sendo, hoje em dia, utilizado na fabricação de produtos sem glúten.

A demanda por alimentos livres de glúten não se deve somente ao aumento de pacientes celíacos diagnosticados, que tem como único tratamento a adoção e uma dieta livre de glúten, mas também à recente tendência de redução de consumo de glúten em dieta de pessoas saudáveis (RIBEIRO, 2016).

O processo de armazenamento do produto é de extrema importância para que o mesmo mantenha suas características, sendo, para isso, a secagem um processo imprescindível. Para grãos de trigo, recomenda-se que todas as sementes colhidas ou recebidas com grau de umidade acima de 13% sejam secas até grau de umidade inferior a esta, devendo ser procedida imediatamente após a colheita (EICHELBERGER, 2011). Nesse sentido, secagem dos produtos é o processo mais utilizado para assegurar sua qualidade e sua estabilidade, considerando que a diminuição da quantidade de água do material reduz a atividade biológica e as mudanças químicas e físicas que ocorrem durante o armazenamento (CORRÊA *et al.*, 2007). Além disso, a secagem permite antecipar a colheita, prevenindo possíveis danos à produção devido a condições climáticas. Outro benefício da secagem é a redução de massa e volume, conseqüentemente, o transporte é facilitado e o custo é reduzido.

No desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamentos utilizados para a secagem de grãos, é de fundamental importância à simulação e a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto durante a remoção de água. Para a simulação, cujo princípio se fundamenta na secagem de sucessivas camadas delgadas do produto, utiliza-se um modelo matemático que representa, satisfatoriamente, sua perda de água durante o período de secagem (GINER & MASCHERONI, 2002).

Tradicionalmente, os modelos matemáticos podem ser classificados em empíricos, semiempíricos e teóricos. Os modelos empíricos caracterizam-se por relacionar o teor de umidade e o tempo de secagem com dados obtidos experimentalmente para várias temperaturas, mas negligenciam os processos que ocorrem durante a secagem. Os modelos semiempíricos, também conhecidos como leis exponenciais de secagem, baseiam-se na analogia com a lei de resfriamento de Newton, considerando-se que a taxa de secagem é proporcional a diferença entre o teor de umidade atual e o teor de umidade de equilíbrio. Por fim, os modelos teóricos levam em consideração o transporte de massa e calor dentro do produto, pressupondo o conhecimento das propriedades termo físicas do produto a secar bem como a sua dependência funcional em função da temperatura e do teor de umidade nele contido.

Existem diversos estudos que descrevem a modelagem matemática da cinética de secagem de grãos, dentre eles: trigo parboilizado (MOHAPATRA; RAO, 2005), soja (BOERI, 2007), feijão (CORRÊA *et al.*, 2007), feijão-caupi (MORAIS *et al.*, 2013), amendoim (DI DOMENICO; CONRAD, 2015) e café despulpado (CORADI *et al.*, 2016). Entretanto, poucos são os trabalhos, na literatura da área, envolvendo o processo de secagem do trigo sarraceno.

Quequeto *et al.* (2018) estudaram a contração volumétrica, a porosidade, as massas específicas aparente e unitária dos grãos de trigo mourisco ao longo do processo de secagem, utilizando grãos com teor de água inicial de 0,250. As amostras utilizadas para determinação das propriedades físicas foram submetidas à secagem em estufa com circulação forçada de ar estabilizada à temperatura de 40 ± 1 °C. Os autores concluíram que a redução do teor de água durante a secagem causa o aumento da massa específica aparente e unitária e da porosidade.

Nesse sentido, considerando a importância que estudos de processos de secagem de produtos agrícolas representam para sistemas de armazenamento e beneficiamento, esse trabalho objetiva analisar a cinética de secagem dos grãos de trigo mourisco, realizada em estufa de convecção às temperaturas de 40, 45, 50 e 55°C, bem como modelar matematicamente o processo por meio de diferentes modelos semiempíricos descritos na literatura.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Esse estudo foi desenvolvido no Laboratório de Águas e Efluentes da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Francisco Beltrão.

Foram utilizados grãos de trigo mourisco obtidos através de colheita mecanizada em uma plantação do interior do município de Dois Vizinhos, Paraná. As amostras apresentavam teor de umidade inicial de 18% (b.s).

A secagem do produto foi realizada para diferentes condições controladas de temperatura (40, 45, 50 e 55 °C). Para cada temperatura determinada, foram separadas amostras de 100g do produto, em triplicata. Em todos os ensaios, a redução do teor de água dos grãos foi monitorada por gravimetria, medindo-se a massa da amostra em intervalos regulares de dez minutos na primeira hora de secagem, de vinte minutos na segunda hora e de trinta minutos a partir da terceira hora até o final do processo, utilizando-se balança digital com grau de acurácia de 0,01g. O trigo sarraceno foi seco até que o produto atingisse seu teor de água de equilíbrio com a condição do ar especificada (considerado quando a massa das amostras não apresenta variação significativa em três medições consecutivas).

O teor de água inicial dos grãos foi determinado por gravimetria utilizando-se estufa a 105 ± 3 °C, durante 24 horas, em triplicata, antes de se iniciar cada teste de secagem.

Os dados do teor de umidade da amostra em cada intervalo de tempo foram convertidos para adimensionais, conforme equação 1:

$$RU = \frac{U_t - U_e}{U_0 - U_t} \quad (1)$$

em que:

RU é a razão de umidade (adimensional)

U_t é o teor de umidade instantâneo da amostra (%)

U_e é o teor de umidade de equilíbrio da amostra (%)

U_0 é o teor de umidade inicial da amostra (%)

A partir da literatura da área, modelos semiempíricos foram escolhidos para descrever a cinética de secagem dos grãos de trigo sarraceno, conforme Quadro (1):

Quadro 1 – Modelos semiempíricos utilizados para ajustar as curvas de cinética de secagem do trigo mourisco

Modelo	Descrição	Equação
Exponencial de dois termos	$RU = aexp(-kt) + (1 - a)exp(-kat)$	(2)
Henderson e Pabis	$RU = aexp(-kt)$	(3)
Logarítmico	$RU = aexp(-kt) + c$	(4)
Aproximação da difusão	$RU = aexp(-kt) + (1 - a)exp(-kbt)$	(5)
Newton	$RU = exp(-kt)$	(6)
Wang e Singh	$RU = 1 + at + bt^2$	(7)
Page	$RU = exp(-kt^n)$	(8)

Fonte: Adaptado de Corrêa et al. (2007)

Em que:

t é o tempo de secagem (h);

k é a constante de secagem (h^{-1})

a, b, c e n são os coeficientes dos modelos matemáticos (adimensional)

Para o ajuste dos coeficientes dos modelos matemáticos, foi utilizada regressão não-linear, por meio do algoritmo de Levenberg-Marquardt. Foram estimados os valores dos parâmetros dos modelos, em função da variável independente tempo, para cada temperatura de secagem utilizada experimentalmente.

Os parâmetros utilizados para selecionar o melhor modelo foram: o coeficiente de determinação (R^2) e o erro médio estimado (SE). Segundo Mohapatra e Rao (2005), o erro médio estimado pode ser calculado através da equação (9):

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (Y - Y^{\wedge})^2}{GLR}} \quad (9)$$

Onde:

Y = valor observado experimentalmente;

Y^{\wedge} = valor estimado pelo modelo;

GLR = graus de liberdade do modelo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 1 apresenta as curvas experimentais de secagem dos grãos de trigo mourisco (*Fagopyrum esculentum* Moench), para as temperaturas de 40, 45, 50 e 55°C, expressos através da razão da umidade (umidade adimensional) em função do tempo de secagem dos grãos.

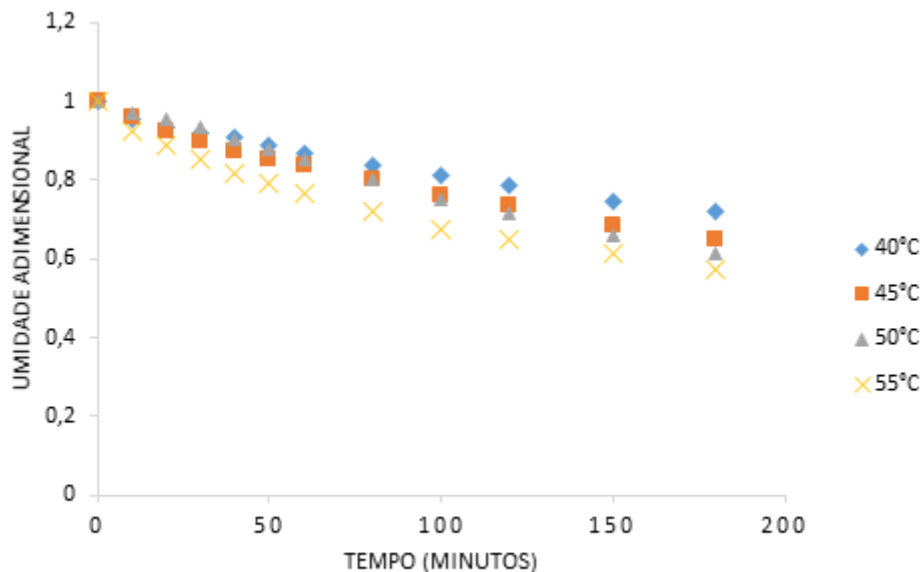


Figura 1: Curvas experimentais de secagem de trigo mourisco (*Fagopyrum esculentum* Moench) para as temperaturas de 40, 45, 50 e 55°C (Fonte: Dados dos autores, 2020)

Todas as curvas de variação da umidade da amostra em relação ao tempo de secagem mostram uma clara tendência exponencial e, como esperado, observou-se que a secagem ocorre mais rapidamente quando há um aumento da temperatura, observando-se que a influência deste parâmetro é bem acentuada na diminuição do teor de umidade da dos grãos de trigo sarraceno. Os resultados experimentais são consistentes com aqueles relatados na literatura para outros grãos, em que a temperatura do ar é considerada o fator mais saliente que afeta a taxa de secagem.

A estimação dos parâmetros e a análise estatística da adequação para cada modelo semiempírico utilizado são mostradas nas tabelas 1 e 2:

PROCESSO DE SECAGEM DO TRIGO SARRACENO (*Fagopyrum esculentum* Moench):
ESTUDO EXPERIMENTAL E MODELAGEM MATEMÁTICA

Tabela 01: Coeficientes dos modelos matemáticos para as temperaturas de 40, 45, 50 e 55°C

Modelo	Temperatura (°C)	Parâmetro				
		a	b	c	k	n
Exponencial dois termos	40	0,0472			0,0344	
	45	0,0569			0,0372	
	50	0,0016			1,6729	
	55	0,0872			0,0332	
Henderson e Pabis	40	0,9754			0,0018	
	45	0,9741			0,0024	
	50	1,0055			0,0028	
	55	0,9463			0,0031	
Logaritmico	40	0,4180		0,5699	0,0056	
	45	0,5046		0,4843	0,0061	
	50	0,0491		0,9572	0,0030	
	55	0,4693		0,5138	0,0106	
Aproximação da difusão	40	0,0366	0,0130		0,1295	
	45	0,0554	0,0405		0,0519	
	50	-0,0099	0,0303		0,0934	
	55	0,1522	0,0626		0,0351	
Newton	40				0,0020	
	45				0,0026	
	50				0,0027	
	55				0,0037	
Wang e Sing	40	0,9858	-0,0022	0,000004		
	45	0,9851	-0,0028	0,000005		
	50	1,0062	-0,0029	0,000003		
	55	0,9718	-0,0041	0,000011		
Page	40					0,7620
	45					0,7891
	50					1,0360
	55					0,6790

Fonte: Dados dos autores (2020)

Tabela 02 - Coeficiente de determinação (R^2) e erro médio estimado (SE, decimal) dos modelos matemáticos analisados para trigo mourisco (*Fagopyrum esculentum* Moench), para as temperaturas de 40, 45, 50 e 55°C

Modelo	Temperatura (°C)	R^2	SE
Exponencial dois termos	40	0,9971	0,00046966
	45	0,9994	0,00015087
	50	0,9984	0,00054034
	55	0,9894	0,00393871
Henderson e Pabis	40	0,9935	0,0104457
	45	0,9946	0,00137025

	50	0,9990	0,0035098
	55	0,9831	0,00625438
Logarítmico	40	0,9979	0,00033773
	45	0,9985	0,00038566
	50	0,9990	0,00034715
	55	0,9981	0,0007005
	40	0,9987	0,00019875
Aproximação da difusão	45	0,9999	0,00002558
	50	0,9992	0,00027992
	55	0,9990	0,0003586
	40	0,9778	0,00343409
Newton	45	0,9847	0,00391243
	50	0,9986	0,00046349
	55	0,9551	0,01641955
	40	0,9989	0,00039022
Wang e Sing	45	0,9997	0,00056736
	50	0,9989	0,00030363
	55	0,9995	0,00157846
	40	0,9989	0,00017187
Page	45	0,9997	0,0006165
	50	0,9989	0,0003599
	55	0,9995	0,00017792

Fonte: Dados dos autores (2020)

Segundo Madamba *et al.* (1996), valores de coeficiente de determinação (R^2) acima de 0,9 são considerados aceitáveis, porém são necessários outros parâmetros para determinar o modelo que melhor se ajusta para cada temperatura. Para isso, foi considerado, também, o valor do erro médio estimado (SE).

Os valores dos coeficientes de determinação (R^2) calculados apontam que os modelos matemáticos utilizados se ajustam com os dados experimentais. Os valores estão próximos de 1,0, sendo que o menor valor foi 0,9551 para o modelo de Newton aplicado a temperatura de 55°C.

Com isso, os valores do erro médio estimativo, que descrevem o valor do desvio-padrão dos valores estimados, se tornam importantes na análise, sendo que observa-se uma grande variabilidade nos valores desse parâmetro.

Os melhores modelos ajustados seguindo esses valores são diferentes para cada temperatura. Para as temperaturas de 40 e 55°C, o modelo que melhor se ajustou foi o de Page e nas temperaturas de 45 e 50°C, o modelo que melhor se adequou foi o de Aproximação da Difusão.

As figuras 2 a 5 apresentam as curvas de secagem experimentais e simuladas pelos modelos mais adequados em cada temperatura do ar.

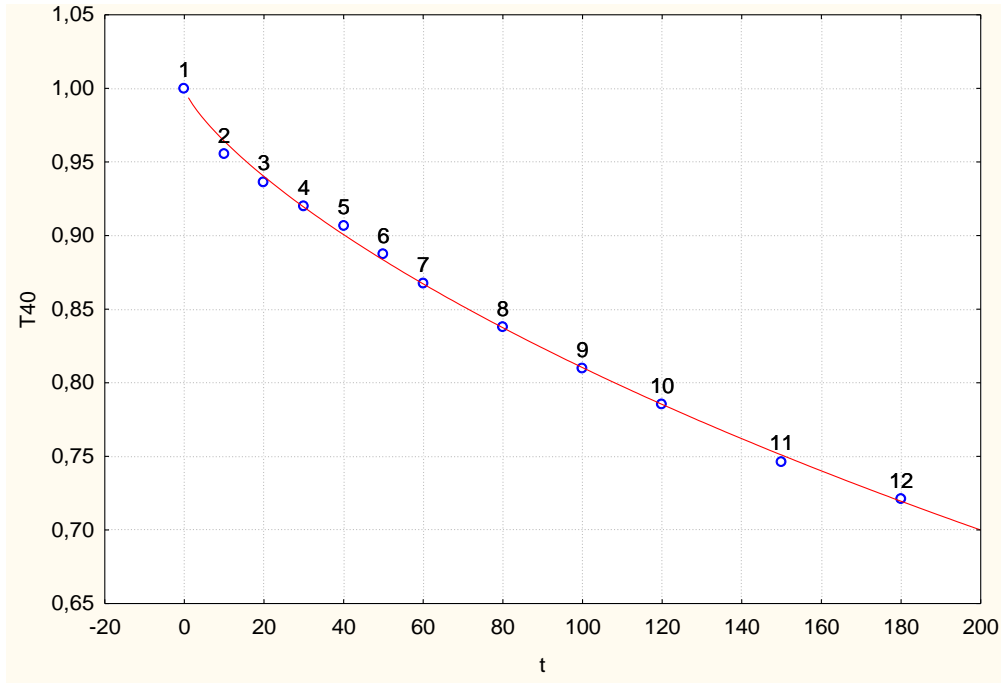


Figura 2: Ajuste da curva pelo modelo de Page para temperatura de 40°C (Fonte: Dados dos autores, 2020)

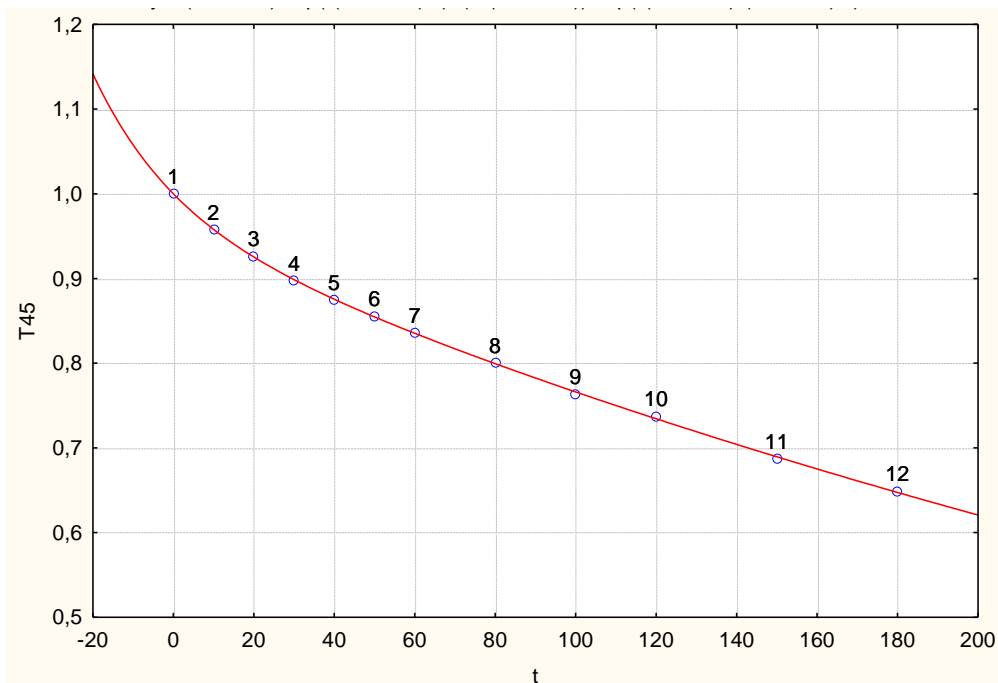


Figura 3: Ajuste da curva pelo modelo de Aproximação da Difusão para temperatura de 45°C (Fonte: Dados dos autores, 2020)

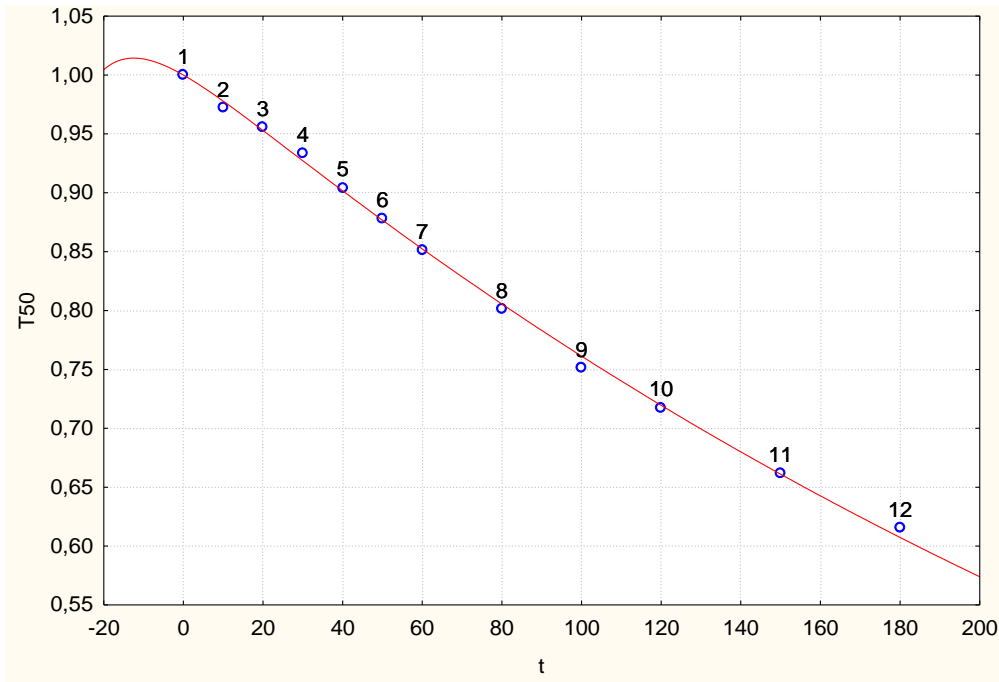


Figura 4: Ajuste da curva pelo modelo de Aproximação da Difusão para temperatura de 50°C (Fonte: Dados dos autores, 2020)

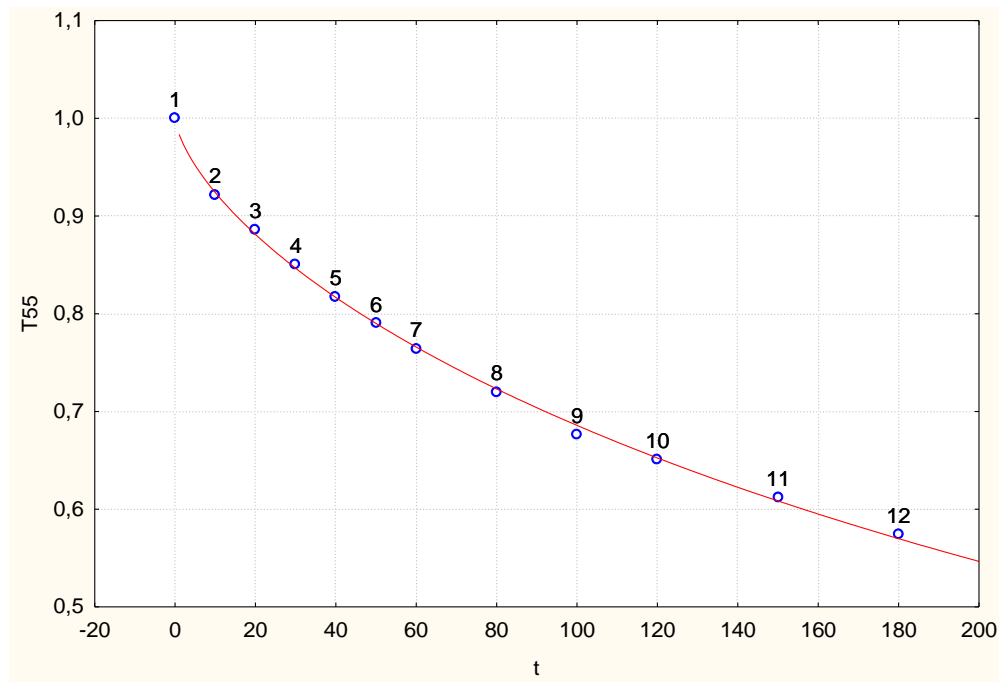


Figura 5: Ajuste da curva pelo modelo de Page para temperatura de 55°C (Fonte: Dados dos autores, 2020)

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Objetivou-se, neste trabalho, a obtenção das curvas experimentais de secagem de grãos de trigo sarraceno, em diferentes temperaturas, e ajustar estes dados por diferentes modelos semiempíricos disponíveis na literatura.

As curvas de secagem apresentadas mostraram que a temperatura do ar é um parâmetro que possui grande influência na cinética do processo, no que tange à retirada da umidade dos grãos de trigo sarraceno.

Em relação à modelagem matemática do processo, os resultados obtidos mostram que os modelos escolhidos representam de forma satisfatória os dados experimentais, apresentando coeficientes de correlação bem próximos de 1, bem como erros médios baixos.

REFERÊNCIAS

- BOERI, C. N. **Modelagem matemática da secagem de grãos de soja em camada fina**. Dissertação de mestrado (Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática), UNIJUI, Ijuí, 2007.
- CORADI, P. C.; BORÉ, F. M.; REINATO, C. H. **Mathematical modeling of drying the pulped coffee (*Coffea arabica* L.) at different air conditions**. Revista brasileira de Tecnologia Agroindustrial, Ponta Grossa, v. 11, n. 2: p. 2397-2419, 2017.
- CORRÊA, P. C. et al. **Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas**. Re-vista de Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 501-510, 2007.
- DI DOMENICO, C. N. B.; CONRAD, T. M. **Simulação de processos de secagem através dos modelos matemáticos Exponencial e de Page**. Vivências: Revista Eletrônica de Extensão da URI. Vol. 11, N. 20, p. 134-146, 2015.
- EICHELBERGER, L. **Produção de sementes de trigo**. In: PIRES, J. L. F.; VARGAS, L.; CUNHA, G. R. da (Ed.). Trigo no Brasil: bases para produção competitiva e sustentável. Passo Fundo: Embrapa Trigo, Cap. 14, p. 349-370, 2011.
- GINER, S.A.; MASCHERONI, R.H. **Diffusive drying kinetics in wheat**. Part 2: applying the simplified analytical solution to experimental data. *Postharvest Technology*, Amsterdam, v.81, n.1, p.85-97, 2002.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. **Grain drying theory I. Temperature effect on drying coefficient.** Journal of Agriculture Engineering Research, v.6, n.3, p.169-174, 1961.

MADAMBA, P. S. et al. **The Thin-layer drying characteristics of Garlic Slices.** Journal of Food Engineering, p. 75 – 99, 1996.

MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. **A thin layer drying model of parboiled wheat.** Journal of Food Engineering, v. 66, n. 4, p. 513-518, 2005.

MORAIS, S.J.S. et al. **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.

PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layer.** Unpublished Masters Thesis, Purdue University, Lafayette, IN, 1949.

QUEQUETO, W. D. et al. **Physical properties of buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) grains during convective drying.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v. 22, n. 11, p. 793-798, 2018.

RIBEIRO, N. J. **Desenvolvimento de cerveja funcional sem glúten a partir de mandioca e trigo sarraceno.** Dissertação de mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

WANG, C.Y.; SINGH, R.P. **A single layer drying equation for rough rice.** ASAE Paper 3001, 1978.