REVISTA DELOS DESARROLLO LOCAL SOSTENIBLE

Cinética da secagem de grãos de sorgo em diferentes temperaturas e teores de água

Kinetics of drying sorghum grains at different temperatures and water content

DOI: 10.55905/rdelosv16.n42-014

Recebimento dos originais: 17/01/2023
Aceitação para publicação: 16/02/2023

Lígia Campos de Moura Silva
Doutora em Ciências Agrária
Instituição: Instituto Federal Goiano
Endereço: Rio Verde – GO, Brasil
E-mail: ligialirios@hotmail.com

Osvaldo Resende
Doutor em Engenharia Agrícola
Instituição: Instituto Federal Goiano
Endereço: Rio Verde – GO, Brasil
E-mail: osvaldo.resende@ifgoiano.edu.br

Weder Nunes Ferreira Júnior
Doutor em Ciências Agrária
Instituição: Instituto Federal Goiano
Endereço: Rio Verde – GO, Brasil
E-mail: weder.nunes@estudante.ifgoiano.edu.br

Luana Profiro de Oliveira
Mestranda em Ciências Agrária
Instituição: Instituto Federal Goiano
Endereço: Rio Verde – GO, Brasil
E-mail: luanapro@hotmail.com

Érika Gonçalves Andrade
Graduada em Agronomia
Instituição: Instituto Federal Goiano
Endereço: Rio Verde – GO, Brasil
E-mail: erikaandrade201518@gmail.com

Diene Gonçalves Souza
Doutora em Ciências Agrária
Instituição: Instituto Federal Goiano
Endereço: Rio Verde – GO
E-mail: diene_gsouza@hotmail.com

REVISTA DELOS DESARROLLO LOCAL SOSTENIBLE

Daniel Emanuel Cabral de Oliveira
Doutor em Ciências Agrária
Instituição: Instituto Federal Goiano
Endereço: Iporá – GO, Brasil
E-mail: daniel.oliveira@ifgoiano.edu.br

RESUMO
Objetivou-se estudar a cinética de secagem de grãos de sorgo para diferentes condições de teores de água iniciais 0,49; 0,40; 0,31; 0,23 kg de água kg^{-1} de matéria seca, e temperaturas de 40, 60, 80 e 100 ºC, bem como ajustar modelos matemáticos e analisar a taxa de remoção de água. A partir do teor de água inicial dos grãos de sorgo de 0,49 (kg de água kg^{-1} de matéria seca) foram obtidos outros três teores de água (0,40; 0,31 e 0,23 kg de água kg^{-1} de matéria seca) por meio da secagem em estufa com temperatura de 40 ºC. Em seguida, os grãos com diferentes teores de água foram submetidos à secagem em estufa com ventilação de ar forçada em quatro condições de temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C. A cinética de secagem dos grãos de sorgo em diferentes teores de água iniciais e temperaturas pode ser descrita pelo modelo de Midilli, não sendo possível a utilização de uma única equação para as diferentes condições de secagem. A temperatura do ar de secagem e o teor de água inicial dos grãos de sorgo influenciam diretamente nos valores da taxa de remoção de água.

Palavras-chave: modelos matemáticos, *sorghum bicolor*, diferentes condições.

ABSTRACT
The objective was to study the drying kinetics of sorghum grains for different conditions of initial water contents 0.49; 0.40; 0.31; 0.23 kg of water kg-1 dry matter, and temperatures of 40, 60, 80 and 100 ºC, as well as to adjust mathematical models and analyze the water removal rate. From the initial water content of the sorghum grains of 0.49 (kg of water kg-1 dry matter) three other water contents were obtained (0.40; 0.31 and 0.23 kg of water kg-1 dry matter) through oven drying at a temperature of 40 ºC. Then, the grains with different water contents were dried in an oven with forced air ventilation in four temperature conditions of 40, 60, 80, and 100 °C. The drying kinetics of sorghum grains at different initial water contents and temperatures can be described by the Midilli model, and it is not possible to use a single equation for the different drying conditions. The drying air temperature and the initial water content of sorghum grains directly influence the values of water removal rate.

Keywords: mathematical models, sorghum bicolor, different conditions.

1 INTRODUÇÃO

Sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) é uma cultura semelhante ao milho em relação ao seu valor agronômico e nutricional. Devido a facilidade de produção e versatilidade, o sorgo tem sido utilizado em outros países como base alimentar de milhares de pessoas. Todavia, no mercado brasileiro, a inserção do sorgo na alimentação humana é ainda recente (Paiva et al., 2018).

Esse cereal é uma excelente fonte de nutrientes, especialmente de carboidratos, fibras (Queiroz et al., 2015), minerais (Paiva et al., 2017), apresentam efeitos antioxidantes e anti-inflamatório (Hong et al., 2020) e pode ser utilizado em diferentes formulações de cookies em substituição à farinha de arroz (Célia et al., 2022).

De maneira geral, os vegetais apresentam elevados valores de teor de água, que favorece a deterioração, contaminação e perdas econômicas (Souza et al., 2011). O processamento utilizando a secagem pode aumentar a vida útil e evitar a deterioração dos alimentos (Moradi et al., 2020). Este processo é de extrema importância na tecnologia de alimentos, pois permite o manuseio de produtos de alta qualidade, preservando suas propriedades físicas e químicas e reduzindo o teor de água a valores adequados para armazenamento (Jorge et al., 2021).

Assim, é de fundamental importância o emprego de modelos matemáticos para representar o processo de secagem, haja vista que as informações geradas são relevantes para o desenvolvimento de equipamentos e a predição dos tempos de secagem. A representação matemática da secagem de diversos produtos agrícolas vem, já há algum tempo, sendo estudada e utilizada na tentativa de predizer os fenômenos que ocorrem durante este processo, sendo representada pelas curvas e taxas de secagem (Silva, 2018).

Diante o exposto, objetivou-se estudar a cinética de secagem de grãos de sorgo em diferentes condições de teores de água iniciais 0,49; 0,40; 0,31; 0,23 kg de água kg^{-1} de matéria seca, e temperaturas de 40, 60, 80 e 100 ºC, bem como ajustar modelos matemáticos e analisar a taxa de remoção de água.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Laboratório de Pós-Colheita de Produtos Vegetais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus Rio Verde. Os grãos de sorgo (cultivar Dekalb 640) foram colhidos manualmente, no município de Jataí - GO, com teor de água inicial de (0,49 kg de água kg^{-1} de matéria seca). As impurezas foram removidas com auxílio de peneiras de classificação de 3,00 mm de crivos circulares e oblongos de 3,00 x 22,00 mm e, posteriormente, os grãos foram homogeneizados em equipamento tipo Boerner.

A partir do teor de água inicial dos grãos foram obtidos outros três teores de água pela secagem em estufa com temperatura de secagem de 40 ºC, por meio de gravimetria até os teores de água estipulados de 0,40; 0,31; 0,23 (kg de água kg^{-1} de matéria seca). Em seguida, os grãos

com diferentes teores de água foram submetidos à secagem em estufa com ventilação de ar forçada nas quatro condições de temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C, e umidades relativas de 18,23; 6,75; 2,84 e 1,32%, respectivamente. Os grãos foram inseridos em bandejas perfuradas de aço inox de 0,25 m de diâmetro, perfazendo uma camada de 0,04 m contendo em cada bandeja 0,25 kg de amostra. As temperaturas do ar de secagem e ambiente foram monitoradas por meio de um termômetro no interior e exterior da estufa, sendo a umidade relativa no interior da estufa obtida por meio dos princípios básicos de psicrometria, com o auxílio do programa computacional GRAPSI.

O teor de água ao longo da secagem foi acompanhado pelo método gravimétrico (perda de massa), com auxílio de uma balança analítica com resolução de 0,01 g, conhecendo-se o teor de água inicial do produto, até atingir o teor de água desejado.

O processo de secagem foi interrompido quando os grãos de sorgo granífero atingiram o teor de água final de 0,14±0,007 kg de água kg^{-1} de matéria seca, determinado em estufa a 105 ± 1 °C, durante 24 horas, em três repetições (Brasil, 2009).

Para a determinação das razões de teor de água dos grãos de sorgo durante a secagem utilizou-se a seguinte expressão:

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

Em que,
RX - Razão de teor de água;
X -Teor de água do produto (kg de água kg^{-1} de matéria seca);
Xi - Teor de água inicial do produto (kg de água kg^{-1} de matéria seca);
Xe - Teor de água de equilíbrio do produto (kg de água kg^{-1} de matéria seca).

Os teores de água de equilíbrio dos grãos de sorgo foram de 0,0742; 0,0323; 0,0146 e 0,0044 kg de água kg^{-1} de matéria seca, para as temperaturas de 40, 60, 80 e 100 ºC, respectivamente. Os modelos matemáticos descritos na Tabela 1 foram ajustados aos dados experimentais da secagem dos grãos de sorgo, a partir dos diferentes teores de água iniciais.

Tabela 1 - Modelos matemáticos utilizados para predizer a secagem dos grãos de sorgo

Designação do modelo	Modelo	
$RX = \exp(-k \cdot t)$	Newton	(2)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	Henderson e Pabis	(3)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$	Logarítmico	(4)
$RX = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$	Wang e Sing	(5)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	Midilli	(6)
$RX = \exp(-k \cdot t^n)$	Page	(7)

Em que: t - tempo de secagem, h; k, k_o, k_1 - constantes de secagem h^{-1}; e a, b, c, n -coeficientes dos modelos.

Os modelos matemáticos foram ajustados, a partir de análise de regressão não-linear pelo método Gauss Newton. Os coeficientes dos modelos foram avaliados pelo teste t adotando o nível de 5% de significância. O grau de ajuste de cada modelo foi verificado pelas magnitudes do coeficiente de determinação (R^2), do erro médio relativo (P) e o teste de *Qui*-quadrado (χ^2) ao nível de significância de 0,01% e o intervalo de confiança a 99% (P < 0,01). O erro médio relativo e o teste de *Qui*-quadrado para cada um dos modelos, foram calculados conforme as seguintes expressões:

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{\left|Y - \hat{Y}\right|}{Y} \quad (8)$$

$$\chi^2 = \sum \frac{(Y - \hat{Y})^2}{GLR} \quad (9)$$

em que,
Y -Valor experimental;
$\hat{Y}$ - Valor estimado pelo modelo;
n -número de observações experimentais;
GLR - graus de liberdade do modelo (número de observações menos o número de parâmetros do modelo).

Na seleção de um único modelo para descrição do processo de secagem em cada condição, aqueles que tiveram os melhores ajustes foram submetidos aos critérios de seleção da Informação de Akaike (AIC) e Informação Bayesiano de Schwarz (BIC), conforme seguintes expressões:

$$AIC = -2\log like + 2p \quad (10)$$

$$BIC = -2\log like + p \cdot \ln(n) \quad (11)$$

Em que,
p - Número de parâmetros;
Log*like*: Valor do logaritmo da função de verossimilhança considerando as estimativas dos parâmetros.

Para a avaliação da secagem dos grãos de sorgo em diferentes condições, procedeu-se à determinação da taxa de redução de água do produto por unidade de tempo, de acordo com a expressão descrita:

$$TRA = \frac{Ma_0 - Ma_i}{Ms \cdot (t_i - t_0)} \quad (12)$$

Em que,
TRA - Taxa de redução de água (kg kg^{-1} h^{-1});
Ma_0- Massa de água total anterior (kg);
Ma_i- Massa de água total atual (kg);
Ms- Matéria seca (kg);
t_0- Tempo total de secagem anterior (h);
t_i- Tempo total de secagem atual (h).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em relação ao erro médio relativo (P), para todas as condições de secagem, os valores encontrados para os modelos ajustados estiveram abaixo de 5,10% (Tabela 2). De acordo com Mohapatra & Rao (2005) modelos que apresentam valores de erro médio relativo superior a 10% são inadequados para representar o processo de secagem.

Tabela 2. Parâmetros estatísticos: erro médio relativo (P, %), teste *Qui*-quadrado (χ^2, decimalx10^{-4})e coeficiente de determinação (R^2, %) para os modelos (Mod.) ajustados às curvas de secagem dos grãos de sorgo em diferentes condições

Mod.	40 ºC			60 ºC			80 ºC			100 ºC		
	P	**χ^2**	**R^2**	**P**	**χ^2**	**R^2**	**P**	**χ^2**	**R^2**	**P**	**χ^2**	**R^2**
---------- **0,23 kg de água kg^{-1} de matéria seca** ----------												
2	1,51	2,083	99,46	0,62	0,437	99,82	1,80	4,355	98,37	1,00	2,073	99,45
3	0,75	0,798	99,81	0,48	0,377	99,86	1,54	4,024	98,80	1,00	2,026	99,60
4	0,78	0,681	99,82	0,39	0,263	99,24	1,18	1,946	99,27	1,02	1,504	99,60

5	1,55	1,885	99,47	0,39	0,236	99,91	1,17	1,673	99,25	0,94	1,370	99,55
6	0,47	0,315	99,92	0,38	0,295	99,89	1,14	2,399	99,28	0,36	0,375	99,92
7	0,83	0,575	99,84	0,35	0,241	99,89	1,09	1,649	99,26	0,97	1,115	99,63
----------0,31 kg de água kg^{-1} de matéria seca ----------												
2	3,08	5,715	99,10	2,31	3,884	99,09	2,24	4,379	98,94	2,89	8,377	98,27
3	1,04	1,162	99,82	2,17	3,987	99,16	2,01	4,025	99,16	2,10	5,590	99,04
4	0,92	0,864	99,86	2,10	3,221	99,24	0,38	0,197	99,95	0,95	0,915	99,81
5	3,35	6,012	99,00	2,45	3,908	98,99	0,46	0,242	99,93	1,08	1,104	99,73
6	0,82	0,377	99,94	1,77	3,023	99,36	0,24	0,114	99,97	0,29	0,116	99,98
7	1,31	0,931	99,84	2,24	3,476	99,10	1,09	1,019	99,71	0,36	0,132	99,96
----------0,40 kg de água kg^{-1} de matéria seca ----------												
2	3,31	4,068	99,43	1,74	2,261	99,51	2,77	5,211	99,15	2,29	4,739	99,21
3	2,03	1,752	99,79	1,53	1,782	99,62	1,86	3,531	99,49	1,51	3,107	99,55
4	2,19	1,619	99,80	0,55	0,289	99,93	1,53	1,714	99,72	1,55	1,854	99,69
5	5,10	6,642	98,95	0,71	0,401	99,90	1,51	1,518	99,72	1,58	1,798	99,65
6	1,03	0,387	99,95	0,40	0,282	99,94	1,29	1,187	99,83	0,42	0,230	99,96
7	2,85	1,412	99,83	1,09	0,760	99,82	1,32	0,760	99,81	1,32	0,760	99,81
----------0,49 kg de água kg^{-1} de matéria seca ----------												
2	2,58	4,346	99,51	3,14	4,674	99,26	4,79	11,78	98,53	3,48	6,433	99,13
3	2,29	1,932	99,79	3,04	4,732	99,31	1,86	3,531	99,49	2,42	4,179	99,51
4	2,07	1,723	99,80	2,27	3,024	99,52	1,69	2,381	99,70	1,21	1,009	99,86
5	3,13	6,732	99,21	3,09	5,335	99,09	1,92	2,696	99,62	1,15	0,903	99,88
6	2,37	1,514	99,83	1,61	1,623	99,76	0,98	0,892	99,90	0,60	0,272	99,98
7	3,03	6,436	99,66	3,13	4,277	99,27	0,99	0,897	99,87	0,69	0,239	99,95

O erro médio relativo é originário da diferença entre os valores experimentais e estimados pelo modelo, portanto menores valores para este parâmetro indicam melhores ajustes aos dados experimentais. Observando-se os valores do erro médio relativo na Tabela 2 nota-se que com exceção das condições de secagem nos teores de água iniciais de 0,23 (60 e 80 ºC) e 0,49 (40 ºC) kg de água kg^{-1} de matéria seca, o modelo de Midilli (6) apresentou os menores valores para o erro médio relativo.

Em relação aos valores de *Qui*-quadrado (Tabela 2) observa-se a variação de 0,114 a 11,78 x10^{-5}. Menores valores para o teste de *Qui*-quadrado indicam melhores ajustes dos dados estimados às condições reais do fenômeno em estudo (Oliveira et al., 2018). De modo geral, o modelo de Midilli (6) apresentou os menores valores para o teste de *Qui*-quadrado.

O coeficiente de determinação (R^2) dos modelos matemáticos para a secagem dos grãos de sorgo em diferentes condições apresentaram-se superiores a 98% (Tabela 2). O modelo de Midilli (6) se destaca apresentando maiores valores.

Na Tabela 3 estão apresentados os valores dos parâmetros AIC e BIC, que têm sido utilizados para seleção de modelos matemáticos em processos pós-colheita de produtos vegetais (Gomes et al., 2018; Ferreira Junior et al., 2018; Souza et al., 2019; Quequeto et al., 2019).

De acordo com os critérios AIC e BIC o modelo de Midilli (6) apresenta menores valores, indicando melhor ajuste dos dados estimados as condições experimentais (Tabela 3). Os princípios destes testes sugerem que a escolha do modelo seja para aquele que apresenta menores valores para estes parâmetros. Gomes et al. (2018) utilizaram os critérios de AIC e BIC com sucesso para escolher apenas um modelo dentre aqueles que apresentaram melhores resultados para os demais parâmetros analisados.

Os resultados dos parâmetros AIC e BIC estão de acordo com os critérios de ajustes de P, *Qui*-quadrado e R^2, indicando que o modelo de Midilli (6) melhor se ajusta as diferentes condições de secagem dos grãos de sorgo. Este resultado corrobora aqueles obtidos por Botelho et al. (2015) que recomendaram também o modelo de Midilli para estimar as curvas de secagem de grãos de sorgo de duas cultivares BRS 308 e NIDERA A 9721 nas temperaturas de 40, 50 e 60 ºC.

Tabela 3. Valores dos critérios de informação de Akaike (AIC) e critérios de informação bayesiano de Schwarz (BIC) para o ajuste dos modelos utilizados para predizer a secagem dos grãos de sorgo em diferentes condições.

Modelos	40 °C				60 °C				80 °C				100 °C			
	A		B		A		B		A		B		A		B	
	IC		IC		IC		IC		IC		IC		IC		IC	
	---------- 0,23 kg de águakg^{-1} de matéria seca----------															
2	-89,38		-87,84		-86,15		-85,18		-38,71		-38,55		-38,91		-39,01	
3	-86,99		-85,54		-86,99		-85,54		-39,13		-38,89		-38,98		-39,14	
4	-103,47		-100,38		-88,00		-86,06		-40,03		-40,31		-37,03		-37,25	
5	-87,80		-85,48		-89,78		-88,33		-40,77		-40,53		-38,15		-38,31	

6	- 115.60	- 111.74	- 89.78	- 88.55	- 39.14	- 38.75	- 45.18	- 45.45
7	- 106.90	- 104.90	- 90.00	- 88.60	- 40.91	- 40.67	- 39.50	- 39.66
---------- **0,31 kg de água kg^{-1} de matéria seca** ----------								
2	- 91.92	- 89.93	- 63.17	- 60.34	- 48.74	- 48.14	- 37.52	- 37.13
3	- 122.95	- 119.97	- 63.46	- 61.77	- 49.25	- 48.34	- 40.78	- 40.19
4	- 125.43	- 121.45	- 62.94	- 60.68	- 76.45	- 75.24	- 53.23	- 52.44
5	- 87.63	- 84.65	- 61.23	- 59.54	- 75.24	- 74.33	- 52.28	- 51.69
6	- 141.58	- 136.60	- 64.50	- 63.37	- 81.21	- 79.69	- 68.31	- 67.32
7	- 124.78	- 121.79	- 62.67	- 60.98	- 60.37	- 59.46	- 66.24	- 65.65
---------- **0,40 kg de água kg^{-1} de matéria seca** ----------								
2	- 120.12	- 117.69	- 77.29	- 76.01	- 51.29	- 50.49	- 53.23	- 52.43
3	- 143.33	- 139.67	- 78.69	- 76.77	- 55.10	- 53.91	- 55.38	- 54.19
4	- 142.17	- 137.30	- 102.17	- 99.61	- 59.20	- 57.61	- 53.38	- 51.79
5	- 103.07	- 99.42	- 97.83	- 95.92	- 61.12	- 59.92	- 56.42	- 55.22
6	- 176.78	- 170.68	- 101.71	- 98.52	- 65.50	- 64.30	- 82.51	- 80.52
7	- 149.24	- 145.59	- 89.51	- 87.59	- 62.58	- 60.60	- 56.04	- 54.84
----------**0,49 kg de água kg^{-1} de matéria seca** ----------								
2	- 141.54	- 138.80	- 71.57	- 70.16	- 46.21	- 45.24	- 44.60	- 44.00
3	- 164.22	- 160.12	- 70.70	- 68.58	- 52.32	- 50.86	- 48.51	- 47.60
4	- 164.35	- 158.88	- 73.93	- 71.10	- 61.25	- 59.31	- 58.31	- 57.10
5	- 125.70	- 121.59	- 66.35	- 64.22	- 60.53	- 59.08	- 59.95	- 59.04
6	- 167.19	- 160.36	- 82.93	- 78.93	- 71.46	- 69.04	- 69.20	- 67.68
7	- 150.65	- 146.55	- 69.72	- 67.60	- 69.11	- 67.66	- 67.65	- 65.74

Em relações aos coeficientes do modelo de Midilli não foi possível observar tendência clara (Tabela 4) para as condições de secagem em estudo, corroborando com resultados obtidos por Sousa et al. (2011) no processo de secagem do nabo forrageiro. Nota-se que para constante k, com exceção da secagem do teor de água inicial de 0,31 kg de água kg^{-1} de matéria seca, houve tendência linear crescente dos valores em função da temperatura do ar de secagem.

Tabela 4 - Parâmetros do modelo Midilli ajustados para as diferentes condições de secagem de grãos de sorgo, com a respectiva equação em função da temperatura.

Parâmetros	Temperatura (°C)			
	40	60	80	100
---------- **0,23 kg de água kg^{-1} de matéria seca** ----------				
a	1,0000**	1,0007**	1,0028**	1,0007**
k	0,1268**	0,1857**	0,2483^{ns}	1,0630**
n	0,7981**	1,0132**	1,0934**	1,2518**
b	-0,0202**	-0,0125^{ns}	-0,0911^{ns}	0,2297**
---------- **0,31 kg de água kg^{-1} de matéria seca** ----------				
a	0,9962**	0,9995**	1,0000**	1,0004**
k	0,1341**	0,1224^{ns}	0,0305^{ns}	0,6159**
n	0,7164**	0,6694^{ns}	0,4148^{ns}	1,2853**
b	-0,0226**	-0,0857^{ns}	-0,2578**	0,0395**
---------- **0,40 kg de água kg^{-1} de matéria seca** ----------				
a	1,0034**	1,0000**	0,9979**	0,9957**
k	0,1334**	0,2578**	0,4266**	0,7615**
n	0,7876**	1,0196**	1,1864**	1,3028**
b	-0,0074**	0,0216**	0,0201^{ns}	0,0939**
----------**0,49 kg de água kg^{-1} de matéria seca** ----------				
a	0,9845**	1,0057**	0,9992**	0,9993**
k	0,0957**	0,1295**	0,3721**	0,5879**
n	0,8843**	0,6570**	1,2539**	1,1854**
b	-0,0039**	-0,0528**	0,0153^{ns}	0,0134^{ns}

**Significativo a 1% pelo teste t.^{ns} não significativo pelo teste t.

O aumento da constante k em função do acréscimo da temperatura do ar de secagem foi observado na secagem de milho (Oliveira et al., 2012; Coradi et al., 2015), folhas de timbó (Martins et al., 2015), frutos de amendoim (Araújo et al., 2017), sementes de melão (Silva et al., 2018).

A constante k pode ser utilizada como uma aproximação para caracterizar o efeito da temperatura, e está relacionada à difusividade efetiva no processo de secagem no período decrescente, sendo a difusão líquida que controla o processo (Babalis & Belessiotis, 2004). A relação da constante k com a temperatura do ar de secagem para os teores de água iniciais de 0,23; 0,31; 0,40 e 0,49 kg de água kg^{-1} de matéria seca, são descritas pelas Eqs. 13, 14, 15 e 16, respectivamente.

$$k = 0{,}0144T - 0{,}599 \quad (R^2 = 70{,}70\%) \tag{13}$$

$$k = 0{,}0068T - 0{,}248 \quad (R^2 = 43{,}74\%) \tag{14}$$

$$k = 0{,}0103T - 0{,}324 \quad (R^2 = 94{,}69\%) \tag{15}$$

$$k = 0{,}0086T - 0{,}305 \quad (R^2 = 93{,}04\%) \tag{16}$$

A relação da constante k para o teor de água de 0,31 kg de água kg^{-1} de matéria seca (Eq. 14) apresenta ajuste de equação linear com baixo valor de R^2; portanto, a relação da constante de secagem para esse teor de água não segue uma tendência clara.

Apesar das equações lineares em função da temperatura de secagem para a constante k, não foi possível a sua inclusão no modelo de Midilli para facilitar a estimativa da secagem do sorgo em diferentes temperaturas de secagem com apenas uma equação para cada teor de água inicial, pois a utilização das médias dos coeficientes a, n e b apresentaram valores superiores a 89% para o erro médio relativo.

A inexistência da tendência linear da constante k para o teor de água inicial de 0,31 kg de água kg^{-1} de matéria seca (Eq. 14) deve-se ao fato deste coeficiente não ter sido significativo pelo teste de t para as temperaturas de 60 e 80 ºC (Tabela 4). De um modo geral, observou-se que tanto para a constante k e também para os coeficientes a, n e b aqueles em que os valores não foram significativos, apresentaram-se maiores desvios e erros das estimativas.

Porém, mesmo com estas limitações, o modelo de Midilli apresentou melhor ajuste de acordo com os parâmetros estatísticos testados (P, χ^2, R^2, AIC e BIC). Outros estudos de cinética de secagem obtiveram ajustes de modelos com estimativas dos parâmetros não significativas (Sousa et al., 2011; Siqueira et al., 2012; Quequeto et al., 2019).

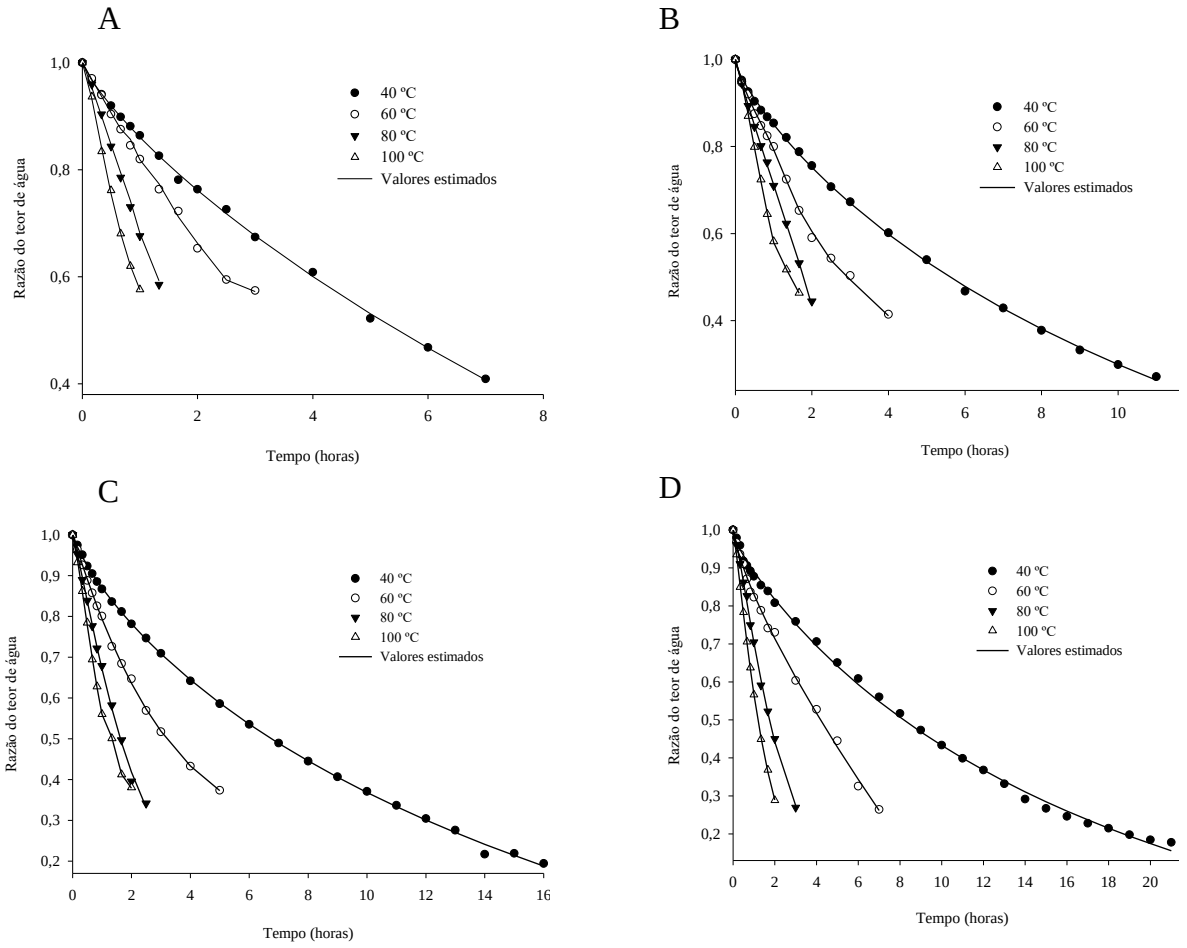
Em relação aos diferentes teores de água iniciais para a mesma temperatura do ar de secagem, também não houve tendência clara da constante k corroborando com Babalis &

Belessiotis, (2004). Faria et al. (2012) também não observaram tendência da constante k em função do teor de água para uma mesma temperatura na secagem de sementes de crambe com os teores de água iniciais variando de 0,11 a 0,28 kg de águakg^{-1} de matéria seca, e temperaturas do ar de secagem de 30, 40, 50, 60 e 70 ºC.

Substituindo-se os valores dos parâmetros do modelo de Midilli da Tabela 4, na equação do modelo (Eq. 6), têm-se a representação da cinética da secagem dos grãos de sorgo em diferentes condições (Figura 1). O modelo de Midilli também foi recomendado para estimar as curvas de secagem de diversos produtos agrícolas (Sousa et al., 2021; Camicia et al., 2015; Botelho et al., 2018).

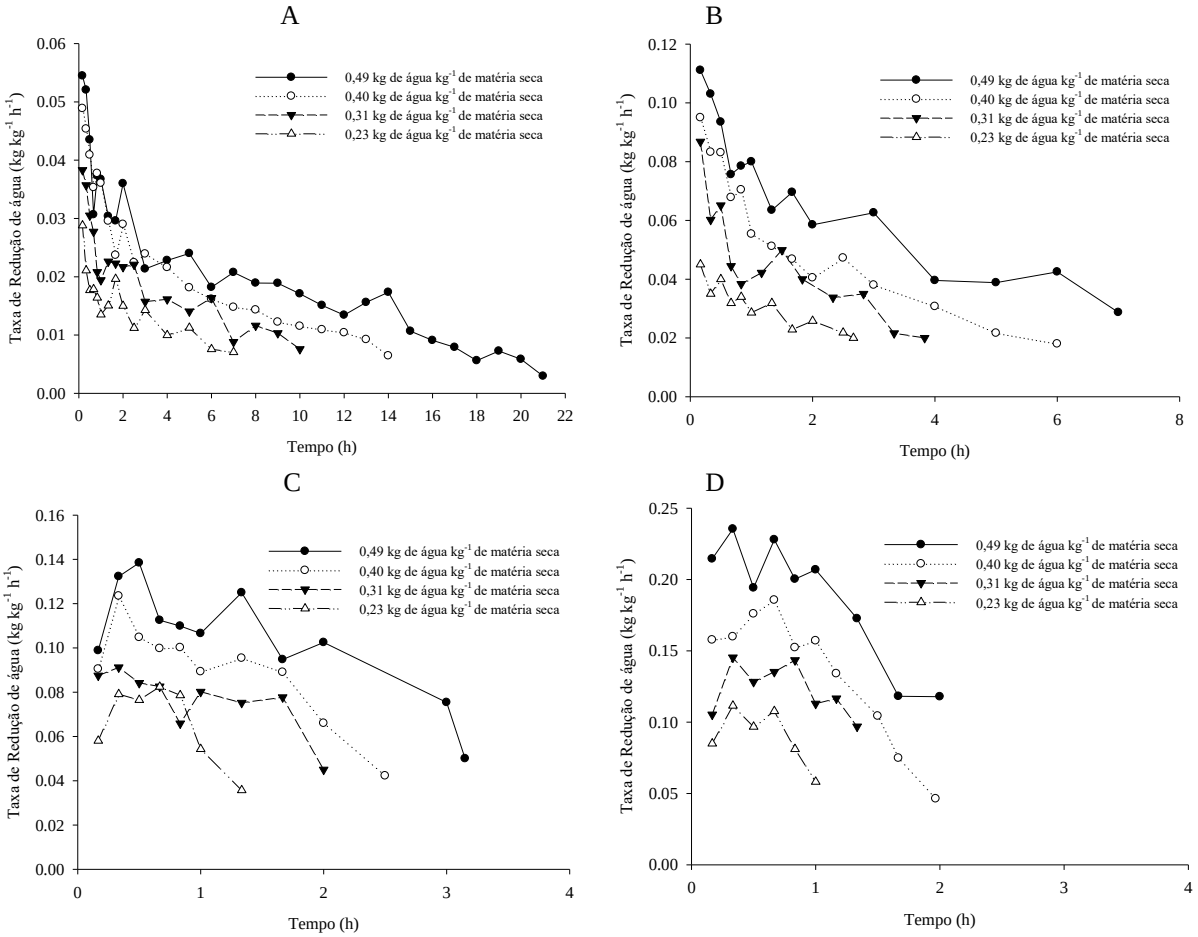
O tempo necessário para os grãos de sorgo atingirem o teor de água de 0,14±0,007 kg de água kg^{-1} de matéria seca, foi diretamente proporcional ao teor de água inicial dos grãos, sendo de 21,0; 14,0; 10,0 e 7,0 h para a temperatura de 40 ºC; de 7,0; 6,0, 3,8 e 2,6 h para 60 ºC; 3,15, 2,5; 2,0 e 1,33 h para temperatura de 80 ºC e de 2,0; 1,97; 1,33 e 1,0 h para a temperatura de 100 ºC, considerando-se os teores de água de 0,49, 0,40, 0,31 e 0,23 kg de água kg^{-1} de matéria seca, respectivamente (Figura 1).

Figura 1. Valores de razão de teor de água de grãos de sorgo estimados pelo modelo de Midilli em diferentes temperaturas de secagem e teores de água (A) 0,23, (B) 0,31, (C) 0,40 e (D) 0,49 (kg de água kg^{-1} de matéria seca).



Observa-se que o aumento da temperatura do ar de secagem promove incrementos na taxa de remoção de água no produto (Figura 2), correspondendo em menor tempo de secagem (Figura 1). Da mesma forma, os maiores teores de água iniciais dos grãos de sorgo obtiveram as maiores magnitudes da taxa de remoção de água (Figura 2). Menores quantidades de energia e tempos são necessários para remover a água em excesso do produto, a medida que o teor de água decresce a água retida no produto se encontra mais fortemente ligada aos constituintes da matéria seca requerendo uma maior quantidade de energia para promover alterações na difusão da água nos capilares dos grãos (Goneli et al., 2009).

Figura 2. Taxa de remoção de água dos grãos de sorgo ao longo do tempo de secagem (h) em diferentes teores de água e temperaturas de (A) 40, (B) 60, (C) 80 e (D) 100 ºC.



Ao longo do tempo de secagem observa-se que taxa de remoção de água é variável para as diferentes condições de secagem, este comportamento é explicado pelas propriedades térmicas do produto, sendo intrínsecas às suas características físico-químicas (Borém et al., 2002). As propriedades térmicas determinam o comportamento do produto durante o processo de secagem e são influenciados pelas características do ar (temperatura e umidade relativa), e do produto como: teor de água, composição química e estrutural, massa específica e porosidade intergranular (Borém et al., 2002; Tres et al., 2011; Resende et al., 2011).

4 CONCLUSÃO

A cinética de secagem dos grãos de sorgo em diferentes teores de água iniciais e temperaturas pode ser descrita pelo modelo de Midilli, não sendo possível a utilização de uma única equação para as diferentes condições de secagem.

A temperatura do ar de secagem e o teor de água inicial dos grãos de sorgo influenciam diretamente nos valores da taxa de remoção de água, analisar a taxa de remoção de água.

AGRADECIMENTOS

Ao IF Goiano, CAPES, FAPEG, FINEP e CNPq pelo apoio financeiro indispensável para execução deste trabalho.

REFERÊNCIAS

Araújo, W. D., Goneli, A. L. D., Corrêa, P. C., Hartmann Filho, C. P., Martins, E. A. S. (2017). Modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada. Revista Ciência Agronômica, 48(2), 448-457.

Babalis, S. J., Belessiotis, V. G. (2004) Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. Journal of Food Engineering, 65(1), 449-458.

Borém, F. M., Ribeiro, R. C. M. S., Corrêa, P. C., Pereira, R. G. F. A. (2002). Propriedades térmicas de cinco variedades de café cereja descascado. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 6(1), 475-480.

Botelho, F. M., Garcia, T. R. B., Viana, J. L., Botelho, S. C. C., Sousa, A. M. B. (2015). Cinética de secagem e determinação do coeficiente de difusão efetivo de grãos de sorgo. Revista Brasileira de Milho e Sorgo, 14(3), 260-272.

Botelho, F. M.; Hoscher, R. H.; Hauth, M. R.; Botelho, S. C. C. (2018). Cinética de secagem de grãos de soja: influência varietal. Engenharia na Agricultura, 26(1), 13-25.

Brasil, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. (2009) Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. Regras para Análise de Sementes. Brasília: MAPA p. 395.

Camicia, R. G. M., Christ, D.; Coelho, S. R. M., Camicia, R. F. M. (2015). Modelagem do processo de secagem de grãos de feijão-caupi. Revista Caatinga, 28(2), 206-214.

Célia, J. A., Resende, O., Lima, M. S., Correia, J. S., Oliveira, K. B., Takeuchi, K. P. (2022). Technological properties of gluten-free biscuits from sorghum flour granifero (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). Food Science and Technology, 42, e29222. https://doi.org/10.1590/fst.29222

Coradi, P. C., Milane, L. V., Dias, C. F., Baio, F. H. R. (2015). Mathematical modeling of drying maize grains in different temperatures. Revista Brasileira de Milho e Sorgo, 14(2), 247-259.
Faria, R. Q.; Teixeira, I. R.; Devilla, I. A.; Ascheri, D. P. R.; Resende, O. (2012). Cinética de secagem de sementes de crambe. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 16(5), 573-583.

Ferreira Junior, W. N., Resende, O., Oliveira, D. E. C., Costa, L. M. (2018). Isotherms and isosteric heat desorption of Hymenaea stigonocarpa Mart. seeds. Journal of Agricultural Science, 10(1), 504-512.

Gomes, F. P.; Resende, O.; Sousa, E. P.; Oliveira, D. E. C.; Araújo Neto, F. R. (2018). Drying kinetics of crushed mass of 'jambu': effective diffusivity and activation energy. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 22(7), 499-505.

Goneli, A.L.D.; Corrêa, P.C.; Afonso Júnior, P.C.; Oliveira, G.H.H. (2009) Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. Revista Brasileira de Armazenamento, Especial Café 1(11), 64-73.

Hong, S., Pangloli, P., Perumal, R., Cox, S., Noronha, L. E., Dia, V. P., Smolensky, D. (2020). Estudo comparativo do conteúdo fenólico, capacidade antioxidante e anti-inflamatória dos extratos aquoso e etanólico de sorgo em RAW 264.7 macrófagos induzidos por lipopolissacarídeos Antioxidante, 9(12), 1297-1306.

Jorge, A.P.P.; Ferreira Junior, W.N.; Silva, L.C. de M.; Oliveira, D.E.C. de & Resende, O. (2021) - Drying kinetics of 'gueroba' (Syagrus oleracea) fruit pulp. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 25(1), 23-29.

Martins, E. A. S.; Lage, E. Z.; Goneli, A. L. D.; Hartmann Filho, C. P.; Lopes, J. G. (2015). Cinética de secagem de folhas de timbó (Serjania marginata Casar). Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 19(3), 238-244.

Mohapatra, D.; Rao, P. S. (2015). A thin layer drying model of parboiled wheat. Journal of Food Engineering, 66, 513-518.

Moradi, M., Azizi, S., Niakousari, M., Kamgar, S., Khaneghah, A. M. (2020). Drying of green bellpepper slices using an IR-assisted Spouted Bed Dryer: An assessment of drying kinetics and energy consumption. Innovative Food Science Emerging Technologies, 60, 1-8.

Oliveira, D. E. C., Resende, O., Smaniotto, T. A., Campos, R. C., Chaves, T. H. Cinética de secagem dos grãos de milho. Revista Brasileira de Milho e Sorgo, 11(2), 190-201.

Oliveira, P. M., Oliveira, D. E. C., Resende, O., Silva, D. V. (2018). Estudo da secagem do mesocarpo dos frutos de baru (Dipteryx alata Vog.). Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 22(2), 827-877.

Paiva, C. L., Queiroz, V. A. V., Simeone, M. L. F., Schaffert, R. E., Oliveira, A. C., & Silva, C. S. (2017). Mineral contents in sorghum genotypes: influence of water stress. Food Chemistry, 214, 400-405.

Paiva, C. L.; Queiroz, V. A. V.; Carvalho, C. W. P.; Garcia, M. A. V. T. (2018). Acceptability and study of shelf life of gluten free cereal bar with popped and extruded sorghum based on a consumer acceptability. Caderno de Ciências Agrárias, 10, 52-58.

Queiroz, V. A. V., Silva, C. S., Menezes, C. B., Schaffert, R. E., Guimarães, F. F. M., Guimarães, L. J. M., Guimarães, P. E. O., & Tardin, F. D. (2015). Nutritional composition of [Sorghum bicolor (L.) Moench] genotypes cultivated without and with water stress. Journal of Cereal Science, 65, 103-111.

Quequeto, W. D.; Resende, O.; Silva, P. C.; Santos, F. A.; Silva, L. C. M. (2019). Drying Kinetics of Noni Seeds. Journal of Agricultural Science, 11(5), 250-258.

Resende, O., Ullmann, R., Siqueira, V. C., Chaves, T. H., Ferreira, L. U. (2011). Secagem e difusividade de sementes de melão. Engenharia Agrícola, 31(6), 1123-1135.

Silva, I. L., Silva, H. W., Camargo, F. R. T., Farias, H. F. L., Freitas, E. F. M. (2018). Secagem e difusividade de sementes de melão. Revista de Ciências Agrárias, 41(2), 309-315.

Siqueira, V. C.; Resende, O., Chaves, T. H. (2012). Drying kinetics of Jatropha seeds. Revista Ceres, 59(2), 171-177.

Sousa, A. P. M. de ., Campos, A. R. N., Gomes, J. P. ., Costa, J. D. ., Macedo, A. D. B. de ., & Santana, R. A. C. de . (2021). Drying kinetics of jackfruit residues (Artocarpus heterophyllus Lam.). Research, Society and Development, 10(2), 1-15.

Sousa, K. A., Resende, O., Chaves, T. H., Costa, L. M. (2011). Cinética de secagem do nabo forrageiro (Raphanus sativus L.). Revista Ciência Agronômica, 42(4), 883-892.

Souza, D. G., Resende, O., Moura, L. C., Ferreira Junior, W. N., & Andrade, J. W. S. (2019). Drying kinetics of the sliced pulp of biofortified sweet potato (Ipomoea batatas L.). Engenharia Agrícola, 39(2), 176-181.

Tres, M. V.; Borges, G. R.; Corazza, M. L.; Zakrzevski, C. A. Determinação da difusividade térmica de alimentos: medidas experimentais e simulação numérica. Perspectiva, 35(131), 43-56.