

Modelagem matemática da cinética de secagem e seu efeito na cor do alho brasileiro

(Allium sativum L.)

Mathematical modeling of drying kinetics and its effect on Brazilian garlic (*Allium sativum L.*) color

Modelado matemático de la cinética de secado y su efecto sobre el color del ajo brasileño

(Allium sativum L.)

Recebido: 11/06/2020 | Revisado: 13/06/2020 | Aceito: 17/06/2020 | Publicado: 29/06/2020

Bárbara Lemes Outeiro Araújo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5350-5174>

Universidade Federal de Lavras, Brasil

E-mail: barbara@oleo.ufla.br

Ednilton Tavares de Andrade

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8448-8781>

Universidade Federal de Lavras, Brasil

E-mail: ednilton@deg.ufla.br

Filipe da Silva de Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3463-9630>

Universidade Federal de Lavras, Brasil

E-mail: filipe.oliveira@estudante.ufla.br

Kátia Soares Moreira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8724-3133>

Universidade Federal de Lavras, Brasil

E-mail: katiasoaresmoreira@hotmail.com

Paula de Almeida Rios

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2836-918X>

Universidade Federal de Lavras, Brasil

E-mail: paulariosagricola@gmail.com

Resumo

O alho é um produto de importância nutricional, com caráter medicinal, podendo ser desidratado para melhor conservação. No entanto há necessidade de estudos que caracterizem a cinética de secagem de seus bulbilhos fatiados. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi

estudar a cinética de secagem do alho brasileiro (*Allium sativum* L.) fatiado em diferentes espessuras, como também analisar o efeito do processo na cor resultante deste. Bulbos de alho foram cortados em finas fatias com espessuras de $2 \cdot 10^{-3}$ e $3 \cdot 10^{-3}$ m, submetidos às temperaturas de ar de secagem de 35, 45, 55 e 70 °C em secador mecânico de camada fixa com convecção forçada. Realizou-se análise de regressão não linear pelo método Quase-Newton para ajuste de 12 modelos matemáticos aos dados experimentais. A equação de Midilli foi o que melhor caracterizou todas as temperaturas de secagem, para os valores coletados. A difusividade efetiva variou de $1,62 \cdot 10^{-10}$ a $6,04 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e de $1,60 \cdot 10^{-10}$ a $8,36 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ nas espessuras de $2 \cdot 10^{-3}$ e $3 \cdot 10^{-3}$ m, respectivamente. Com o aumento da temperatura do ar de secagem houve escurecimento das amostras em todas as espessuras a 70 °C e para a espessura de corte de $3 \cdot 10^{-3}$ m a 55 °C, tendo havido também a diminuição da constante L e ângulo matiz.

Palavras-chave: Processamento; Produto agrícola; Difusividade; Colorimetria.

Abstract

Garlic is a product of nutritional importance, with medicinal character, much used, and can be dehydrated for better conservation. However, there is a need for further research to characterize the drying kinetics. The objective of this work was to study drying kinetics of Brazilian garlic (*Allium sativum* L.), as well as to analyze the effect of the process on the resulting color of garlic. The garlic bulbs were cut into thin slices thicknesses of $2 \cdot 10^{-3}$ and $3 \cdot 10^{-3}$ m, subjected to a drying air temperature of 35, 45, 55 and 70 °C in a mechanical dryer of fixed layer with forced convection. A non-linear regression analysis was performed by the Quase-Newton method to fit 12 mathematical models to the experimental data. The Midilli equation was the one that best characterized all the drying temperatures, for the values collected. The effective diffusivity varied from $1.62 \cdot 10^{-10}$ to $6.04 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ and $1.60 \cdot 10^{-10}$ to $8.36 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ at the thickness of $2 \cdot 10^{-3}$ and $3 \cdot 10^{-3}$ m, respectively. With the increase of the drying air temperature, the samples were darkened in all thicknesses at 70 °C and for the cut thickness of $3 \cdot 10^{-3}$ m at 55 °C, also L constant and the hue angle were decreased.

Keywords: Processing; Agricultural product; Diffusivity; Colorimetry.

Resumen

El ajo es un producto de importancia nutricional, con carácter medicinal, y puede deshidratarse para una mejor conservación. Sin embargo, existe la necesidad de realizar

estudios que caractericen la cinética de secado de sus bulbillos en rodajas. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue estudiar la cinética de secado del ajo brasileño (*Allium sativum* L.) cortado en diferentes espesores, así como analizar el efecto del proceso sobre el color resultante. Los bulbos de ajo se cortaron en rodajas finas con espesores de $2 \cdot 10^{-3}$ y $3 \cdot 10^{-3}$ m, sometidos a temperaturas de aire de secado de 35, 45, 55 y 70 °C en un secador mecánico de capa fija con convección forzada. El análisis de regresión no lineal se realizó utilizando el método Cuasi-Newton para ajustar 12 modelos matemáticos a datos experimentales. La ecuación Midilli fue la que mejor caracterizó todas las temperaturas de secado, para los valores recolectados. La difusividad efectiva varió de $1.62 \cdot 10^{-10}$ a $6.04 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ y $1.60 \cdot 10^{-10}$ a $8.36 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ en espesores de $2 \cdot 10^{-3}$ y $3 \cdot 10^{-3}$ m, respectivamente. A medida que aumentaba la temperatura del aire de secado, las muestras se oscurecían en todos los espesores a 70 °C y para el espesor de corte de $3 \cdot 10^{-3}$ m a 55 °C, con una disminución en el ángulo constante de L y tono.

Palabras clave: Procesamiento; Producto agrícola; Difusividad; Colorimetría.

1. Introdução

O alho (*Allium sativum* L.) é utilizado mundialmente tanto na culinária, quanto para fins medicinais. Apresenta entre seus compostos a alicina, a qual é responsável por propriedades antibacterianas, antifúngicas, antivirais, e antiparasitárias (Fontenele et al., 2015). A promoção da saúde advinda das propriedades do alho está associada à qualidade do seu preparo e armazenamento. A diminuição do teor de água é o processo que assegura a qualidade, estabilidade e ainda melhoria dos atributos sensorial e nutricional dos alimentos (Naidu et al., 2016). Condições ambientais de temperatura e umidade relativa do ar elevadas, podem interferir negativamente na manutenção da qualidade dos produtos agrícolas que são produzidos e colhidos no campo com alto teor de água (Goneli et al., 2014a; Zhang, 2014; Aral & Bese, 2016).

A cor dos alimentos é um fator importante para comercialização destes, podendo ser determinada de forma quantitativa, por colorimetria, com a utilização de equipamentos como colorímetros e espectrofotômetros (Oliveira et al., 2012). O sistema de cores CIELab é o mais usado, possibilitando a identificação da cor por três tipos de variáveis, a^* que varia entre o verde e o vermelho, b^* entre o azul e o amarelo e L determinando a luminosidade. Para melhor analisar mudanças de cor entre amostras processadas de diferentes formas, é comum

determinar os valores dos cromas (C) e ângulo Hue ou matiz (h) (Oliveira et al., 2012; Moura et al., 2014).

Características do processo de secagem, tais como, particularidades do material, umidade relativa, temperatura e velocidade do ar são representadas pela cinética de secagem, utilizando-se para isso a modelagem estatística, a qual permite a promoção de melhorias no sistema e o desenvolvimento de novos equipamentos (Goneli et al., 2014 b; Araujo et al., 2017).

Desta forma, devido à escassez de pesquisas relacionadas à secagem do alho, o objetivo deste trabalho foi estudar o comportamento, durante o processo de secagem, de *Allium sativum* L., nas temperaturas do ar de 35, 45, 55 e 70 °C, em diferentes espessuras de corte ($2 \cdot 10^{-3}$ e $3 \cdot 10^{-3}$ m), aplicando modelos matemáticos para os dados experimentais, selecionando assim o melhor modelo, como também avaliando o efeito dos tratamentos na cor do produto final.

2. Metodologia

O método científico usado neste experimento foi uma pesquisa laboratorial utilizando o método quantitativo. Conforme Pereira et al. (2018) neste método promove-se a coleta de dados numéricos por meio do uso de medições de grandezas que geram conjuntos de dados os quais são analisados por técnicas matemáticas como equações aplicáveis para descrição do processo e análise estatística.

O experimento foi conduzido no Laboratório de Processamento de Produtos Agrícolas (LPPA) da Universidade Federal de Lavras, em Lavras (MG). Utilizou-se como matéria-prima alho brasileiro (*Allium sativum* L.) adquirido no mercado varejista de Lavras.

A princípio foi determinado o teor de água inicial dos bulbilhos de alho, sendo de 1,86 base seca (b.s.) pelo método estabelecido pelo Instituto Adolfo Lutz (2008), com temperatura de 105 ± 3 °C, até peso constante, em três repetições.

Os bulbilhos do alho brasileiro foram descascados e cortados em fatias finas de $2 \cdot 10^{-3}$ e $3 \cdot 10^{-3}$ m de espessura. Para a secagem, utilizou-se secador mecânico de camada fixa com convecção forçada, composto por 6 bandejas perfuradas, quadradas, com lados iguais a 0,35 m e profundidade de 0,40 m. As bandejas encontram-se sobre um *plenum*, que tem por função a uniformização do ar quente de secagem. As temperaturas do ar de secagem foram controladas em 35, 45, 55 e 70 °C. A velocidade do ar de secagem, medida com anemômetro de lâminas rotativas, foi de aproximadamente $0,33 \text{ m s}^{-1}$. O experimento foi composto por três

replicatas, cada qual com peso de $\pm 0,03$ kg, secas nas diferentes temperaturas e espessuras de corte. Durante o processo, as amostras foram pesadas inicialmente em intervalos menores, de 10 em 10 min (durante as primeiras 2 h) e posteriormente em intervalos mais espaçados (30 min), até atingirem o equilíbrio higroscópico, momento em que a massa tornou-se constante. Para o monitoramento das temperaturas do ar de secagem utilizou-se a central de dados através de cabos termopares na bandeja do secador e na parte externa Dataloggers, modelo LG820-UM-851, obtendo a umidade relativa do ar ambiente.

O ajuste dos dados experimentais de secagem aos modelos matemáticos foi realizado por meio de análise de regressão não linear, pelo método Quase-Newton, no programa computacional Statistica 5.0[®], os quais foram: Dois termos, Exponencial de dois termos, Henderson e Pabis modificado, Henderson e Pabis, Midilli, Newton, Page, Thompson, Verma, Wang e Sing, Valcam e Aproximação da difusão (Tabela 1).

Tabela 1 – Modelos matemáticos aplicados nas curvas de secagem.

Modelo	Designação do modelo	Eq.
Aproximação da Difusão	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a)\exp(-k \cdot b \cdot t)$	(1)
Dois termos	$RU = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	(2)
Henderson & Pabis mod.	$RU = a \exp(-k t) + b \exp(-k_0 t) + c \exp(-k_1 t)$	(4)
Henderson & Pabis	$RU = a \exp(-k t) + c$	(5)
Midilli	$RU = a \exp(-k t^n) + bt$	(6)
Newton	$RU = \exp(-k t)$	(7)
Page	$RU = \exp(-k t^n)$	(8)
Thompson	$RU = \exp((-a(a^2 + 4bt)^{0,5})/2b)$	(9)
Verma	$RU = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kt)$	(10)
Wang & Sing	$RU = 1 + a t + b t^2$	(11)
Valcam	$RU = a + b t + c t^{1,5} + d t^2$	(12)

Fontes: Andrade et al. (2019); Oliveira et al. (2020).

em que,

RU: Razão de teor de água;
 t: tempo de secagem (h);
 k, ko e k1: constantes de secagem;
 a, b, c, d, n: coeficientes dos modelos.

Na Tabela 1 são apresentados equações matemáticas utilizadas para modelar o processo de secagem do alho brasileiro. Por meio destas equações é possível prever a razão de umidade do alho de acordo com a variação do tempo de secagem. Porém, algumas equações se adequam matematicamente melhor que outras. Analisando os valores estatísticos

de cada modelo matemático, escolhe-se a equação que melhor representa o processo de secagem de alho brasileiro.

Para determinação das razões de teores de água do alho durante a secagem, utilizou-se a expressão seguinte:

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} \quad (13)$$

em que:

RU: razão de teor de água do produto (adimensional);

U: teor de água do produto (kg de água . kg de matéria seca⁻¹);

U_i: teor de água inicial do produto (kg de água . kg de matéria seca⁻¹);

U_e: teor de água de equilíbrio do produto (kg de água . kg de matéria seca⁻¹).

Para o cálculo da umidade de equilíbrio (U_e), utilizou-se a Eq. 14, descrito pelo modelo determinado por Henderson Modificado:

$$U_e = \{ \ln(1 - UR) / [-0,744976 * (T - 12,0561)] \}^{1/2,460388} \quad (14)$$

em que,

U_e: Teor de água do produto (b.s.);

UR: Umidade relativa do ar de secagem (decimal);

T: Temperatura do ar de secagem (°C).

A análise da cinética de secagem tem a representatividade dos dados experimentais nos modelos, comparou-se os valores experimentais com os dados estimados, determinou-se a porcentagem de erro médio relativo (P, %), erro médio estimado (SE) e teste do qui-quadrado (χ^2), com as equações a seguir (Ryan, 2009).

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - Y_0|}{Y} \quad (15)$$

$$SE = \sqrt{\sum \frac{(Y - Y_0)^2}{GLR}} \quad (16)$$

$$\chi^2 = \sum \frac{(Y - Y_0)^2}{GLR} \quad (17)$$

em que,

Y - valor observado experimentalmente

Y₀ - valor calculado pelo modelo

n - número de observações experimentais
GLR - graus de liberdade do modelo

A taxa de redução de água foi determinada pela quantidade de água que perde um produto por unidade da matéria seca do produto por unidade de tempo, de acordo com a Eq. 18 (Corrêa, Machado & Andrade, 2001).

$$TRA = \frac{Ma_o - Ma_i}{M_s(t_i - t_o)} \quad (18)$$

em que,

TRA: taxa de redução de água ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$);
Ma_o: massa de água total anterior (kg);
Ma_i: massa de água total atual (kg);
M_s: matéria seca (kg).
t_o: tempo total de secagem anterior (h);
t_i: tempo total de secagem atual (h).

A quantificação da cor foi feita pela leitura direta de reflectância das coordenadas L, a*, b*, em Colorímetro Minolta modelo CR-410. Para a obtenção do ângulo de matiz (h) e croma (C), utilizou-se as Eq. 19 e 20 (Moura et al., 2014).

$$h = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (19)$$

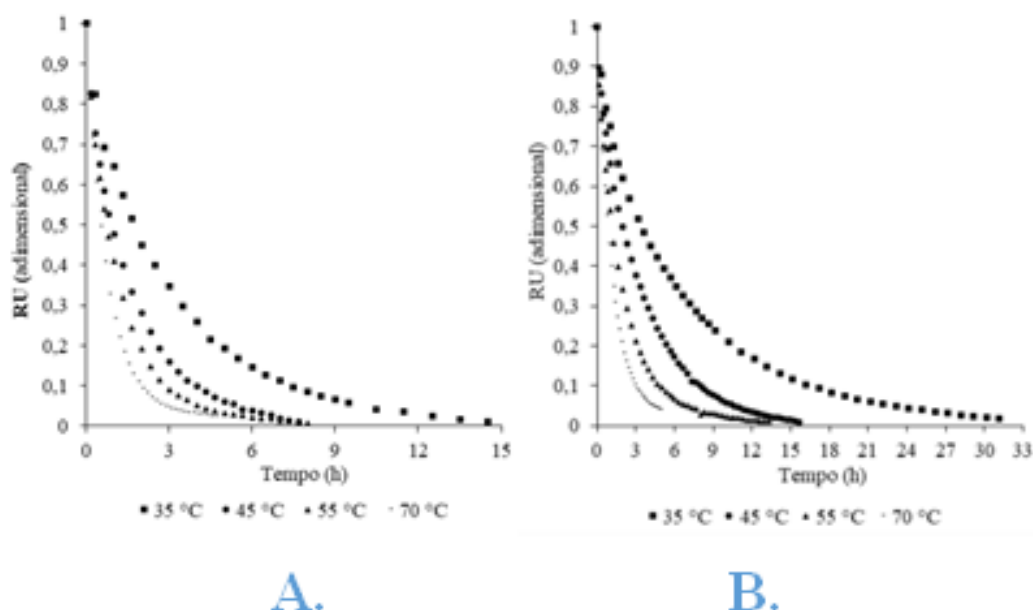
$$C = \sqrt{[(a^*)^2 + (b^*)^2]} \quad (20)$$

O delineamento experimental utilizado para análise colorimétrica foi em blocos casualizados, com três repetições, onde todas as variáveis foram submetidas à análise de variância e teste de média de Scott-knott, com 5% de significância, utilizando o software Sisvar, versão 5.5 (Ferreira, 2014).

3. Resultados e Discussão

A temperatura do ar e a espessura de corte do alho afetaram significativamente a cinética de secagem. O tempo em que o produto entrou em equilíbrio foi inversamente proporcional à temperatura e diretamente à espessura, como apresentado na Figura 1 (A e B). A umidade relativa do ambiente variou de 42 à 59% durante o processo.

Figura 1 – Razão de umidade em função do tempo para diferentes temperaturas do ar de secagem, para o alho brasileiro com espessura de 2.10^{-3} m (A) e 3.10^{-3} m (B).



Fonte: Os autores.

Na secagem a redução da viscosidade da água com a elevação da temperatura, afeta diretamente a resistência do fluido ao escoamento, facilitando a difusão das moléculas de água nos capilares do produto (Alves, 2013; Corrêa et al., 2010b), o que explica os diferentes períodos de secagem conforme variação da temperatura dos bulbilhos de alho.

De acordo com os modelos descritos, na Tabela 1, foi desenvolvida a modelagem mais representativa para os dados experimentais de razão de umidade e tempo, com base nos parâmetros de coeficientes de determinação (R^2), erros médios relativo (P), estimado (SE) e teste do qui-quadrado (χ^2), para cada modelo matemático aplicado. Dentre eles, o mais representativo foi o de Midilli, apresentado nas Tabelas 2 e 4, tendo o melhor ajuste nas diferentes temperaturas e espessuras de corte do alho. A partir deste, foi determinado o coeficiente de difusão (Def), conforme Tabelas 2 e 4.

Tabela 2 – Parâmetros obtidos do modelo de Midilli, ajustado aos dados experimentais de secagem do alho brasileiro, na espessura de 2.10^{-3} m, para as diferentes temperaturas do ar de secagem.

Temperatura (°C)	a	k	b	n	R^2	P	SE (decimal)	χ^2 (decimal)
35	0,9943	0,4444	0,0011	0,7990	0,9993	4,3111	0,0797	0,0064
45	0,9952	0,7335	0,0019	0,7949	0,9998	3,0117	0,0438	0,0019
55	0,9949	0,8947	0,0012	0,8829	0,9998	6,7688	0,1177	0,0139
70	0,9914	1,3195	0,0039	0,8620	0,9989	3,2121	0,0370	0,0014

Fonte: Os autores.

O modelo de Midilli foi aquele que melhor descreveu o processo de secagem das fatias de alho com $2 \cdot 10^{-3}$ m de espessura. Este modelo apresenta valor de k crescente de acordo com a temperatura de secagem do produto, este valor pode ser visualizado por meio da Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros obtidos do modelo de Midilli, ajustado aos dados experimentais de secagem do alho brasileiro, na espessura de $3 \cdot 10^{-3}$ m, para as diferentes temperaturas do ar de secagem.

Temperatura (°C)	a	k	b	n	R ²	P	SE (decimal)	χ ² (decimal)
35	0,9951	0,2817	0,0006	0,7263	0,9998	4,3111	0,0797	0,0064
45	0,9848	0,3932	0,0012	0,8167	0,9995	7,0336	0,1294	0,0167
55	0,9916	0,6114	0,0006	0,8323	0,9998	5,3753	0,0826	0,0068
70	0,9897	0,9263	0,0016	0,8547	0,9993	2,7372	0,0344	0,0012

Fonte: Os autores.

De igual forma para a secagem de fatias de alho com espessura de $2 \cdot 10^{-3}$ m, o modelo de Midilli foi o que também melhor descreveu o processo de secagem das fatias de alho com $3 \cdot 10^{-3}$ m de espessura. Este modelo apresenta valor de k crescente de acordo com a temperatura de secagem do produto, este valor pode ser visualizado por meio da Tabela 3

O modelo de Midilli apresentou valores satisfatórios, tendo elevados valores de R² e baixos valores de P, SE e χ², para todas as temperaturas do ar, sendo o melhor para representar a cinética de secagem do alho brasileiro, cortado nas espessuras de $3 \cdot 10^{-3}$ e $2 \cdot 10^{-3}$ m.

Apresentando coeficientes de determinação acima de 99,30%, e erros médios relativos, estimados e qui-quadrados, respectivamente, abaixo de 7,03%; $12,94 \cdot 10^{-2}$; $1,67 \cdot 10^{-2}$.

De acordo com Teixeira et al. (2012) ajustes em que R² for inferior à 90% e P superior à 10%, não representam de forma ideal os dados. Dentre os valores dos parâmetros estatísticos obtidos para os modelos aplicados, outros modelos também apresentaram valores satisfatórios. Por exemplo, o modelo Exponencial de Dois Termos apresentou satisfatórios coeficientes de ajuste para temperaturas mais baixas de secagem, 35 e 45 °C, em ambas espessuras de corte, sendo, respectivamente, o coeficiente de determinação (R²) 99,85% e erro médio relativo (P) 4,64% para $2 \cdot 10^{-3}$ m, R² 99,32% e P 4,68% para $3 \cdot 10^{-3}$ m e R² 99,89% e P 6,33% para $2 \cdot 10^{-3}$ m, R² 99,90% e P 3,37% para $3 \cdot 10^{-3}$ m. Ou ainda, em temperaturas de secagem mais altas, 55 °C e 70 °C, o modelo de Thompson obteve ajustes expressivos,

respectivamente de R^2 99,93% e P 5,87% para 2.10^{-3} m, R^2 99,87% e P 5,19% para 3.10^{-3} m e R^2 99,77% e P 9,70% para 2.10^{-3} m, R^2 99,81% e P 3,30% para 3.10^{-3} m.

Cagnin et al. (2017) aplicou onze modelos matemáticos para os dados de cinética de secagem do alho (*Allium sativum* L.), nas temperaturas de 40, 50 e 60°C, tendo o melhor ajuste os modelos de Verna, Logaritmo e Midilli, respectivamente. Ademais, segundo Silva et al. (2014) e Melo et al. (2015) o modelo de Midilli teve o melhor ajuste na secagem de banana e pimenta de cheiro, respectivamente. Porém a melhor adequação ao modelo depende do produto, sendo necessário o estudo individual e em diferentes temperaturas para esta determinação, conforme Radünz et al. (2011).

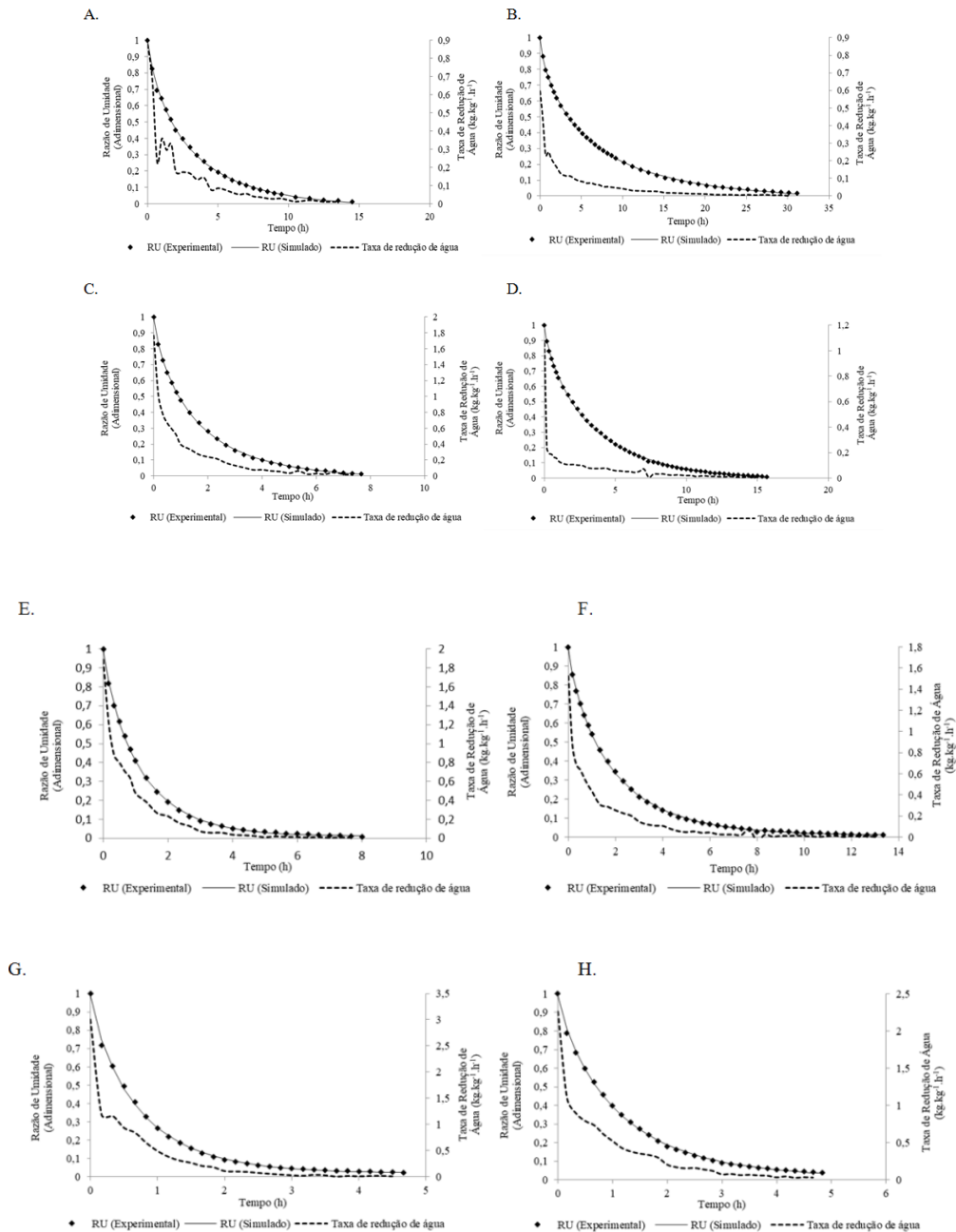
O coeficiente de difusão variou de $1,62.10^{-10}$ à $6,04.10^{-10}$ $m^2 s^{-1}$ e de $1,60. 10^{-10}$ à $8,36.10^{-10}$ $m^2 s^{-1}$ nas espessuras de 2.10^{-3} e 3.10^{-3} m, respectivamente. A difusividade efetiva aumentou com a elevação da temperatura do ar de secagem e o gradiente desta difusão foi superior para o corte de alho mais espesso, devido ao maior percurso percorrido pelas moléculas de água no produto.

Segundo Martinazzo et al. (2007) o coeficiente de difusão é uma difusividade efetiva que engloba os efeitos de todos os fenômenos, podendo intervir sobre a migração da água, variando conforme as condições de secagem (temperatura e velocidade do ar), podendo ser obtido pelo ajuste das curvas experimentais.

Cagnin et al. (2017) obteve os seguintes valores para difusividade efetiva na secagem de alho nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C de $5,10.10^{-11}$, $6,95.10^{-11}$ e $9,07.10^{-11}$ $m^2 s^{-1}$, respectivamente. Entretanto, vale ressaltar que comparado aos resultados aferidos neste trabalho são mais baixos pois os autores realizaram a secagem de bulbilhos de alho triturado, e não fatiado em diferentes espessuras.

As curvas de secagem em diferentes temperaturas do ar para o alho, com espessuras de corte de 2.10^{-3} e 3.10^{-3} m, relacionadas aos valores simulados pelo modelo de Midilli, juntamente com as referentes à taxa de redução de água, estão apresentadas na Fig.2 (A à H). A proximidade dos valores experimentais ajustados em relação à curva estimada pelo modelo demonstra que este se adequou de forma significativa nas diferentes espessuras do produto e temperatura do ar de secagem. A taxa de redução de água foi determinada a partir da modelagem dos dados, utilizando a Eq. 18, que descreve a perda de água por unidade de matéria seca, por unidade de tempo.

Figura 2 – Razão de umidade experimental e estimada pelo modelo de Midilli, e taxa de redução de água, para temperatura de secagem de 35 °C, na espessura de corte de 2.10^{-3} m (A) e 3.10^{-3} m (B); 45 °C na de 2.10^{-3} m (C) e 3.10^{-3} m (D); 55 °C na de 2.10^{-3} m (E) e 3.10^{-3} m (F); 70 °C na de 2.10^{-3} m (G) e 3.10^{-3} m (H).



Fonte: Os autores.

A taxa de redução de água e a cinética de secagem observadas, ocorreu de forma homogênea, sem picos bruscos, demonstrando a eficácia na realização do experimento, visto que variações inopinadas podem revelar falhas no processo. Nas primeiras quatro horas houve

maior perda de água, devido ao alto teor de água nas amostras, fenômeno relatado por Doymaz (2011), que afirmou que a taxa de secagem diminui com o tempo, se aproximando de zero. As amostras entraram em equilíbrio, ou próximas ao equilíbrio higroscópico como ocorreu na temperatura do ar de secagem de 70°C, em diferentes momentos, vide Tabela 3.

Tabela 3 – Período necessário para obtenção do equilíbrio higroscópico dos bulbilhos fatiados nas espessuras de 0,002 e 0,003 m mediante secagem nas diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	2 . 10 ⁻³ m	3 . 10 ⁻³ m
35	14,4	31,2
45	7,7	15,7
55	7,0	13,3
70	4,7	4,8

Fonte: Os autores.

As avaliações colorimétricas do alho após as secagens estão apresentadas na Tabela 4. De acordo com os dados coletados das coordenadas a* e b*, obteve-se os ângulos de matiz (h) e croma (C).

Tabela 4 – Resultados de L, C e h da análise da cor do alho brasileiro, para espessuras de corte de 2.10⁻³ e 3.10⁻³ m, após secagem nas diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	L		C		h	
	2 . 10 ⁻³ m	3 . 10 ⁻³ m	2 . 10 ⁻³ m	3 . 10 ⁻³ m	2 . 10 ⁻³ m	3 . 10 ⁻³ m
35	77,81 b	79,32 b	32,72 a	30,10 a	89,44 c	88,61 c
45	78,70 b	79,99 b	32,41 a	36,19 a	89,29 c	87,76 c
55	77,51 b	75,41 a	33,25 a	35,99 a	88,32 b	84,78 b
70	74,09 a	74,40 a	38,82 a	35,41 a	81,63 a	82,69 a
CV (%)	1,91		8,31		1,30	

*Os valores com a mesma letra nas linhas e colunas, referente a cada constante, não diferem entre si em nível de 5%, pelo teste de Scott-knott.

Fonte: Os autores.

A variação da temperatura do ar de secagem e a espessura do alho, não afetaram na saturação das amostras (coordenada C), visto que não houve diferença significativa de acordo com teste estatístico aplicado. Com relação a coordenada L e o h, observou-se que nas

temperaturas do ar de secagem de 35 e 45 °C a luminosidade e tonalidade permaneceram constantes, ocorrendo alterações apenas em temperaturas mais altas.

As amostras submetidas à secagem nas temperaturas de 55 e 70 °C, com espessuras de 2.10^{-3} e 3.10^{-3} m respectivamente, ficaram escurecidas, visto que houve a diminuição da coordenada L, comprovando a diminuição da luminosidade, como também o decaimento do ângulo matiz, que evidencia maior intensidade da cor amarela no produto. A alicina é um princípio ativo presente no alho, responsável pelo aroma e cor, que possui benefícios medicinais, o qual segundo Yin & Cheng (2003) tem a atividade reduzida em temperaturas elevadas. O escurecimento do alho não é benéfico, já que pode evidenciar a desnaturação deste importante composto químico.

4. Considerações Finais

O modelo de Midilli foi o que apresentou valores mais satisfatórios para representar a cinética de secagem do alho brasileiro cortado nas espessuras de 2.10^{-3} e 3.10^{-3} m, tendo elevados R^2 e baixos P, SE e χ^2 , nas temperaturas do ar de secagem de 35, 45, 55 e 70 °C.

O modelo Exponencial de Dois Termos apresentou bons coeficientes de ajuste para temperaturas do ar de secagem mais baixas, 35 °C e 45 °C, em ambas espessuras de corte e o de Thompson para as temperaturas mais altas, 55 e 70 °C.

A difusividade efetiva aumentou com a elevação da temperatura do ar de secagem e teve maior gradiente no alho com espessura de corte de 3.10^{-3} m.

O aumento da temperatura do ar de secagem provocou escurecimento das amostras em todas as espessuras à 70 °C e para a espessura de corte de 3.10^{-3} m à 55 °C, visto que houve a diminuição da constante L^* e ângulo matiz (h), prejudicando a manutenção da cor do produto, quando a secagem é realizada em altas temperaturas.

Referências

Alves, G. E., Isquierdo, E. P., Borém, F. M., Siqueira, V. C., Oliveira, P.D., & Andrade, E. T. (2013). Cinética de secagem de café natural para diferentes temperaturas e baixa umidade relativa. *Coffee Science*, 8(2), 238-47.

Andrade, E. T., Figueira, V. G., Teixeira, L. P., Martinazzo, A. P., & Araujo, K. G. D. L. (2019). Effect of drying kinetics on color of “dedo de moça” chili peppers (*Capsicum baccatum*). *Engenharia Agrícola*, 39(5), 659-667.

Aral, S. & Bese, A. V. (2016). Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* ssp.): effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity. *Food Chemistry*, 210(1), 577-84.

Araujo, W. D., Goneli, A. L. D., Corrêa, P. C., Filho, C. P. H., & Martins, E. A. S. (2017). Modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada. *Revista de Ciências Agronômicas*, 3(1), 448-57.

Cagnin, C., Lima, M. S., Silva, R. M., Plácido, G. R., Silva, A. P., Freitas, B. S. M., & Oliveira, D. E. C. (2017). Alho: Cinética de secagem e propriedades termodinâmicas. *Revista Bioscience Journal*, 33(4), 905-13.

Corrêa, P. C., Machado, P. F., & Andrade, E. T. (2001). Cinética de secagem e qualidade de grãos de milho-pipoca. *Ciência e Agrotecnologia*, 25(1), 134-42.

Corrêa, P. C., Oliveira, G. H. H., Botelho, F. M., Goneli, A. L. D., & Carvalho, F. M. C. (2010). Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. *Revista Ceres*, 57(5), 595-601.

Doymaz, İ. (2011). Drying of thyme (*Thymus Vulgaris* L.) and selection of a suitable thin-layer drying model. *Journal of Food Processing and Preservation*, 35(4), 458–65.

Ferreira, D. F. (2014) Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. *Ciência e Agrotecnologia*, 38(2), 109-12.

Fontenele, L. M. S., Azevedo, M. L. X., Cardoso Filho, F. C., Muratori, M. C. S., Sá, L. R. S. & Pereira, M. M. G. (2015). Qualidade microbiológica do alho (*Allium sativum*) produzido e comercializado em mercados públicos. *Revista Instituto Adolfo Lutz*, 74(4), 420-425.

- Goneli, A. L. D., Sarath, K. L. L., Araújo, W. D., Gancedo, R., & Nasu, A. K. (2014). Cinética de secagem de folhas de erva baleeira (*Cordia verbenacea* DC.). *Revista Brasileira de Plantas Mediciniais*, 16(2), 434-443.
- Goneli, A. L. D., Vieira, M. D., Vilhasanti, H. C. B., & Gonçalves, A. A. (2014). Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 44(1), 56-64.
- Instituto Adolfo Lutz (2008). *Métodos físico-químicos para análise de alimentos*. São Paulo, Instituto Adolfo Lutz. 1000p.
- Martinazzo, A. P., Corrêa, P. C., Resende, O., & Melo, E. C. (2007). Análise e descrição matemática da cinética de secagem das folhas de capim-limão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 11(3), 301-6.
- Melo, J. C. S., Pereira, E. D., Oliveira, K. P., Costa, C. H. C., & Freitas, R. M. (2015). Estudo da cinética de secagem da pimenta de cheiro em diferentes temperaturas. *Revista Verde*, 10(2), 09-14.
- Moura, R. L., Figueirêdo, R. M. F., & Queiroz, A. J. M. (2014). Processamento e caracterização físico-química de néctares goiaba-tomate. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, 9(3), 69-75.
- Naidu, M. M., Vedashree, M., Sarapathy, P., Khanum, H., Ramsamy, R., & Hebbar, H. U. (2016). Effect of drying methods on the quality characteristics of dill (*Anethum graveolens*) greens. *Food Chemistry*, 192(1), 849-56.
- Oliveira, F. S., Andrade, E. T., Rios, P. A., Moreira, K. S., & Salvio, L. G. A. (2020). Mathematical modeling of drying kinetics and hygroscopic balance of *Cymbopogon flexuosus* leaves. *Research, Society and Development*, 9(7), 10973594.
- Oliveira, T. A., Aroucha, E. M. M., Souza, M. S. M., Leite, R. H. L., & Santos, F. K. G. (2012). Efeito do biofilme de gelatina e cloreto de cálcio na coloração de quiabo armazenado sob refrigeração. *Agropecuária Científica no Semi-Árido*, 8(2), 07-11.

Pereira, A. S., et al. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. [e-book]. Santa Maria. Ed. UAB/NTE/UFSM. Disponível em:

https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_Metodologia-Pesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1.

Radünz, L. L., Amaral, A. S., Mossi, A. J., & Rocha, R. P. (2011). Avaliação da cinética de secagem de carqueja. *Engenharia na Agricultura* 19(1), 19–27.

Ryan, T. (2009). *Estatística Moderna para Engenharia*. Rio de Janeiro, Elsevier. 344p.

Silva, W. P., Silva, C. M. D. P., Gama, F. J. A. & Gomes, J. P. (2014). Mathematical models to describe thin-layer drying and to determine drying rate of whole bananas. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13(1), 67-74.

Teixeira, L. P., Andrade, E. T., & Silva, P. G. (2012). Determinação do equilíbrio higroscópico e do calor isostérico da polpa e da casca do abacaxi (*Ananas comosus*). *Engevista*, 14(1), 172-84.

Yin, M., & Cheng, W. (2003). Antioxidant and antimicrobial effects of four garlic-derived organosulfur compounds in ground beef. *Meat Science* ,63(1), 23–8.

Zhang, M., Chen, H., Mujumdar, A. S., Tang, J., Miao, S., & Wang, Y. (2014). Recent developments in high-quality drying of vegetables and aquatic products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 9(1), 68-74.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Bárbara Lemes Outeiro Araújo – 20%

Ednilton Tavares de Andrade – 20%

Filipe da Silva de Oliveira – 20%

Kátia Soares Moreira – 20%

Paula de Almeida Rios – 20%