

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

CINÉTICA DE SECAGEM DE GRÃOS DE FEIJÃO MUNGO
(*Vigna radiata* L.) R. Wilczek

EDUARDO DA SILVA WESTEMAIER

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2023

CINÉTICA DE SECAGEM DE GRÃOS DE FEIJÃO MUNGO (*Vigna radiata* L.) R. WILCZEK

Eduardo Da Silva Westemaier

Orientador: Prof. Dr. Valdiney Cambuy Siqueira

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal da Grande Dourados, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Agrícola.

Dourados
Mato Grosso do Sul
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

W525c Westemaier, Eduardo Da Silva
CINÉTICA DE SECAGEM DE GRÃOS DE FEIJÃO MUNGO (*Vigna radiata* L.) R. Wilczek
[recurso eletrônico] / Eduardo Da Silva Westemaier. -- 2023.
Arquivo em formato pdf.

Orientador: Valdiney Cambuy Siqueira.
TCC (Graduação em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2023.
Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:
<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. Moyashi. 2. Teor de água. 3. Taxa de secagem. 4. Modelo de Thompson. 5. Difusividade efetiva. I. Siqueira, Valdiney Cambuy. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

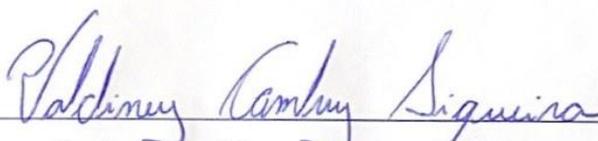
CINÉTICA DE SECAGEM DE GRÃOS DE FEIJÃO MUNGO (*Vigna radiata* L.) R. WILCZEK

Por

Eduardo Da Silva Westemaier

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos exigidos para
obtenção do título de ENGENHEIRO AGRÍCOLA

Aprovado em: 25 de abril de 2023.



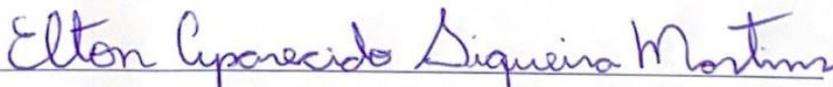
Prof. Dr. Valdiney Cambuy Siqueira

Orientador – UFGD/FCA



Prof.ª Dr.ª Anamari Viegas de Araujo Motomiya

Membro da banca – UFGD/FCA



Prof. Dr. Elton Aparecido Siqueira Martins

Membro da banca – UFGD/FCA

Dedico

Aos meus pais:

José Jorge Westemaier
&
Solange Alves da Silva Westemaier

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, saúde e perseverança para vencer os obstáculos e poder acreditar mais na minha capacidade mediante a ele.

À minha família, especialmente aos meus pais, que em todos os momentos deram apoio e estrutura para o meu desempenho até aqui e meus irmãos Estevão e Estela, por me espelhar neles a qual grande pessoa que são.

À UFGD, por todo o suporte e oportunidade dada durante a graduação do curso de Engenharia Agrícola.

Ao meu orientador, professor Valdiney Cambuy Siqueira, pelos ensinamentos e orientações na realização deste trabalho. Obrigado, por todo apoio para meu desempenho profissional.

A todos os professores da UFGD, especialmente do curso de Engenharia Agrícola, que puderam se dispor nos ensinamentos e conhecimentos durante a graduação.

Aos meus amigos do Laboratório de Pós-colheita LPPC e Grupo Pet Engenharia Agrícola que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos, Alexei Schmitz, João Bianchi, João Farias e Luana Ely pelo apoio e auxílio na lida dos meus objetivos.

À minha madrinha, Lurdes, e minha mãe de coração, Sirlei, por me incentivar a conquistar meus objetivos.

Aos meus amigos Alexandre Pimenta, Beatriz Souza, Carlos Neto, Galeno Arvelos, Marcus Luchesi e Rodney Vargas pela parceria e amizade construída desde o início da graduação.

À banca avaliadora, por fazer parte dessa etapa importante na graduação.

Aos meus colegas de turma, pela parceria e companheirismo durante o curso.

Muito Obrigado!

WESTEMAIER, Eduardo da Silva. **Cinética de secagem de grãos de feijão mungo (*Vigna radiata* L.) R. Wilczek.** 2023. 33f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2023.

RESUMO

O feijão mungo (*Vigna radiata* L.) é uma leguminosa granífera, que na maioria de suas cultivares caracterizam cor verde em suas sementes. Seu cultivo é principalmente consumido pela alimentação, por apresentar teores consideráveis de vitaminas, proteínas e minerais. Assim sendo, para boa produtividade e formação dos grãos de feijão mungo, é preciso manter a qualidade formada durante o seu desenvolvimento no campo e em todas as etapas pós-colheita. No entanto, as etapas de pós-colheita para essa cultura devem ser planejadas de forma a assegurar a qualidade final do produto conduzido pelo processo de secagem. Diante da importância dos processos de secagem na qualidade do feijão, objetivou-se descrever o comportamento da cinética de secagem por meio de ajustes de diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem, a fim de selecionar qual melhor modelo representa o fenômeno, além de determinar o coeficiente de difusão e a energia de ativação em diferentes temperaturas. Os grãos de feijão mungo foram colhidos com teor de água inicial de aproximadamente 34% (b.u. base úmida) e submetidos à secagem nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C em um secador experimental de camada fixa. Aos dados experimentais de razão de umidade dos grãos do feijão foram ajustados onze modelos matemáticos, utilizados para representar a secagem de diversos produtos agrícolas. Com base nos dados obtidos, conclui-se que o modelo de Thompson pode ser utilizado para a representação da cinética de secagem dos grãos de feijão mungo. O aumento da temperatura do ar resultou na maior taxa de secagem e elevação do coeficiente de difusão efetivo. A energia de ativação para difusão líquida, durante o processo de secagem dos grãos do feijão mungo foi de 59,78 kJ mol⁻¹.

Palavras-chave: Moyashi. Teor de água. Taxa de secagem. Modelo de Thompson. Difusividade efetiva.

WESTEMAIER, Eduardo da Silva. **Drying kinetics of mung bean (*Vigna radiata* L.) grains** R. Wilczek. 2023. 33f. Completion of course work (Bachelor in Agricultural Engineering) – Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2023.

ABSTRACT

Mung bean (*Vigna radiata* L.) is a grain legume, which in most of its cultivars characterize green color in its seeds. Its cultivation is mainly consumed as food, due to its considerable levels of vitamins, proteins and minerals. Therefore, for good productivity and formation of mung bean grains, it is necessary to maintain the quality formed during its development in the field and in all post-harvest stages. However, the post-harvest stages for this crop must be planned in order to ensure the final quality of the product driven by the drying process. In view of this, the importance of beans through the drying processes, the objective of the present work was to describe the behavior of the drying kinetics through adjustments of different mathematical models to the experimental drying data, in order to select which best model represents the phenomenon, in addition to determining the diffusion coefficient and activation energy at different temperatures. The mung bean grains were harvested with an initial moisture content of approximately 34% (w.b. wet basis) drying at temperatures of 40, 50, 60, 70 and 80 °C in an experimental fixed layer dryer. Eleven mathematical models were adjusted to the experimental data on moisture ratio of bean grains, used to represent the drying of various agricultural products. Based on the data obtained, it is concluded that Thompson's model can be used to represent the drying kinetics of mung bean grains. The increase in air temperature resulted in a higher drying rate and an increase in the effective diffusion coefficient. The activation energy for net diffusion during the drying process of mung bean grains was 59,78 kJ mol⁻¹.

Key words: Moyashi. Water content. Drying rate. Thompson Model. Effective diffusivity.

SUMÁRIO

	Página
1 Introdução	1
2 Revisão de literatura	3
2.1 Feijão mungo	3
2.2 Cinética de secagem.....	4
3 Material e métodos.....	6
4 Resultados e discussão.....	10
5 Conclusões	16
6 Referências bibliográficas.....	17

1 INTRODUÇÃO

O feijão-mungo (*Vigna radiata* L.) R. Wilczek, também conhecido no Brasil como feijão-mungo-verde, é uma leguminosa de cultivo anual sendo cultivada em países de clima tropical e subtropical. Na grande maioria de suas cultivares, são encontradas sementes pequenas caracterizadas por uma cor verde (SAYÃO, BRIOSO e DUQUE, 1991), com teores consideráveis de vitaminas, proteínas e minerais, sendo um atrativo em razão do seu consumo.

O feijão mungo é utilizado principalmente como suplemento proteico, e seu consumo pode ser feito através das vagens, dos grãos crus em saladas, cozidos ou processado em forma de farinha, podendo ser utilizada como matéria-prima para bolos, biscoitos e doces, ou apenas germinado em forma de brotos de feijão (MACHADO et al., 2009; SANTOS et al., 2009).

Para boa formação dos brotos, as sementes precisam manter a qualidade formada durante todo seu processo de desenvolvimento a campo, nas etapas pós-colheita. Neste sentido, o processo de secagem é fundamental pois ele é responsável pela redução do teor de água até níveis seguro, para se obter sucesso no armazenamento.

A secagem é definida como um processo de transferência simultânea de calor e massa, onde a água presente no produto é removida, geralmente por evaporação (AFONSO JÚNIOR e CORRÊA, 1999). No caso dos grãos e sementes, via convecção de ar quente.

De acordo com Andrade et al. (2006), dentre as vantagens da secagem destacam-se a manutenção do poder germinativo por longos períodos, a não proliferação de insetos e microrganismos, antecipação da colheita para reduzir as perdas que são geradas no campo, e diminuir o volume e o peso da massa que será transportada.

Considerando a relação do processo de secagem na qualidade final do produto, o desenvolvimento de técnicas aplicadas a secagem, possibilita melhor rendimento e agrega valor ao produto no mercado (SIQUEIRA, RESENDE e CHAVES, 2013). Neste sentido, a modelagem matemática pode trazer contribuições, permitindo determinar os índices físicos e termodinâmicos relacionados às transferências de calor e massa, na aplicação do processo de secagem (BOTELHO et al., 2015). A modelagem matemática contribui com o aperfeiçoamento e desenvolvimento de equipamentos, bem como, em sua otimização, com a simulação e obtenção de dados que favorece o comportamento de cada produto na retirada de água, onde a simulação está interligada aos modelos matemáticos e à perda de água, durante o processo de secagem (MENEGETTI et al., 2012).

Diante da importância da etapa de secagem após a colheita do material e do potencial do feijão-mungo na alimentação humana, torna-se relevante os estudos que abordem os processos pós-colheita, uma vez que, na literatura científica são encontradas pesquisas destinadas à cadeia produtiva de maneira geral, como a forma de cultivo (FONTES et al., 2001), época de semeadura (VIEIRA et al., 2011), adubação (COUTINHO et al., 2022), beneficiamento (ARAUJO et al., 2011), espaçamento (KERES et al., 2019), melhoramento genético (MIRANDA et al., 1999), adaptação da cultivar (OLIVEIRA et al., 2013), composição nutricional (SILVA et al., 2019), dentre outros.

Considerando o potencial do feijão mungo e a importância do processo de secagem dentre as etapas pós-colheita. Objetivou-se com o presente trabalho descrever o comportamento da cinética secagem dos grãos de feijão mungo e determinar o coeficiente de difusão efetivo e a energia de ativação do processo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Feijão mungo

O feijão mungo (*Vigna radiata* L.) R. Wilczek é uma leguminosa granífera, pertencente à família Fabaceae, sendo cultivada principalmente como fonte de alimento. É uma planta anual, de porte ereto ou semi-ereto, sistema radicular muito ramificado e coberto de pelos, sua altura pode variar de 0,3 a 1,5 m (VIEIRA e NISHIHARA, 1992). As vagens por planta podem variar de 4 a 34, dependendo da população de plantas por área e das condições edafoclimáticas. Na maturação, que é desuniforme, as vagens depois de secas apresentam coloração marrom ou preta, contendo de 6 a 20 sementes (VIEIRA, OLIVEIRA e VIEIRA, 2003).

Com relação à cobertura morta vegetal proveniente do seu cultivo, pode ser incorporada ao solo, permitindo restaurar e preservar terras com fraco potencial produtivo. Essa prática é denominada adubação verde. Dentre as principais melhorias constituídas pela adubação verde, pode se destacar as características química, física e biológica do solo, contribuindo para a sustentabilidade da agricultura (ALCÂNTARA et al., 2000; CUNHA et al., 2011).

Oriundo da Ásia, o feijão mungo é cultivado em grandes extensões (SILVA et al., 2018), sendo a Índia o maior produtor mundial dessa leguminosa, seguida da Tailândia (VIEIRA e NISHIHARA, 1992). No Brasil, além das colônias orientais, a busca por esse tipo de feijão nos últimos anos tem aumentado em função dos crescentes grupos naturalistas e aptidão de produção no sistema orgânico, por ser planta rústica que exige pouca fertilidade do solo (KEATINGE et al., 2011).

Nos últimos anos, os países ocidentais têm inserido o broto de feijão mungo, não somente em pratos tradicionais chineses, mas em várias outras preparações culinárias. O consumo desse vegetal é decorrente pela busca de alimentos naturais e do seu valor nutricional, pois além de possuírem vitaminas e minerais, apresenta alto conteúdo de água e baixo valor energético em função de teor de lipídios reduzidos (LIMA et al., 2004).

2.2 Cinética de secagem

A secagem de produtos agrícolas, pode ser definida como um processo simultâneo de transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem, que consiste na remoção de água em excesso do interior do grão por meio de evaporação, normalmente causada pelo mecanismo de convecção forçada do ar aquecido (AFONSO JÚNIOR e CORRÊA, 1999).

A conservação dos grãos pelo processo de secagem, fundamenta-se no fato de que o teor de água é essencial para o desenvolvimento das atividades dos microrganismos, as enzimas e todo o mecanismo metabólico. Para o armazenamento de produtos agrícolas, a operação unitária de secagem diminui a quantidade de água presente no material, de forma que ocorra a redução das atividades biológicas e as mudanças químicas e físicas proporcionadas durante o período de pós-colheita.

O teor de água final do produto para o armazenamento apresenta valor estabelecido para que não ocorra deterioração do grão. Visto que esse valor pode variar conforme o tipo de produto, em princípio, a faixa ótima de teor de água para o armazenamento é entre 11 a 13% (ANDRADE et al., 2006).

O conhecimento do teor de água inicial e de equilíbrio do produto, possibilita fundamentar o comportamento do material sólido, mediante a curva de secagem e taxa de secagem (SOARES, JORGE e MONTANUCI, 2016). Por sua vez, a taxa de secagem é obtida pela derivação dos dados de teor de água em função do tempo de secagem (MENEZES et al., 2013). Sendo assim, existem fatores que podem influenciar na taxa de secagem de produtos agrícolas, como o tamanho da partícula, a composição química, o teor de água inicial e também a vazão do ar de secagem (BOTELHO et al., 2018).

A secagem em camada fina tem como objetivo determinar a taxa de secagem do produto, por meio do registro da perda de massa da amostra durante a remoção de água (MONTE et al., 2008). A curva de secagem em camada fina sofre variação conforme a espécie, variedade, condições ambientais, métodos de preparo pós-colheita, entre outros. Dessa forma, vários modelos matemáticos têm sido utilizados para descrever o processo de secagem dos grãos (RESENDE et al., 2008).

Existem três tipos de modelos de secagem de camada fina para descrever a secagem dos produtos agrícolas, como: o modelo teórico que conceitua apenas a resistência interna à transferência de calor e água entre o ar quente e o produto; já os modelos empíricos e semiteóricos, consideram somente a resistência externa entre a temperatura e a umidade relativa

do ar de secagem (MIDILLI, KUCUK e YAPAR, 2002; PANCHARIYA, POPOVIC e SHARMA, 2002).

Dentre os modelos teóricos aplicados para avaliar a cinética de secagem, o coeficiente de difusão é o mais conhecido. Visto que esse modelo tem como base a segunda lei de Fick, não sendo rigorosamente representativo nos meios que predominam o transporte de água em produtos agrícolas, assim o coeficiente de difusão efetivo varia conforme muda a temperatura e a velocidade do ar, nas condições de secagem (ROCA et al., 2008).

A energia de ativação é definida como a facilidade com que as moléculas de água superam a barreira de energia durante a migração no interior do produto (MORAIS et al., 2013). Segundo Kayacier e Singh (2004), a energia de ativação diminui com a elevação do teor de água. Para a cinética de secagem, quanto menor a energia de ativação maior será a difusividade de água no produto.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no Laboratório de Processos Pós-Colheita da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), localizado na Rodovia Dourados – Itahum, km 12, Cidade Universitária, Dourados – MS.

Os grãos de feijão mungo, foram produzidos na Área Experimental da Faculdade de Ciências Agrárias da UFGD, localizada na latitude 22°19'94"S e longitude 54°93'88"W. A colheita e a debulha foram realizadas manualmente quando os grãos apresentaram teor de água de aproximadamente 34% base úmida (b.u.). Posteriormente, os grãos foram colocados em sacos plásticos de polietileno transparente, em câmara fria a 5 °C, para uniformização do teor de água. O teor de água do produto foi determinado pelo método gravimétrico, em estufa de circulação forçada de ar por 24 h a 105 ± 3 °C (BRASIL, 2009).

O processo de secagem foi realizado em secador experimental de camada fixa, dotado de um sistema que controla com precisão o fluxo e a temperatura do ar de secagem. Utilizaram-se 600 gramas de feijão mungo, sendo distribuídas uniformemente 200 gramas em cada uma das três bandejas. A secagem foi realizada em cinco temperaturas (T_s), sendo 40, 50, 60, 70 e 80 °C, com a velocidade de ar constante de $1,2 \text{ m s}^{-1}$, sendo monitorada por um anemômetro digital.

O acompanhamento da redução do teor de água durante a secagem foi realizado pelo método gravimétrico, utilizando-se uma balança com resolução de 0,01 g. Encerrou-se o processo quando o produto atingiu o teor de água de equilíbrio, caracterizado por manter sua massa invariável durante três pesagens consecutivas. No entanto, para fins de apresentação dos dados e ajuste dos modelos matemáticos, utilizou-se o teor de água final de $11 \pm 0,2\%$ (b.u).

A avaliação da secagem foi realizada pela determinação da taxa de secagem, de acordo com a Equação 1 (CORRÊA, MACHADO e ANDRADE, 2001):

$$\text{TRA} = \frac{M_{a_0} - M_{a_i}}{M_s (t_i - t_0)} \quad (1)$$

em que:

TRA: taxa de secagem ($\text{kg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$);

M_{a_0} : massa de água total anterior (kg);

M_{a_i} : massa de água total atual (kg);

M_s : matéria seca (kg);

t_0 : tempo total de secagem anterior (h); e
 t_i : tempo total de secagem atual (h).

Para o estudo da cinética de secagem do feijão mungo, determinou-se a razão de teor de água do produto para cada condição, utilizando a seguinte Equação 2:

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} \quad (2)$$

em que:

RX : razão de teor de água do produto, adimensional;
 X : teor de água do produto (decimal b.s.);
 X_i : teor de água inicial do produto (decimal b.s.); e
 X_e : teor de água de equilíbrio do produto (decimal b.s.).

Para a avaliação da cinética de secagem, utilizou-se modelos matemáticos frequentemente empregados na representação da secagem de produtos agrícolas (Tabela 1).

Tabela 1. Modelos matemáticos utilizados para prever a secagem de produtos agrícolas.

Modelo	Designação do modelo	
Newton (Lewis, 1921)	$RX = \exp(-k t)$	(3)
Page (Page, 1949)	$RX = \exp(-k t^n)$	(4)
Henderson e Pabis (Henderson e Pabis, 1961)	$RX = a \exp(-k t)$	(5)
Logarítmico (Yagcioglu et al., 1999)	$RX = a \exp(-k t) + c$	(6)
Midilli (Midilli, 2002)	$RX = a \exp(-k t^n) + b t$	(7)
Valcam (Siqueira et al., 2013)	$RX = a + b t + c t^{1.5} + d t^2$	(8)
Dois termos (Henderson, 1974)	$RX = -a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	(9)
Exponencial dois termos (Sharaf-Eldee et al., 1980)	$RX = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-k a t)$	(10)
Verma (Verma et al., 1985)	$RX = -a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-k_1 t)$	(11)
Aproximação da difusão (Kassem, 1998)	$RX = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-k b t)$	(12)
Thompson (Thompson, Peart e Foster, 1968)	$RX = \exp\{[-a - (-a^2 + 4 b t)^{0.5}] (2 b)^{-1}\}$	(13)

Fonte: Autor, 2023.

em que:

t : tempo de secagem (h);
 k, k_0, k_1 : constantes de secagem h^{-1} ; e
 a, b, c, n : coeficientes dos modelos.

As análises do ajuste do modelo foram realizadas para todas as temperaturas do ar de secagem, considerando-se o erro médio relativo (P, %), e também o comportamento da distribuição dos resíduos. Valores de erro médio relativo são usados como critério de seleção (MOHAPATRA e RAO, 2005), sendo descartados os modelos que apresentem valores superiores a 10%.

Calculou-se o erro médio relativo para cada um dos modelos por meio da Equação 14:

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (14)$$

em que:

n: número de observações experimentais;

Y: valor experimental; e

\hat{Y} : valor estimado pelo modelo.

Como análise complementar de escolha do modelo utilizou-se os valores de Critério de Informação de Akaike (AIC) e Critério de Informação Bayesiana de Schwarz's (BIC) (WOLFINGER, 1993).

Os critérios de informação foram determinados pelas Equações 15 e 16:

$$AIC L = - 2 \log L + 2p \quad (15)$$

$$BIC L = - 2 \log L + p \ln (n - r) \quad (16)$$

em que:

p: número de parâmetros do modelo;

n: número total de observações;

r: rank da matriz X (matriz de incidência de efeitos); e

L: máxima verossimilhança.

Na determinação do coeficiente de difusão efetivo para as diferentes circunstâncias de secagem utilizou-se a Equação 17, que baseia-se na teoria da difusão líquida, representando uma solução analítica para a segunda lei de Fick, considerando que o produto tenha a forma geométrica esférica e com aproximação de oito termos.

$$RX = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n_t=1}^{\infty} \frac{1}{n_t^2} \exp \left[\frac{n_t^2 \pi^2 D_i t}{9} \left(\frac{3}{R_e} \right)^2 \right] \quad (17)$$

em que:

D_i : coeficiente de difusão de líquido, $m^2 s^{-1}$;

R_e : raio de esfera equivalente, m; e

n_t : número de termos.

O raio equivalente ao de uma esfera dos grãos de feijão mungo foram calculados por meio da equação 18:

$$R_e = \sqrt[3]{\frac{3 \pi \left(\frac{a b c}{6} \right)}{4 \pi}} \quad (18)$$

em que:

a: comprimento, m;

b: largura, m; e

c: espessura, m.

Para avaliar a influência da temperatura do ar de secagem sobre o coeficiente de difusão efetivo, foi selecionada a Equação 19 de Arrhenius:

$$D_{ef} = D_0 \exp \left(\frac{E_a}{R T_a} \right) \quad (19)$$

em que:

D_0 : fator pré-exponencial;

R : constante universal dos gases, $8,314 \text{ kJ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$;

T_a : temperatura, K; e

E_a : energia de ativação, kJ mol^{-1} .

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O tempo de secagem para que os grãos de feijão mungo atingissem o teor de água de $11 \pm 0,2\%$ (b.u), foi de 11; 6,5; 3,7; 2,2 e 1,3 horas para as respectivas temperaturas, 40, 50, 60, 70 e 80 °C (Figura 1). Observa-se que, no início do processo, os valores da taxa de secagem são maiores devido à maior concentração de água nos grãos, facilitando sua remoção. No entanto, ao decorrer da secagem, a taxa atenua-se independente das condições estabelecidas. Isto ocorre pois conforme o teor de água do produto se reduz, torna-se maior a força de ligação entre a água e os constituintes dos grãos, e isso faz com que o tempo para que a água migre da parte interna dos grãos para a periferia, seja maior. Comportamento semelhante ao encontrado por MORAIS et al. (2013), na secagem de feijão-caupi.

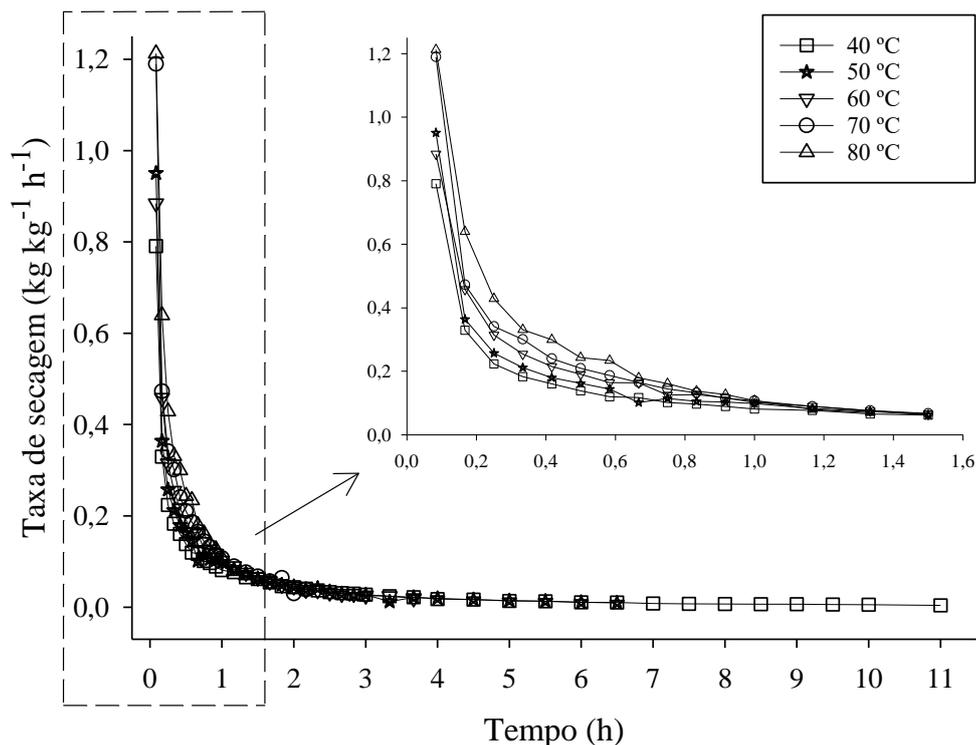


Figura 1. Taxa de secagem para grãos de feijão mungo durante o processo de secagem.

Fonte: Autor, 2023.

Observa-se que no início do processo, as temperaturas mais altas proporcionam maior taxa de secagem em relação às mais baixas, e conforme o grão perde água essa diferença passa a ser menos expressiva. Isso acontece devido à diferença de pressão de vapor d'água nos grãos e do ar de secagem ser menor no final do processo, independente da temperatura.

Comportamento semelhante ao observado por Siqueira, Resende e Chaves (2012). Elevadas temperaturas promovem maior velocidade de remoção de água do produto, fator também observado na secagem de grãos de feijão tangará (QUEQUETO et al., 2017), para a secagem de sementes do feijão carioca (JUNQUEIRA et al., 2018) e feijão guandu (MAIA et al., 2019).

Na Tabela 2, estão apresentadas as magnitudes do critério P, juntamente com a distribuição de resíduos. Observa-se que os modelos de Newton, Exponencial dois termos e Verma não se adequaram à exigência de erro médio relativo (P) inferior a 10% em nenhuma das condições empregadas, fator de exclusão desses modelos, pois indica grande desvio entre os valores observados experimentalmente e os calculados.

Tabela 2. Erro médio relativo (P) e distribuição de resíduos (DR) para os modelos utilizados na cinética de secagem dos grãos de feijão mungo em diversas condições de temperatura.

Modelos	40 °C		50 °C		60 °C		70 °C		80 °C	
	P	DR								
Newton	36,32	T	29,28	T	22,95	T	18,66	T	13,00	T
Page	2,48	A	2,10	A	1,73	A	0,76	A	1,07	A
Henderson e Pabis	18,51	T	13,81	T	11,51	T	10,11	T	8,15	T
Logarítmico	7,55	A	6,39	A	4,49	T	4,38	A	3,17	T
Midilli	0,68	A	0,88	A	0,48	A	0,40	A	0,45	A
Valcam	12,97	T	9,34	T	7,47	T	5,91	T	4,54	T
Dois termos	3,74	A	3,36	A	2,14	A	2,11	A	1,75	A
Exponencial dois termos	27,82	T	21,33	T	15,38	T	12,03	T	13,00	T
Verma	36,32	T	28,91	T	22,90	T	18,63	T	13,00	T
Aproximação da difusão	5,45	A	4,75	A	2,52	A	2,22	A	13,00	T
Thompson	2,17	A	1,84	A	0,27	A	0,69	A	0,83	A

Fonte: Autor, 2023.

Os modelos de Page, Midilli, Dois termos e Thompson apresentaram comportamento aleatório para distribuição de resíduos em todas as temperaturas avaliadas (Tabela 2). Este comportamento é recomendado por caracterizar menor distanciamento entre os valores calculados pelo modelo e os obtidos experimentalmente.

Na Figura 2, demonstra-se a classificação da distribuição de resíduos, sendo aleatória (A) para o modelo de Thompson e tendenciosa (T) para o modelo de Valcam. Entende-se como aleatório quando a distribuição ocorre mais próxima de zero, não formando figuras definidas e não indicando tendenciosidade.

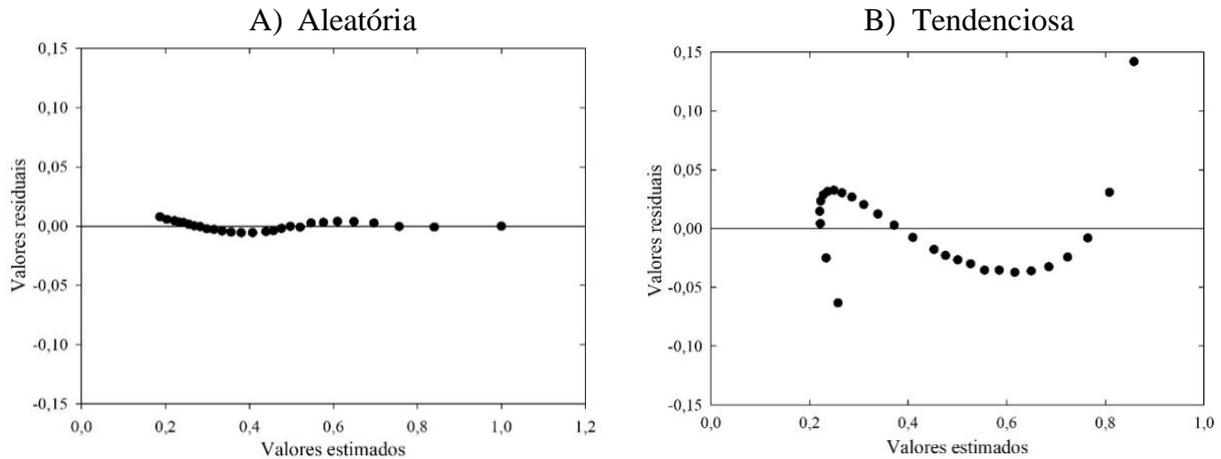


Figura 2. Representação da classificação da distribuição de resíduos para grãos de feijão mungo no decorrer da secagem a 60 °C: A) Aleatória para o modelo de Thompson e B) Tendenciosa para o modelo de Valcam.

Fonte: Autor, 2023.

Os modelos de Page, Midilli, Dois termos e Thompson atendem todos os parâmetros estatísticos para serem escolhidos na descrição da cinética de secagem dos grãos de feijão mungo. Estes modelos têm sido frequentemente recomendados na representação da secagem de diversos produtos agrícolas, como amendoim (ARAUJO et al., 2017); feijão azuki (ALMEIDA et al., 2020); feijão guandu (SILVA et al., 2014); algaroba (CAVALCANTE et al., 2020); amêndoa do baru (TEIXEIRA, ZUNIGA e RIBEIRO, 2015); feijão-caupi (CAMICIA et al., 2015); crambe (FARIA et al., 2012) e feijão carioca (MELO et al., 2016).

Nos Critério de Informação de Akaike (AIC) e Critério de Informação Bayesiana de Schwarz's (BIC), utilizou-se somente os quatro modelos que adequaram-se a todos os pressupostos estatísticos analisados, para todas as temperaturas do ar de secagem (Tabela 3). Sendo o modelo de Thompson o que melhor ajustou-se à secagem de grãos de feijão mungo, pois de acordo com Gomes et al. (2018), valores mais próximos a zero de AIC e BIC proporcionam melhor ajuste do modelo para os dados experimentais. Uma vez que o critério de seleção considera a complexidade do modelo, penalizando a verossimilhança em função do seu número de variáveis (EMILIANO et al., 2009).

Tabela 3. Critério de Informação de Akaike (AIC) e Critério de Informação Bayesiano de Schwarz (BIC) para os modelos que melhor se ajustaram aos dados da secagem.

Modelos	40 °C		50 °C		60 °C		70 °C		80 °C	
	AIC	BIC								
Page	-280	-275	-221	-217	-172	-169	-155	-152	-104	-102
Midilli	-382	-374	-260	-253	-211	-204	-156	-152	-116	-113
Dois Termos	-208	-199	-163	-155	-158	-152	-113	-108	-90	-86
Thompson	-108	-103	-90	-86	-79	-75	-63	-60	-55	-53

Fonte: Autor, 2023.

Na Tabela 4, são apresentados os coeficientes do modelo de Thompson ajustados aos dados experimentais da secagem de grãos de feijão mungo nas temperaturas de 40 a 80 °C. Verifica-se que, somente o parâmetro “b” apresentou tendência de comportamento definido. Conforme eleva-se à temperatura do ar de secagem os valores do parâmetro aumentam. Já para o parâmetro “a” não houve nenhuma tendência observada. Santos et al. (2013) estudaram a secagem de farinha de grãos residuais de urucum, e observaram que com o aumento da temperatura do ar o do parâmetro “b” do modelo de Thompson também se eleva.

Tabela 4. Coeficientes do modelo de Thompson estabelecidos para a secagem dos grãos de feijão mungo em diferentes temperaturas.

Coeficientes	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C
a	-0,078401	-0,080447	-0,258921	-0,24920	-0,447911
b	0,767909	0,835485	0,959052	1,08190	1,304134

Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 3, estão apresentados os valores experimentais e estimados pelo modelo de Thompson, da razão do teor de água em função do tempo de secagem para as cinco temperaturas.

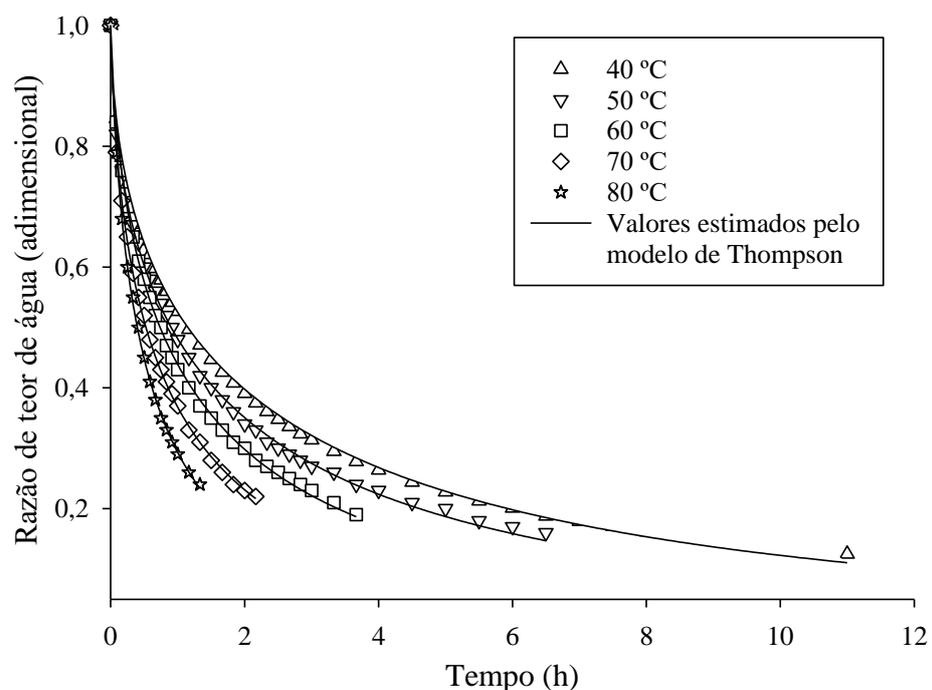


Figura 3. Valores da razão de teor de água experimentais e estimados pelo modelo de Thompson, para grãos de feijão mungo submetidos a diferentes temperaturas do ar de secagem. Fonte: Autor, 2023.

Observa-se que o modelo de Thompson descreve satisfatoriamente a cinética de secagem dos grãos de feijão, devido à proximidade da linha ajustada aos dados experimentais de razão de teor de água. Identifica-se ainda a influência da temperatura sobre o tempo de secagem, onde, na medida em que a temperatura aumenta o tempo de secagem se reduz. Fenômeno semelhante ao observado por Siqueira, Resende e Chaves (2013) e Botelho et al. (2018).

Na Figura 4 estão dispostos os dados experimentais do coeficiente de difusão efetivo para grãos de feijão mungo, submetidos à secagem nas temperaturas de 40 a 80 °C. Percebe-se que a elevação da temperatura do ar de secagem, resulta em um comportamento crescente do coeficiente de difusão efetivo. Segundo Baptestini et al. (2015), o aumento da temperatura, diminui a viscosidade da água promovendo maior fluidez nos capilares, resultando em maior velocidade de saída de água

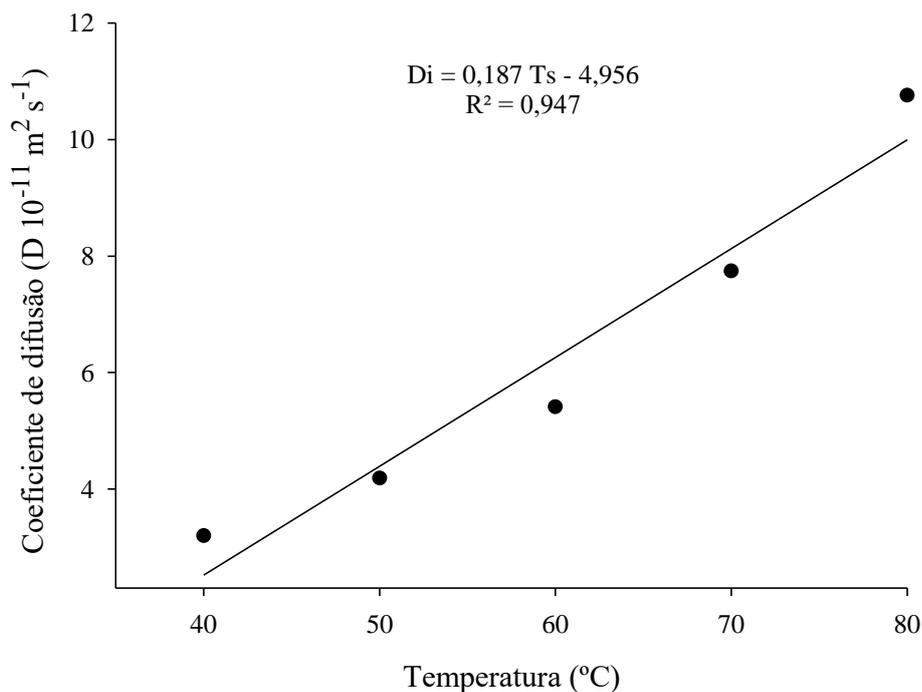


Figura 4. Coeficiente de difusão efetivo obtidos para a secagem de grãos de feijão mungo em diferentes temperaturas de secagem.

Fonte: Autor, 2023.

A variação dos valores do coeficiente de difusão efetivo foi de $3,20 \times 10^{-11}$ a $10,76 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para o feijão mungo, nas temperaturas de secagem de 40 a 80 °C. De acordo com Madamba, Driscoll e Buckle (1996), os valores do coeficiente de difusão efetivo calculados para a cinética de secagem de produtos agrícolas se apresentam dentro de uma faixa de 10^{-9} e $10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Logo, os valores do presente estudo se encontram dentro desta faixa.

A relação entre o coeficiente de difusão efetivo e a temperatura do ar de secagem para produtos agrícola, tem sido observado na literatura por diversos pesquisadores como: Silva et al. (2020) para soja; Rodovalho et al. (2015) pimenta bode; Moraes et al. (2013) feijão-caupi e; Siqueira et al. (2020) trigo mourisco.

Os valores calculados pelo coeficiente de difusão da equação Arrhenius estão apresentados na Figura 5. Observa-se a dependência do coeficiente de difusão em função da temperatura do ar de secagem do feijão mungo, sendo satisfatoriamente representado pela equação.

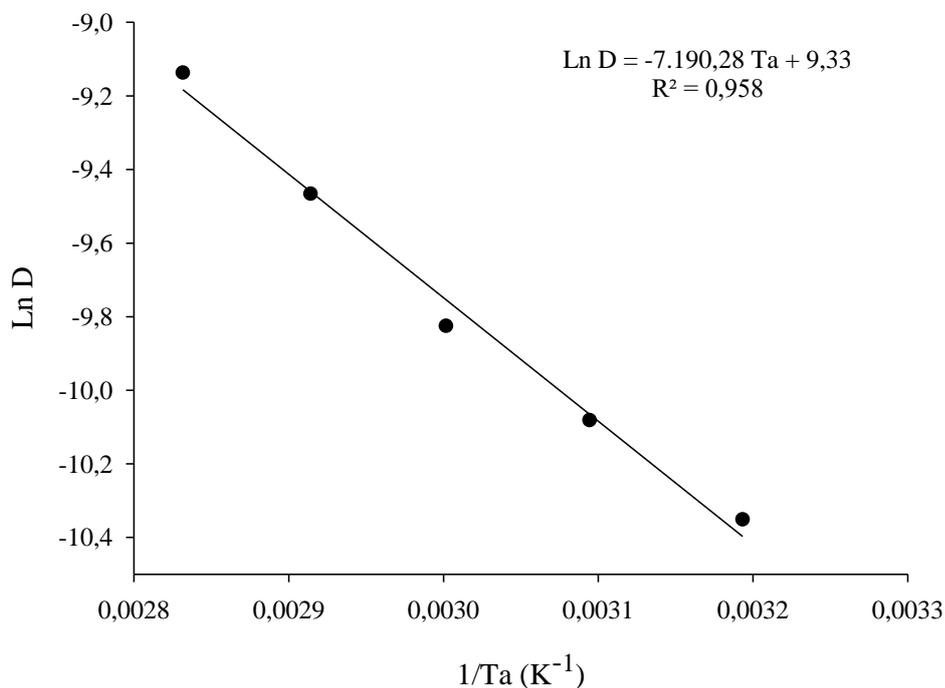


Figura 5. Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo, em função da temperatura do ar de secagem, durante a secagem de grãos de feijão mungo.

Fonte: Autor, 2023.

Termodinamicamente, a energia de ativação corresponde à energia necessária para romper a barreira encontrada pelas moléculas de água, ao migrarem do interior para a periferia do produto ao longo do processo de secagem (SHARMA e PRASAD, 2004). A energia de ativação decorrente no processo de secagem, considerando os mecanismos de difusão de água foi de $59,78 \text{ kJ mol}^{-1}$ para o intervalo de temperatura estudada. Este valor está abaixo do encontrado na literatura científica, para diversos produtos agrícolas, como: lentilha, de $23,50 \text{ kJ mol}^{-1}$ (MANGUEIRA et al., 2021); café, de $52,89 \text{ kJ mol}^{-1}$ (ALVES et al., 2013); girassol, de $26,28 \text{ kJ mol}^{-1}$ (CARVALHO et al., 2018) e; feijão azuki, de $27,69 \text{ kJ mol}^{-1}$ (ALMEIDA et al., 2020).

5 CONCLUSÕES

O modelo de Thompson pode ser utilizado na representação da cinética de secagem dos grãos de feijão mungo.

O aumento da temperatura do ar resultou na maior taxa de secagem e elevação do coeficiente de difusão efetivo.

A energia de ativação para difusão líquida, durante o processo de secagem dos grãos do feijão mungo foi de $59,78 \text{ kJ mol}^{-1}$.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 3, p. 349-353, set. 1999. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v3n3p349-353>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/Zqk4D8Hm3PhgQWY6rdyp9Zd/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 16 de março 2023.

ALCÂNTARA, F. A. de et al. Adubação verde na recuperação da fertilidade de um Latossolo Vermelho-Escuro degradado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 35, p. 277-288, fev. 2000. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2000000200006>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/NWGmFqjWwHMDJK6YtncqY5H/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 20 de março 2023.

ALMEIDA, R. L. J. et al. Cinética de secagem do feijão azuki: modelagem matemática e propriedades termodinâmicas. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 9, n. 3, p. e27932316, jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i3.2316>. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/2316/1877>. Acesso em: 12 de março 2023.

ALVES, G. E. et al. Cinética de secagem de café natural para diferentes temperaturas e baixa umidade relativa. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, n. 2, p. 238-247, abr./jun. 2013. Disponível em: <http://www.coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/422>. Acesso em: 14 de abril 2023.

ANDRADE, E. T. de et al. Cinética de secagem e qualidade de sementes de feijão. **Engevista**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 2, p. 83-95, dez. 2006. DOI: <https://doi.org/10.22409/engevista.v8i2.195>. Disponível em: <https://periodicos.uff.br/engevista/article/view/8807>. Acesso em: 20 de março 2023.

ARAUJO, R. F. et al. Fluxograma de beneficiamento para sementes de feijão-mungo-verde (*Vigna radiata* L.). **Revista Brasileira de Sementes**, Pelotas v. 33, n. 3, p. 387-394, out. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0101-31222011000300001>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbs/a/Gpx8MFsqCxMpL3hqxGybhDs/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 4 de abril 2023.

ARAUJO, W. D. et al. Modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 48, n. 3, p. 448-457, jul./set. 2017. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20170052>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rca/a/79SMDYrqZKTW7rYfYx5p5GN/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 2 de fevereiro 2023.

BAPTESTINI, F. M. et al. Modelagem matemática da secagem de espuma de graviola. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 12, p. 1203-1208, dez. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n12p1203-1208>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/cCrtBk3brbXVcBpVkJhbMXF/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 8 de março 2023.

BOTELHO, F. M. et al. Cinética de secagem e determinação do coeficiente de difusão efetivo de grãos de sorgo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 14, n. 2, p. 260-272, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v14n2p260-272>. Disponível em: https://rbms.abms.org.br/index.php/ojs/article/view/610/pdf_424. Acesso em: 23 de março 2023.

BOTELHO, F. M. et al. Cinética de secagem de grãos de soja: influência varietal. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 26, n. 1, p. 13-25, fev. 2018. DOI: <https://doi.org/10.13083/reveng.v26i1.807>. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/reveng/article/view/725/pdf>. Acesso em: 20 de janeiro 2023.

BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de defesa Agropecuária. Regras para análise de sementes. Brasília, 2009. 398p. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/lfd/a/arquivos-publicacoes-laboratorio/regas-para-analise-de-sementes.pdf>. Acesso em: 9 de fevereiro 2023.

CAMICIA, R. G. da M. et al. Modelagem do processo de secagem de sementes de feijão-caupi. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 28, n. 3, p. 206-214, jul./set. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252015v28n323rc>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rcaat/a/sKhzybXBBkMX9vPFX3GTyCn/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 28 de janeiro 2023.

CARVALHO, J. M. G. et al. Modelagem matemática e propriedades termodinâmicas da secagem do grão de girassol. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v. 11, n. 2, p. 136-149, maio/ago. 2018. Disponível em: <https://rv.ifgoiano.edu.br/periodicos/index.php/gst/article/view/968>. Acesso em: 29 de março 2023.

CAVALCANTE, A. M. de M. et al. Modelos de predição da cinética de secagem dos grãos da algaroba. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 3, p. 11192-11209, mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n3-113>. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/7494/6526>. Acesso em: 30 de janeiro 2023.

CORRÊA, P. C.; MACHADO, P. F.; ANDRADE, E. T. de. Cinética de secagem e qualidade de grãos de milho-pipoca. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 25, n. 1, p. 134-142, jan./fev. 2001. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Ednilton-Andrade/publication/267254190_CINETICA_DE_SECAGEM_E_QUALIDADE_DE_GRAOS_DE_MILHO-PIPOCA/links/5519685e0cf273292e718310/CINETICA-DE-SECAGEM-E-QUALIDADE-DE-GRAOS-DE-MILHO-PIPOCA.pdf. Acesso em: 12 de janeiro 2023.

COUTINHO, C. S. et al. Avaliação de crescimento de plântula de feijão Mungo-verde em diferentes substratos. **Research Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 11, n. 7, p. e58611730675-e58611730675, jun. 2022. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i7.30675>. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/30675/26190>. Acesso em: 16 de janeiro 2023.

CUNHA, E. de Q. et al. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho: I-Atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**,

Viçosa, v. 35, p. 589-602, abr. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000200028>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/rmjQCrnxNQcZWrvVkJnmBdR/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 25 de fevereiro 2023.

EMILIANO, P. C. et al. Foundations and comparison of information criteria: Akaike and Bayesian. **Revista Brasileira de Biometria**, São Paulo, v. 27, n. 3, p. 394-411, 2009. Disponível em: http://jaguar.fcav.unesp.br/RME/fasciculos/v27/v27_n3/A5_PauloCesar.pdf. Acesso em: 27 de fevereiro 2023.

FARIA, R. Q. de et al. Cinética de secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 5, p. 573-583, maio 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000500014>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/9kTqWpFMcynDkRPtjYTNYWN/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 1 de março 2023.

FONTES, J. R. A. et al. Épocas de capina no controle de plantas daninhas na cultura do feijão-mungo-verde [*Vigna radiata* (L.) Wilczek]. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 48, n. 275, p. 37-47, 2001. Disponível em: <http://www.ceres.ufv.br/ojs/index.php/ceres/article/view/2643>. Acesso em: 7 de março 2023.

GOMES, F. P. et al. Drying kinetics of crushed mass of ‘jambu’: Effective diffusivity and activation energy. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 7, p. 499-505, jul. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n7p499-505>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/xzQwqpynNCjzQMNYmw75swJ/?format=pdf>. Acesso em: 20 de março 2023.

JUNQUEIRA, M. H. et al. Desempenho de plântulas de sementes de feijão BRS Estilo submetidas a diferentes temperaturas de secagem. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v. 11, n. 02, p. 304-314, maio/ago. 2018. Disponível em: <https://rv.ifgoiano.edu.br/periodicos/index.php/gst/article/view/1049>. Acesso em: 28 de março 2023.

KAYACIER, A.; SINGH, R. K. Application of effective diffusivity approach for the moisture content prediction of tortilla chips during baking. **Swiss Society of Food Science and Technology**, Zurique v. 37, n. 2, p. 275-281, mar. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2003.09.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643803001695>. Acesso em: 3 de abril 2023.

KEATINGE, J. D. H. et al. Overcoming chronic malnutrition in a future warming world: the key importance of mungbean and vegetable soybean. **Euphytica**, v. 180, n. 1, p. 129-141, mar. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10681-011-0401-6>. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10681-011-0401-6.pdf?pdf>. Acesso em: 10 de abril 2023.

KERES, G. et al. Desempenho de feijoeiro mungo em densidades populacionais e espaçamento entre linhas no Mato Grosso. **Scientia Agraria Paranaensis**, Marechal Cândido Rondon, v. 18, n. 3, p. 251-258, jul./set. 2019. DOI: <https://doi.org/10.18188/sap.v18i3.22379>. Disponível

em: <https://saber.unioeste.br/index.php/scientiaagraria/article/view/22379/15140>. Acesso em: 11 de janeiro 2023.

LIMA, V. L. A. G. de et al. Fenólicos totais e atividade antioxidante do extrato aquoso de broto de feijão-mungo (*Vigna radiata* L.). **Revista de Nutrição**, Campinas, v. 17, n. 1, p. 53-57, jan./mar. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-52732004000100006>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rn/a/7d3XVNG6sNqWP4f53W6hHTB/?format=pdf>. Acesso em: 17 de janeiro 2023.

MACHADO, A. L. de L. et al. Avaliação de componentes químicos em brotos de Fabaceae para o consumo humano. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 4, p. 1071-1078, jul./ago. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542009000400018>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cagro/a/JDQsbxMB9vrHW7WnhYG3zWn/?format=pdf>. Acesso em: 5 de janeiro 2023.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. The thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of food engineering**, Londres, v. 29, n. 1, p. 75-97, jul.1996. DOI: [https://doi-org.ez50.periodicos.capes.gov.br/10.1016/0260-8774\(95\)00062-3](https://doi-org.ez50.periodicos.capes.gov.br/10.1016/0260-8774(95)00062-3). Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez50.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/0260877495000623>. Acesso em: 30 de abril 2023.

MAIA, R. B. et al. Drying kinetics and thermodynamic properties of pigeon pea beans. **Científica**, Dracena, v. 47, n. 2, p. 164-174, jun. 2019. DOI: <https://doi.org/10.15361/1984-5529.2019v47n2p164-174>. Disponível em: <https://cientifica.dracena.unesp.br/index.php/cientifica/article/view/1225/705>. Acesso em: 7 de abril 2023.

MANGUEIRA, E. R. et al. Análise da cinética de secagem em camada fina de grãos de lentilha - *Lens Culinaris*. **Research Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 10, n. 10, p. e581101019258, ago. 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i10.19258>. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/19258/17175>. Acesso em: 3 de abril 2023.

MELO, P. de C. et al. Modelagem matemática das curvas de secagem de grãos de feijão carioca. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 11, n. 3, p. 247-252, set. 2016. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v11i3a5377>. Disponível em: <http://www.agraria.pro.br/ojs32/index.php/RBCA/article/view/v11i3a5377/499>. Acesso em: 22 de março 2023.

MENEGHETTI, V. L. et al. Modelos matemáticos para a secagem intermitente de arroz em casca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 10, p. 1115-1120, out. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012001000012>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/77pw7h4wnHnmj6Ttsq6wbJp/?format=pdf>. Acesso em: 1 de março 2023.

MENEZES, M. L. de et al. Análise da cinética e ajustes de modelos matemáticos aos dados de secagem do bagaço do maracujá-amarelo. **Engevista**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 176-186, ago. 2013. DOI: <https://doi.org/10.22409/engevista.v15i2.443>. Disponível em: <https://periodicos.uff.br/engevista/article/view/8938>. Acesso em: 26 de fevereiro 2023.

- MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A. New model for single-layer drying. **Drying Technology**, New York, v. 20, p. 1503-1513, fev. 2002. DOI: <https://doi.org/10.1081/DRT-120005864>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1081/DRT-120005864?journalCode=ldrt20>. Acesso em: 12 de fevereiro 2023
- MIRANDA, G. V. et al. Divergência genética de linhagens de feijão-mungo (*Vigna radiata* (L.) Wilczek). **Revista Ceres**, Viçosa, v. 46, n. 265, p. 309-319, mar. 1999. Disponível em: <http://www.ceres.ufv.br/ojs/index.php/ceres/article/view/2542/534>. Acesso em: 19 de fevereiro 2023.
- MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, Londres, v. 66, n. 4, p. 513-518, fev. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.04.023>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877404001888>. Acesso em: 8 de março 2023.
- MONTE, J. E. C. et al. Sistema automático para secagem de produtos agrícolas em camada fina. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 30, n. 3, p. 307-312, set. 2008. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v30i3.3499>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/asagr/a/4kWRMt7kYxVgPDkpB88FkPF/?format=pdf>. Acesso em: 11 de março 2023.
- MORAIS, S. J. da S. et al. Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 44, n. 3, p. 455-463, jul./set. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902013000300006>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rca/a/S7dFMdD3QBdPkrXg5gJvZMq/?format=pdf>. Acesso em: 7 de abril 2023.
- OLIVEIRA, L. L. de P. et al. Efeito da água residuária de dessalinizadores na germinação de feijão-mungo-verde. **Agropecuária Científica no Semi-Árido**, Patos, v. 9, n. 02, p. 37-41, abr./jun. 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/264737352_Efeito_da_agua_residuaria_de_dessalinizadores_na_germinacao_de_feijao-mungo-verde. Acesso em: 1 de abril 2023.
- PANCHARIYA, P. C.; POPOVIC, D.; SHARMA, A. L. Thin-layer modeling of black tea drying process. **Journal of Food Engineering**, Londres, v. 52, p. 349-357, maio 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00126-1](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00126-1). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877401001261>. Acesso em: 14 de fevereiro 2023.
- QUEQUETO, W. D. et al. Cinética de secagem dos grãos de feijão cultivar IPR Tangará. **Energia Na Agricultura**, Botucatu, v. 32, n. 4, p. 408-415, out./dez. 2017. DOI: <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2017v32n4p408-415>. Disponível em: <https://energia.fca.unesp.br/index.php/energia/article/view/2762/pdf>. Acesso em: 27 de fevereiro 2023.
- RESENDE, O. et al. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 17-26, 2008. DOI: <https://doi.org/10.15871/1517-8595/rbpa.v10n1p17->

26. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/276466307_modelagem_matematica_do_processo_de_secagem_de_duas_variedades_de_feijao_Phaseolus_vulgaris_L. Acesso em: 17 de fevereiro 2023.

ROCA, E. et al. Effective moisture diffusivity modeling food structure and hygroscopicity. **Food Chemistry**, Londres, v. 106, n. 4, p. 1428-1437, fev. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.03.078>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814607005961?via%3Dihub>. Acesso em: 14 de abril 2023.

RODOVALHO, R. S. et al. Cinética de secagem dos grãos de pimenta bode. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v. 08, n. 02, p. 128-142, maio/ago. 2015. Disponível em: <https://rv.ifgoiano.edu.br/periodicos/index.php/gst/article/view/715>. Acesso em: 23 de fevereiro 2023.

SANTOS, D. da C. et al. Cinética de secagem de farinha de grãos residuais de urucum. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 2, p. 223-231, fev. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000200014>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/QP4YysQg5rjwHjF7KSRqLYs/?format=pdf>. Acesso em: 11 de janeiro 2023.

SANTOS, M. G. et al. Photosynthetic parameters and leaf water potential of five common bean genotypes under mild water deficit. **Biologia Plantarum**, Praga, v. 53, n. 2, p. 229-236, jul. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10535-009-0044-9>. Disponível em: <https://bp.ueb.cas.cz/pdfs/bpl/2009/02/04.pdf>. Acesso em: 9 de janeiro 2023.

SAYÃO, F. A. D.; BRIOSO, P. S. T.; DUQUE, F.F. Comportamento de linhagens de mungo verde em condições de campo em Itaguaí, RJ. **Pesquisa Agropecuária**, Brasília, v.26, p.659-664, maio 1991. Disponível em: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/3389>. Acesso em: 13 de janeiro 2023.

SHARMA, G. P.; PRASAD, S. Effective moisture diffusivity of garlic cloves undergoing microwave-convective drying. **Journal of Food Engineering**, Londres, v. 65, n. 4, p. 609-617, dez. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.02.027>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877404000901>. Acesso em: 13 de fevereiro 2023.

SILVA, E. C. da et al. Germinação e vigor em sementes de feijão mungo-verde em função do período de armazenamento. **Scientia Agraria Paranaensis**, Marechal Cândido Rondon, v. 17, n. 3, p. 385-388, jul./set. 2018. Disponível em: <https://saber.unioeste.br/index.php/scientiaagraria/article/view/19314>. Acesso em: 8 de fevereiro 2023.

SILVA, J. M. H. M. et al. Produção e avaliação nutricional de farinha de moyashi-broto de feijão mungo-verde (*Vigna radiata*, Fabaceae). **Visão Acadêmica**, Curitiba, v. 20, n. 2, p. 01-11, abr./jun. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/acd.v20i2.66886>. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/academica/article/view/66886/38596>. Acesso em: 8 de abril 2023.

SILVA, L. M. de M. et al. Modelos de predição da cinética de secagem dos grãos de guandu. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 17, n. 4, p. 310-318, out./dez. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/1981-6723.3014>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjft/a/TXTCyhJTTfc9CdzFTq4Bpkv/?format=pdf>. Acesso em: 10 de abril 2023.

SILVA, L. P. et al. Drying kinetics of soybean grains. **Científica**, Dracena, v. 48, n. 2, p. 99-106, jun. 2020. DOI: <https://doi.org/10.15361/1984-5529.2020v48n2p99-106>. Disponível em: <https://cientifica.dracena.unesp.br/index.php/cientifica/article/view/1280/792>. Acesso em: 18 de março 2023.

SIQUEIRA, V. C. et al. Drying kinetics and effective diffusion of buckwheat grains. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 44, p. e011320, set. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1413-7054202044011320>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cagro/a/RM5BkhyMm9KdYcsmzmTLxNJ/?format=pdf>. Acesso em: 13 de março 2023.

SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Drying kinetics of Jatropha seeds. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 59, n. 2, p. 171-177, mar./abr. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2012000200004>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rceres/a/PJDPdNSJhyMLFRwMRH5xF3R/?format=pdf>. Acesso em: 13 de março 2023.

SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Mathematical modelling of the drying of jatropha fruit: an empirical comparison. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 2, p. 278-285, abr./jun. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902013000200009>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rca/a/DWjrfRQ8MVDrKJkXSDfB6pR/?format=pdf>. Acesso em: 15 de março 2023.

SOARES, M. A. B.; JORGE, L. M. de M.; MONTANUCI, F. D. Drying kinetics of barley grains and effects on the germination index. **Food Science and Technology**, Campinas, v. 36, n. 4, p. 638-645, out./dez. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-457X.11916>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cta/a/yxKV7pjcT43vnPKBbHnjMHt/?format=pdf>. Acesso em: 25 de fevereiro 2023.

TEIXEIRA, P. C M.; ZUNIGA, A. D. G.; RIBEIRO, L. Modelagem matemática e cinética da secagem da amendoa do baru (*Dipteryx alata vog*). **Enciclopédia Biosfera**, Jandaia, v. 11, n. 21, p. 1309, jun. 2015. Disponível em: <https://conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/1858>. Acesso em: 31 de janeiro 2023.

VIEIRA, R. F. et al. Desempenho de genótipos de feijão-mungo-verde semeados no inverno na Zona da Mata de Minas Gerais. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 58, n. 3, p. 402-405, jun. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2011000300022>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rceres/a/XRC3HtHXbKN69h6bby6y5s/?format=pdf>. Acesso em: 27 de janeiro 2023.

VIEIRA, R. F.; NISHIHARA, M. K. Comportamento de cultivares de mungo-verde (*Vigna radiata*) em Viçosa, Minas Gerais. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 39, n. 221, p. 60-83, 1992.

Disponível em: <http://www.ceres.ufv.br/ojs/index.php/ceres/article/view/2128>. Acesso em: 4 de janeiro 2023.

VIEIRA, R. F.; OLIVEIRA, V. R.; VIEIRA, C. Cultivo do feijão-mungo-verde no verão em Viçosa e em Prudente de Moraes. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 21, n. 1, p. 37-43, mar. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-05362003000100008>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hb/a/ZThBQHqwV9WZGHwGw5HzHCp/?format=pdf>. Acesso em: 17 de janeiro 2023.

WOLFINGER, R. Covariance structure selection in general mixed models. **Communications in Statistics-Simulation and Computation**, v. 22, n. 4, p. 1079-1106, 1993. DOI: <https://doi.org/10.1080/03610919308813143>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03610919308813143>. Acesso em: 11 de janeiro 2023.