

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**

**CINÉTICA DE SECAGEM DE GRÃOS DE FEIJÃO-
CAUPI (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) EM DIFERENTES
TEMPERATURAS E VELOCIDADES DO AR**

RENATO TERTULIANO GARCIA

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2016

CINÉTICA DE SECAGEM DE GRÃOS DE FEIJÃO-CAUPI
(Vigna unguiculata (L.) Walp) **EM DIFERENTES**
TEMPERATURAS E VELOCIDADES DO AR

RENATO TERTULIANO GARCIA
Engenheiro Agrícola

Orientador: PROF. Dr. ANDRÉ LUÍS DUARTE GONELI

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal da
Grande Dourados, como parte das
exigências para conclusão do curso de
Engenharia Agrícola.

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

G216c Garcia, Renato Tertuliano

Cinética de secagem de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) em diferentes temperaturas e velocidades do ar / Renato Tertuliano Garcia --

Dourados: UFGD, 2016.

28f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. André Luis Duarte Goneli

TCC (graduação em Engenharia Agrícola) -Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Grande Dourados.

1. Modelagem matemática. 2. Coeficiente de difusão efetivo. 3. Energia de ativação. 4. Curvas de secagem. I. 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-CAUPI (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) EM DIFERENTES TEMPERATURAS E VELOCIDADES DO AR

Por

Renato Tertuliano Garcia

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

Aprovado em: __/__/____

Prof. Dr. André Luís Duarte Goneli
Orientador – UFGD/FCA

Dra. Valdenise Carbonari Barboza
Membro da Banca – UFGD

Prof. MSc. Elton Aparecido Siqueira Martins
Membro da Banca – UFGD/FCA

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, por sempre iluminar meus caminhos, nessa longa caminhada.

À UFGD, por ser a responsável pela estrutura do curso de Engenharia Agrícola que me proporcionou realizar minha graduação.

Ao orientador Prof. Dr. André Luís Duarte Goneli, pelos ensinamentos, paciência, boas conversas, conselhos e pela amizade.

Ao professor MSc. Elton Aparecido Siqueira Martins pela amizade e dicas valiosas na realização deste trabalho.

Ao amigo Guilherme Cardoso Oba, por toda ajuda, sugestões, conselhos e pela amizade na realização deste trabalho.

A todos os professores da Faculdade de Ciências Agrárias por transmitir todos os seus conhecimentos, para minha formação de Engenheiro Agrícola.

Aos meus pais, Leandro Oliveira Garcia e Luzanira Tertuliano da Costa, e aos meus irmãos, pelo amor e incentivo em todos os momentos da minha vida.

Enfim, a todos aqueles que de uma forma ou de outra contribuíram para a minha formação e execução deste trabalho.

A todos a minha gratidão.

SUMÁRIO

RESUMO.....	v
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Cultura do feijão-caupi.....	3
2.2. Secagem	4
3. MATERIAL E MÉTODOS	7
3.1. Curvas de secagem dos grãos de feijão-caupi em camada delgada	7
3.2. Determinação do coeficiente de difusão efetivo	10
3.3. Análise estatística.....	11
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	13
4.1. Cinética de secagem em camada delgada dos grãos de feijão-caupi	13
4.2. Coeficiente de difusão efetivo.....	21
5. CONCLUSÕES	24
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

GARCIA, Renato Tertuliano. **Cinética de secagem de grãos de feijão-caupi** (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) **em diferentes temperaturas e velocidades do ar**. 2016. 28p. Monografia (Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados – MS.

RESUMO

O feijão-caupi é uma cultura com significativa importância socioeconômica para as regiões Norte e Nordeste do Brasil, e que vem se expandindo para a região centro-oeste, devido a sua ampla adaptabilidade às condições tropicais e ao seu baixo custo de produção. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da temperatura e velocidade do ar sobre a cinética de secagem em camada delgada dos grãos de feijão-caupi. Foram utilizados grãos de feijão-caupi colhidos com teor de água inicial de, aproximadamente, 0,54 decimal b.s.. A secagem dos grãos em camada delgada foi realizada com diferentes condições controladas de temperatura (40, 50, 60,70 e 80 °C), e velocidades do ar (0,4; 1,0 e 1,6 m s⁻¹), em um secador experimental de leito fixo. Aos dados experimentais, foram ajustados oito diferentes modelos matemáticos citados na literatura específica e utilizados para a representação do processo de secagem de produtos agrícolas. Com base nos resultados obtidos, conclui-se que com exceção dos modelos Exponencial de Dois Termos e Henderson e Pabis modificado, todos os demais modelos ajustados aos dados experimentais da secagem dos grãos de feijão-caupi em camada delgada apresentaram ajuste satisfatório. O modelo de Page foi o escolhido para representar o fenômeno de secagem em camada delgada dos grãos de feijão-caupi. O coeficiente de difusão efetivo aumenta com a elevação da temperatura, sendo que sua relação com a temperatura do ar de secagem pode ser descrita pela equação de Arrhenius, que apresenta uma energia de ativação para a difusão líquida durante a secagem de 23,03; 28,30 e 29,05 kJ mol⁻¹, para as velocidades do ar de 0,4; 1,0 e 1,6 m s⁻¹, respectivamente.

Palavras-chave: Modelagem matemática, Coeficiente de difusão efetivo, Energia de ativação, Curvas de secagem.

1. INTRODUÇÃO

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) é uma cultura com significativa importância socioeconômica para as regiões Norte e Nordeste do Brasil. Nos últimos anos o seu cultivo vem se expandindo para a região centro-oeste do país, devido a sua alta adaptabilidade às condições tropicais e ao seu baixo custo de produção (FREIRE FILHO et al., 2008). No entanto, há poucas informações sobre o manejo de pós-colheita dos grãos de feijão-caupi na literatura, principalmente no que diz respeito ao processo de secagem do produto, visando seu correto armazenamento.

Nesse sentido, o conhecimento sobre o comportamento do produto durante a secagem é de fundamental importância para o manejo deste processo após a colheita, a fim de minimizar os custos de produção e melhoria da qualidade do produto.

Para manter a qualidade dos produtos agrícolas após a colheita, a secagem é um dos processos mais empregados como forma de reduzir a atividade de água. Com a redução do teor de água até níveis seguros, inibe-se o crescimento de microrganismos, reduz-se a possibilidade de proliferação de insetos pragas, além de minimizar mudanças físicas e químicas durante o armazenamento, que contribuem decisivamente para a perda de qualidade do produto.

Assim como muitos produtos agrícolas, os grãos de feijão-caupi são normalmente colhidos com um teor de água inadequado para uma correta e eficiente conservação. Com isso, a redução da quantidade de água do material deve ser conduzida com a finalidade de se reduzir a atividade biológica e as mudanças químicas e físicas que ocorrem no produto durante o armazenamento.

Neste contexto, a secagem é um dos processos mais eficientes utilizados para assegurar a qualidade e estabilidade do produto após a colheita. A secagem é uma das etapas da pós-colheita de produtos agrícolas que tem por finalidade retirar o excesso de água contido no grão por meio de evaporação. A remoção de água dos produtos agrícolas consiste em um processo, envolvendo a transferência simultânea de calor e massa entre o produto e o ar de secagem, no qual o aumento da temperatura provoca o aumento da pressão parcial de vapor na superfície do produto, provocando a redução no teor de água do mesmo.

Considerando-se a importância do feijão-caupi e do estudo teórico do processo de secagem de produtos agrícolas, o presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar e modelar a cinética de secagem dos grãos de feijão-caupi em camada delgada para diferentes temperaturas e velocidades do ar de secagem, bem como determinar o coeficiente de difusão efetivo e a energia de ativação durante este processo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Cultura do feijão-caupi

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) é uma cultura originária da África, que foi introduzida no Brasil em meados do século XVI pelos colonizadores portugueses, no estado da Bahia (FREIRE FILHO, 1988). A planta é também conhecida pelos nomes feijão-de-corda, macassar, macacá, ervilha-de-vaca, feijão-verde, feijão-do-campo (BORÉM e CARNEIRO, 2006).

É uma planta herbácea, anual, autógama e que oferece elevada resistência a climas com temperaturas elevadas. É uma das leguminosas melhor adaptadas, versátil e nutritiva entre as espécies cultivadas, sendo um importante alimento e componente essencial dos sistemas de produção nas regiões secas dos trópicos, cobrindo parte da Ásia, Estados Unidos, Oriente Médio e Américas Central e do Sul (SINGH et al., 2002).

A cultura é bem adaptada às condições climáticas brasileiras, como a presentes nas regiões Norte e Nordeste. Nessas regiões, o feijão-caupi é um dos principais componentes da dieta alimentar da população, especialmente a população da zona rural. Pelo seu valor nutritivo, é cultivado principalmente, para a produção de grãos secos ou verdes, visando o consumo humano *in natura*, na forma de conserva ou desidratado. O feijão-caupi ainda pode ser utilizado como feno, forragem verde, farinha para alimentação animal e como adubação verde para proteger o solo (EMBRAPA MEIO-NORTE, 2016).

O feijão-caupi é cultivado, principalmente, por pequenos agricultores nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, onde se constitui numa das principais alternativas sociais e econômicas de suprimento alimentar e geração de emprego, especialmente para as populações rurais, sendo a sua principal fonte protéica vegetal (FREIRE FILHO et al., 2005).

O feijão-caupi vem passando por importantes avanços técnico-científicos e socioeconômicos no Brasil, e com isso torna-se necessário desenvolver estudos sobre o processo de secagem desta cultura, fomentando assim informações para projetar, otimizar, e operar com mais eficiência equipamentos destinados à colheita e pós-colheita.

2.2. Secagem

A secagem 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 do excesso de água contida no grão por meio de evaporação, geralmente causada por convecção forçada de ar aquecido (BROOKER et al., 1992). São vários os fatores que influenciam o processo de secagem, dentre eles: método de secagem, temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem. A falta do controle destes fatores pode comprometer a qualidade final do produto.

Uma camada delgada é formada pela espessura de uma única unidade do produto. A equação de secagem em camada delgada, juntamente com as equações representativas de outras propriedades físicas específicas do produto em estudo, formam um conjunto de relações matemáticas que posteriormente auxiliará nos cálculos e no entendimento dos processos de secagem em camada espessa. Considera-se que uma camada espessa seja constituída de sucessivas camadas delgadas (KASHANINEJAD et al., 2007).

Para a simulação de secagem, cujo princípio se fundamenta na secagem de sucessivas camadas delgadas do produto, utiliza-se um modelo matemático que represente satisfatoriamente a perda de água do produto durante o processo de secagem (BERBERT et al., 1995).

Para descrever a cinética de secagem de produtos agrícolas, são utilizados três tipos de modelos de secagem em camada delgada, sendo eles os modelos teóricos, semi-teóricos e os empíricos. Os modelos teóricos, consideram apenas a resistência interna, a transferência de calor e água entre o produto e o ar de secagem. Os modelos semi-teóricos e os empíricos, consideram somente a resistência externa, a temperatura e umidade relativa do ar de secagem (MIDILLI et al., 2002; DOYMAZ, 2005).

Os modelos semi-teóricos são geralmente derivados da simplificação da segunda lei de Fick ou de modificações de modelos simplificados, que oferecem, frequentemente, facilidade de uso, sendo válidos somente para as faixas de temperatura, umidade relativa, velocidade do ar e teor de água em que eles foram obtidos (OZDEMIR & DEVRES, 1999; PANCHARIYA et al., 2002). Na literatura são relatados vários modelos matemáticos para descrever a secagem em camada delgada, que foram propostos por diferentes autores para diversos produtos

(MIDILLI et al., 2002; LAHSASNI et al., 2004; MOHAPATRA & RAO, 2005; CORRÊA et al., 2007).

Os modelos empíricos de secagem apresentam uma relação direta entre o teor de água do produto e o tempo de secagem. Eles negligenciam os fundamentos do processo de secagem e seus parâmetros não têm qualquer significado físico. Dessa forma, os modelos empíricos não fornecem uma perspectiva dos importantes processos que ocorrem durante a secagem, embora em alguns casos possam descrever as curvas de secagem para determinadas condições experimentais (KEEY, 1972). Entre estes, o modelo proposto por Thompson et al. (1968), tem sido bastante testado em estudos de cinética de secagem de produtos agrícolas (SOUSA et al., 2011; SIQUEIRA et al., 2013; GONELI et al., 2014; RESENDE et al., 2014).

Entre os modelos teóricos que são aplicados ao processo de secagem, o modelo da difusão é o mais estudado. Este modelo é aplicado em processos de secagem de um sólido à taxa decrescente, considerando, como mecanismo principal, a difusão baseada na segunda Lei de Fick, que descreve que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água (PARK et al., 2002). A estrutura dos produtos agrícolas geralmente apresenta microporos ou capilares, o que permite que a movimentação de água durante o processo de secagem envolva diferentes mecanismos, como a difusão molecular, difusão capilar, difusão de superfície, fluxo hidrodinâmico, difusão de vapor e difusão térmica (GONELI et al., 2009).

Segundo Goneli et al. (2009), a teoria da difusão líquida assume que não há influência da capilaridade no processo, despreza os efeitos da transferência de energia e massa de um corpo para outro, podendo induzir a erros experimentais, e também considera que os corpos entram em equilíbrio térmico com o ar instantaneamente.

Uma variável relevante na qualidade de produtos submetidos à secagem é a velocidade do ar usada no processo. Em algumas situações, uma vez aumentada a taxa de insuflação do ar através do produto, pode ocorrer aumento da taxa de água removida, ocasionando diminuição do tempo de secagem e podendo causar alterações qualitativas no produto. Dessa forma, a combinação desse parâmetro com a temperatura irá interferir diretamente na taxa de secagem, podendo contribuir de forma significativa na diminuição do tempo gasto no processo.

A interação entre as variáveis temperatura e velocidade do ar durante o processo de secagem em camada delgada, vem sendo estudado para diversos produtos agrícolas para verificar o efeito destas no comportamento da cinética de secagem e difusão efetiva, como em nozes de pistachio (KASHANINEJAD et al., 2007), frutos de azeitona russa (MAYVAN et al., 2012) e grãos de sorgo (RESENDE et al., 2014).

3. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Pré Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas, da Faculdade de Ciências Agrárias, pertencente à Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD, no município de Dourados, MS.

Foram utilizados grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.), cultivar BRS Guariba, produzidas na Fazenda Experimental da Faculdade de Ciências Agrárias (FAECA) da UFGD, entre os meses de fevereiro a maio de 2015. Ao longo do ciclo da cultura foram realizados os devidos tratos culturais, com intuito de se produzir grãos de feijão-caupi com qualidade adequada.

As vagens de feijão-caupi foram colhidas manualmente, para evitar qualquer tipo de influência no produto, sendo realizada já no campo uma pré-seleção das vagens, onde procurou-se evitar vagens defeituosas, no intuito de evitar qualquer tipo de influência indesejável que pudesse interferir nos resultados da pesquisa. Posteriormente as vagens foram debulhadas manualmente, seguindo o mesmo critério de seleção anteriormente aplicado e acondicionadas em saco plástico e armazenadas em incubadora do tipo B.O.D., à temperatura de 3,5 °C, para evitar troca de água na forma de vapor entre o produto e o ambiente externo, visando assim, manter e homogeneizar teor de água do produto.

Após a colheita, os grãos apresentaram teores de água próximos a 0,54 decimal b.s.. O teor de água do produto foi determinado pelo método gravimétrico em estufa, a 105 ± 1 °C, durante 24h, em duas repetições (BRASIL, 2009).

3.1. Curvas de secagem dos grãos de feijão-caupi em camada delgada

O produto foi submetido à secagem em um secador experimental de leito fixo, esquematizado na Figura 1, que possui como fonte de aquecimento um conjunto de resistências elétricas, totalizando 12 kW de potência e um ventilador centrifugo com potência de 1 cv, do fabricante Ibram, modelo VSI-160. O controle de temperatura foi realizado por meio de um controlador universal de processos, modelo N1200, da marca Novus, trabalhando com controle Proporcional-Integral-Derivativo

(PID), e o fluxo de ar foi selecionado por meio de um inversor de frequência ligado ao motor do ventilador.

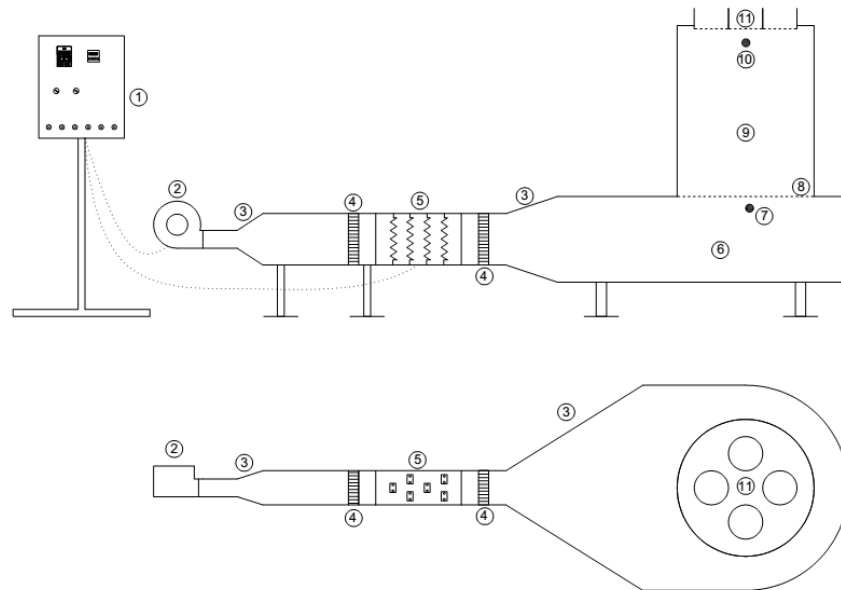


FIGURA 1. Secador experimental utilizado na secagem dos grãos de feijão-caupi. (1- Painel de controle de temperatura e fluxo de ar; 2- Ventilador centrífugo; 3- Expansões; 4- Homogeneizadores de ar; 5- Conjunto de resistências elétricas; 6- Plenum; 7- Ponto de medição de temperatura para secagem em camada espessa; 8- Fundo telado para secagem em camada espessa; 9- Leito de secagem em camada espessa; 10- Ponto de medição de temperatura para secagem em camada delgada; 11- Bandejas para secagem em camada delgada).

Para a secagem em camada delgada dos grãos de feijão-caupi foram utilizadas diferentes temperaturas (40, 50, 60, 70 e 80 °C) e diferentes velocidades (0,4; 1,0 e 1,6 m s⁻¹) do ar de secagem. A redução do teor de água durante a secagem foi acompanhada com auxílio de uma balança analítica com resolução de 0,01 g pelo método gravimétrico ou de perda de massa. O tempo entre as leituras foi controlado por meio da diferença de massas. Foi considerado ponto final de secagem, quando os grãos de feijão-caupi atingiram o teor de água de 0,103 decimal b.s.. A razão de umidade (RU) dos grãos de feijão-caupi durante a secagem nas diferentes condições de ar foi determinada por meio da seguinte expressão:

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} \quad (1)$$

em que:

RU: razão de umidade do produto, adimensional;

U: teor de água do produto em um determinado tempo, decimal b.s.;

U_e : teor de água de equilíbrio do produto, decimal b.s.; e

U_i : teor de água inicial do produto, decimal b.s.

Os dados do teor de água de equilíbrio, necessários para a determinação da razão de umidade nas condições de temperatura e umidade relativa do ar avaliadas no presente estudo, foram obtidos a partir do trabalho desenvolvido por Ajibola et al. (2003), conforme mostrado na equação 2.

$$U_e^* = \left[\frac{\ln(1 - UR)}{-5,69 \times 10^{-5} (T + 72,10)} \right] \left(\frac{1}{2,06} \right) \quad (2)$$

em que:

UR: umidade relativa, decimal;

T: temperatura do ambiente, °C; e

U_e^* : umidade de equilíbrio, decimal b.s.

Modelos matemáticos tradicionalmente utilizados por vários pesquisadores para predizer o fenômeno da secagem de produtos agrícolas foram ajustados aos dados observados neste trabalho (GONELI et al., 2009; MARTINAZZO et al., 2010; RESENDE et al., 2011; SOUSA et al., 2011; FARIA et al., 2012; SIQUEIRA et al., 2013; GONELI et al., 2014; RESENDE et al., 2014). Na Tabela 1, apresentam-se os modelos, que foram avaliados neste trabalho.

TABELA 1. Modelos matemáticos ajustados às curvas de secagem de grãos de feijão-caupi.

Designação do modelo	Modelo	
Aproximação da difusão	$RU = a \exp(-k \theta) + (1 - a) \exp(-k b \theta)$	(3)
Dois termos	$RU = a \exp(-k_0 \theta) + b \exp(-k_1 \theta)$	(4)
Exponencial de Dois Termos	$RU = a \exp(-k \theta) + (1 - a) \exp(-k a \theta)$	(5)
Henderson e Pabismodificado	$RU = a \exp(-k \theta) + b \exp(-k_0 \theta) + c \exp(-k_1 \theta)$	(6)
Logarítmico	$RU = a \exp(-k \theta) + c$	(7)
Midilli	$RU = a \exp(-k \theta^n) + b \theta$	(8)
Page	$RU = \exp(-k \theta^n)$	(9)
Thompson	$RU = \exp\{[-a - (a^2 + 4 b \theta)^{0,5}]/2b\}$	(10)

em que:

θ : tempo de secagem, h;

k, k_0, k_1 : constantes de secagem, h^{-1} ; e

a, b, c, n : coeficientes dos modelos.

3.2. Determinação do coeficiente de difusão efetivo

O coeficiente de difusão efetivo dos grãos de feijão-caupi, para as diferentes condições de secagem, foi calculado utilizando a Equação 11, baseado na teoria da difusão líquida. Essa equação é a solução analítica para a segunda lei de Fick, considerando a forma geométrica do produto como esférica e com aproximação de oito termos.

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n_t=1}^{\infty} \frac{1}{n_t^2} \exp \left[-\frac{n_t^2 \cdot \pi^2 \cdot D_i \cdot \theta}{9} \left(\frac{3}{R_e} \right)^2 \right] \quad (11)$$

em que:

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

R_e : raio equivalente, m; e

n_t : número de termos;

Para o cálculo do raio equivalente utilizado no modelo de difusão efetivo (Equação 11), fez-se a medição dos três eixos ortogonais dos grãos de feijão-caupi, sendo eles comprimento (a), largura (b) e espessura (c). Com auxílio de um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm, foram escolhidos 100 grãos aleatoriamente e medidos. O volume de cada grão foi calculado com base nos diâmetros perpendiculares, segundo a Equação 12, descrita por Mohsenin (1986).

$$V = \pi \left(\frac{a b c}{6} \right) \quad (12)$$

em que:

V : volume, mm^3 ;

a : comprimento, mm;

b: largura, mm; e

c: espessura, mm.

A escolha desta equação para calcular o volume individual dos grãos de feijão-caupi baseou-se em testes preliminares realizados com tolueno, onde o volume real do produto foi comparado ao volume calculado pela equação. Moraes et al. (2013) e Camicia et al. (2015) também consideraram como esferóides triaxiais, grãos de feijão-caupi, cultivares BRS Maratão e BRS Guariba, respectivamente.

Para avaliação do efeito da temperatura sobre o coeficiente de difusão efetivo, foi utilizada a equação de Arrhenius, descrita da seguinte forma:

$$D_i = D_o \exp\left(\frac{E_a}{R T_a}\right) \quad (13)$$

em que:

D_o : fator pré-exponencial;

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

T_a : temperatura absoluta, K; e

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

3.3. Análise estatística

Todos os dados experimentais de cinética de secagem foram submetidos à análise de regressão e seleção do modelo matemático adequado para expressar a relação entre as variáveis estudadas. Ajustaram-se aos dados experimentais, oito modelos matemáticos para expressar a relação entre as variáveis analisadas através do programa computacional Statistica 8.0.

O grau de ajuste de cada modelo matemático, em todas as condições de secagem, foi analisado pelas magnitudes do coeficiente de determinação (R^2 , em decimal), do erro médio relativo (P, em %) e do desvio padrão da estimativa (SE, em decimal). O erro médio relativo e o desvio padrão da estimativa foram calculados conforme descrito pelas Equações 14 e 15, respectivamente.

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

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (15)$$

em que:

n: número de observações experimentais;

Y: valor observado experimentalmente;

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

GLR: graus de liberdade do modelo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Cinética de secagem em camada delgada dos grãos de feijão-caupi

Observa-se que, dentre os oito modelos matemáticos utilizados para prever o fenômeno de secagem dos grãos de feijão-caupi, apenas os modelos Exponencial de Dois Termos (5) e Henderson e Pabis modificado (6), não apresentaram valores do erro médio relativo inferiores a 10% (Tabela 2). Segundo Kashaninejad et al. (2007) os valores do erro médio relativo indicam desvio dos valores observados em relação à curva estimada pelo modelo, enquanto Mohapatra & Rao (2005) consideram modelos com valores de erro médio relativo superiores a 10% inapropriados para a descrição de um determinado fenômeno.

Outro parâmetro calculado foi o desvio padrão da estimativa. Este parâmetro estatístico indica a capacidade de um modelo em descrever com fidelidade um determinado processo físico, sendo que quanto menor for sua magnitude, melhor será a qualidade de ajuste do modelo em relação aos dados observados (DRAPER & SMITH, 1998).

Assim, conforme a Tabela 2, nota-se que os modelos Aproximação da difusão (3), Dois Termos (4), Midilli (8), Page (9) e Thompson (10), se destacam dentre os demais, por apresentarem os menores valores de desvio padrão da estimativa para todas as condições do ar de secagem.

TABELA 2. Erro médio estimado (SE, em decimal), erro médio relativo (P, em %) e coeficiente de determinação (R^2 , em decimal) dos diferentes modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais da secagem em camada delgada dos grãos de feijão-caupi em diferentes condições de secagem.

Modelos	0,4 m s ⁻¹			1,0 m s ⁻¹			1,6 m s ⁻¹		
	SE	P	R ²	SE	P	R ²	SE	P	R ²
40°C									
(3)	0,0138	4,4830	0,9972	0,0157	5,2091	0,9961	0,0183	5,4037	0,9948
(4)	0,0127	3,9881	0,9977	0,0147	4,7011	0,9967	0,0172	4,8012	0,9956
(5)	0,0673	20,8246	0,9309	0,0707	21,6990	0,9191	0,0776	21,7521	0,9033
(6)	0,0023	0,5359	0,9999	0,0035	0,9882	0,9998	0,0042	0,9773	0,9998
(7)	0,0350	8,1140	0,9819	0,0367	8,3422	0,9788	0,0379	7,5994	0,9777
(8)	0,0047	0,9797	0,9997	0,0052	1,5848	0,9996	0,0054	1,5340	0,9996
(9)	0,0049	0,9967	0,9996	0,0071	2,1285	0,9992	0,0074	1,9719	0,9991
(10)	0,0099	3,3050	0,9985	0,0129	4,5502	0,9973	0,0121	3,7758	0,9976
50°C									
(3)	0,0097	2,4620	0,9984	0,0114	3,1526	0,9977	0,0160	4,3505	0,9955
(4)	0,0092	2,2836	0,9986	0,0110	2,8989	0,9979	0,0153	3,9359	0,9960
(5)	0,0577	14,2628	0,9410	0,0612	16,0436	0,9312	0,0731	19,6786	0,9026
(6)	0,0015	0,3557	0,9999	0,0015	0,3527	0,9999	0,0031	0,6389	0,9998
(7)	0,0310	5,9696	0,9835	0,0316	6,0393	0,9822	0,0349	6,2178	0,9785
(8)	0,0049	0,7739	0,9996	0,0049	1,0200	0,9996	0,0052	1,3675	0,9995
(9)	0,0052	0,9552	0,9995	0,0054	1,1272	0,9995	0,0072	1,7205	0,9991
(10)	0,0097	2,6156	0,9983	0,0106	2,9293	0,9979	0,0122	3,4181	0,9973
60°C									
(3)	0,0066	1,7037	0,9992	0,0093	2,2810	0,9985	0,0130	3,3264	0,9967
(4)	0,0067	1,6880	0,9992	0,0090	2,1630	0,9986	0,0129	3,1816	0,9969
(5)	0,0453	11,1458	0,9633	0,0566	12,9450	0,9420	0,0629	15,5284	0,9213
(6)	0,0890	21,4042	0,8771	0,1583	16,7401	0,6052	0,1708	21,4842	0,5031
(7)	0,0275	5,3127	0,9870	0,0298	5,2610	0,9844	0,0321	5,4892	0,9803
(8)	0,0074	0,8902	0,9991	0,0044	0,8457	0,9997	0,0043	1,0611	0,9997
(9)	0,0075	0,8604	0,9990	0,0063	1,4599	0,9993	0,0061	1,3434	0,9993
(10)	0,0095	2,4328	0,9984	0,0130	3,3191	0,9970	0,0120	2,9839	0,9972
70°C									
(3)	0,0054	1,2836	0,9995	0,0080	1,7704	0,9988	0,0101	2,2950	0,9980
(4)	0,0055	1,2772	0,9995	0,0078	1,6861	0,9989	0,0098	2,2041	0,9982
(5)	0,0350	7,7994	0,9779	0,0484	10,2211	0,9551	0,0543	11,6173	0,9403
(6)	0,0057	1,2772	0,9995	0,0831	8,5072	0,8874	0,0734	7,3978	0,9067
(7)	0,0234	4,1257	0,9904	0,0278	4,4175	0,9857	0,0295	4,5912	0,9830
(8)	0,0065	0,8839	0,9993	0,0042	0,8476	0,9997	0,0042	0,9724	0,9997
(9)	0,0067	0,8514	0,9992	0,0062	1,4130	0,9993	0,0067	1,5457	0,9991
(10)	0,0103	2,5488	0,9981	0,0134	3,2500	0,9966	0,0131	3,2589	0,9965
80°C									
(3)	0,0044	1,0452	0,9997	0,0055	1,3126	0,9994	0,0104	2,4482	0,9979
(4)	0,0044	1,0454	0,9997	0,0055	1,2938	0,9994	0,0104	2,4052	0,9980
(5)	0,0252	5,3712	0,9887	0,0365	7,7106	0,9741	0,0509	11,0439	0,9467
(6)	0,0017	0,1507	0,9999	0,0007	0,0920	0,9999	0,0937	8,4034	0,8495
(7)	0,0201	3,6070	0,9931	0,0236	4,0327	0,9895	0,0291	4,7082	0,9833
(8)	0,0057	0,7437	0,9995	0,0046	0,7471	0,9996	0,0043	0,9685	0,9996
(9)	0,0059	0,7077	0,9994	0,0051	0,9452	0,9995	0,0054	1,0913	0,9994
(10)	0,0094	2,2125	0,9984	0,0111	2,5318	0,9976	0,0120	2,6918	0,9971

Com base nos parâmetros estatísticos pré-estabelecidos, apenas os modelos Exponencial de Dois Termos (5) e Henderson e Pabis modificado (6) não são adequados para representar o processo de secagem em todas as condições do ar de secagem estudado. Assim, todos os outros modelos podem ser utilizados para descrever o processo de secagem de grãos de feijão-caupi.

Dentre os modelos recomendados para descrever a secagem em camada delgada dos grãos de feijão-caupi, nas diferentes condições do ar de secagem estudadas, foi selecionado o modelo de Page (9) devido a sua simplicidade matemática, por possuir apenas dois parâmetros, simplificando sua aplicação em simulações matemáticas do processo de secagem, e também devido a sua tradicionalidade em descrever processos de secagem em camada delgada de produtos agrícolas, como de sementes de pinhão manso (RESENDE et al., 2011), canola (DUC et al., 2011), grãos de amendoim (ARAUJO, 2013), frutos de pinhão manso (SIQUEIRA et al., 2013), grãos de sorgo (RESENDE et al., 2014), grãos de cártamo (MARTINS, 2015).

Analisando a Figura 2 é possível observar que os dados de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Page, durante a secagem dos grãos de feijão-caupi, acompanham uma reta com inclinação de 45° reforçando assim a aplicabilidade do modelo de Page para representar o processo de secagem estudado neste trabalho.

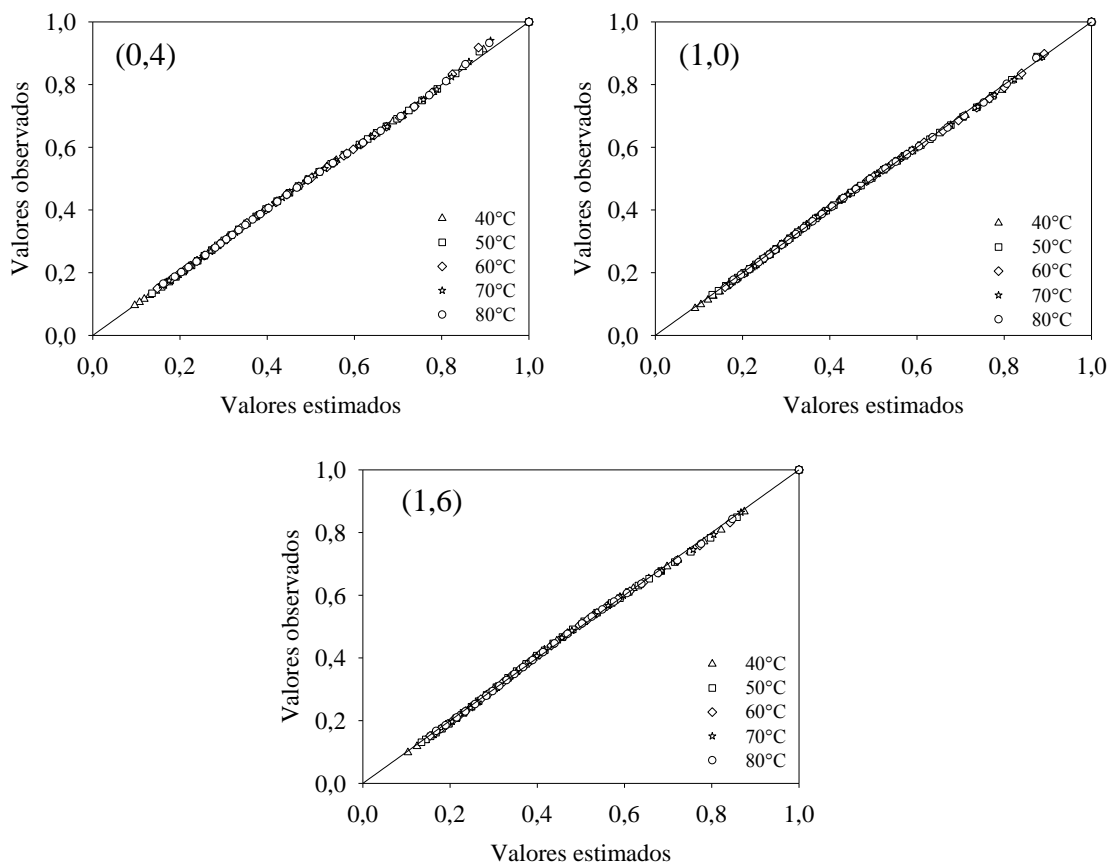


FIGURA 2. Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Page para a secagem dos grãos de feijão-caupi, em camada delgada, em diferentes temperaturas do ar de secagem, nas velocidades de 0,4; 1,0; e 1,6 m s^{-1} .

Nas Figuras 3, 4 e 5 são apresentadas, respectivamente, as curvas de secagem em camada delgada dos grãos de feijão-caupi nas velocidades do ar de 0,4; 1,0 e 1,6 m s^{-1} . Nas figuras são apresentados os valores observados e estimados, pelo modelo de Page, de razão de umidade em função do tempo para as temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C, para cada uma das três velocidades do ar de secagem. Diante da proximidade dos valores observados aos ajustados pelo modelo de Page, verifica-se que o ajuste do modelo foi satisfatório.

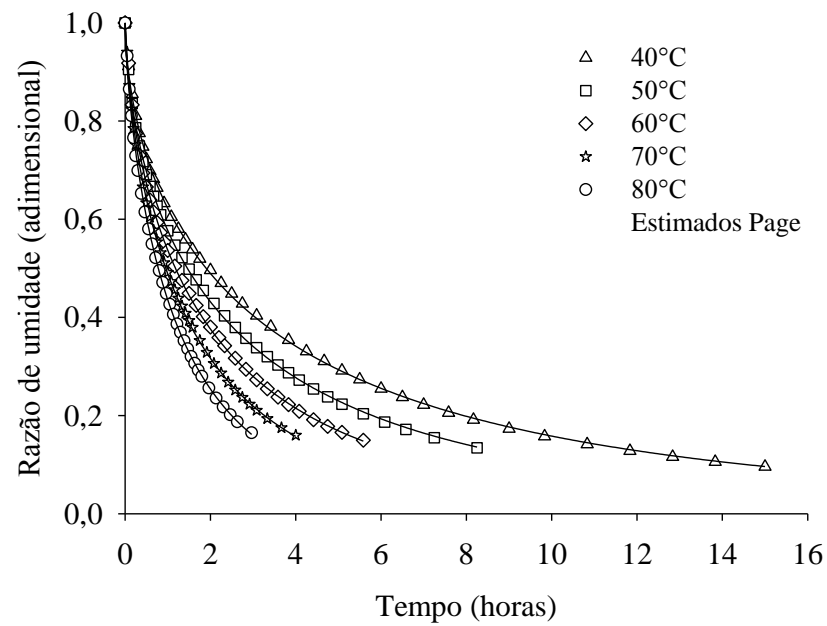


FIGURA 3. Valores de razão de umidade experimentais e estimados, pelo modelo de Page, para a secagem dos grãos de feijão-caupi em camada delgada em diferentes temperaturas na velocidade do ar de secagem de $0,4 \text{ m s}^{-1}$.

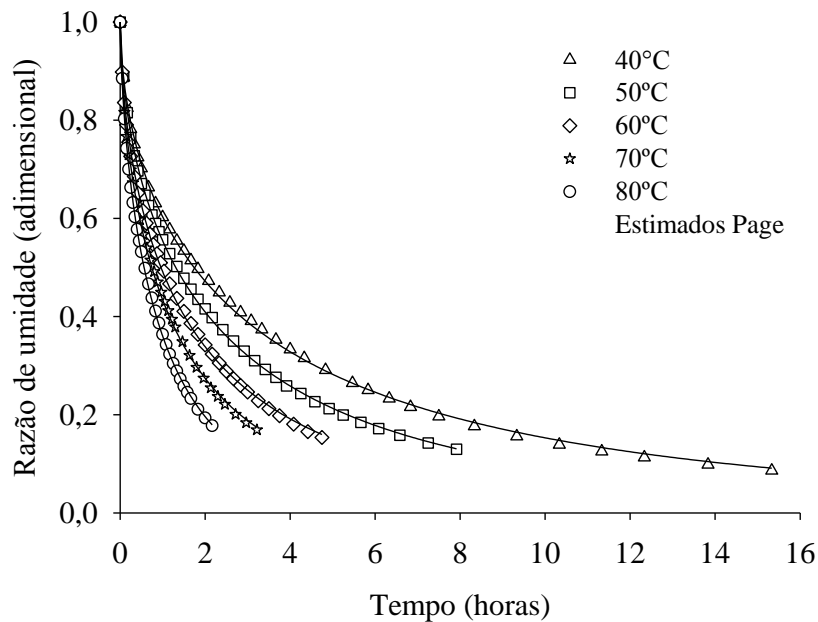


FIGURA 4. Valores de razão de umidade experimentais e estimados, pelo modelo de Page, para a secagem dos grãos de feijão-caupi em camada delgada em diferentes temperaturas na velocidade do ar de secagem de $1,0 \text{ m s}^{-1}$.

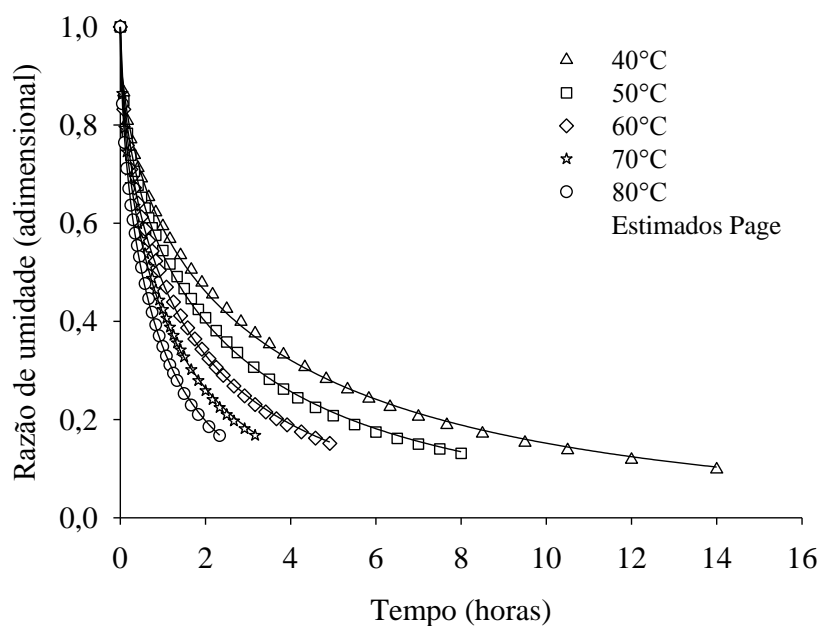


FIGURA 5. Valores de razão de umidade experimentais e estimados, pelo modelo de Page, para a secagem dos grãos de feijão-caupi em camada delgada em diferentes temperaturas na velocidade do ar de secagem de $1,6 \text{ m s}^{-1}$.

O processo de secagem ocorre no período de secagem a taxa decrescente (Figuras 3, 4 e 5), evidenciando uma maior resistência a transferência de calor da superfície para o interior e uma maior resistência de massa (água) do interior para a superfície do produto, o que contribui para que a taxa de evaporação superficial seja superior à taxa de reposição de água na superfície do produto (KASHANINEJAD et al., 2007).

Analisando as Figuras 3, 4 e 5 nota-se uma significativa influência da temperatura do ar sobre as curvas de secagem dos grãos de feijão-caupi em camada delgada, em que aumentando-se a temperatura do ar diminui-se o tempo necessário para atingir o mesmo teor de água, comportamento este típico para vários produtos agrícolas e observado por diversos pesquisadores estudando inúmeros produtos agrícolas (COSTA et al., 2011; DUC et al., 2011; RESENDE et al., 2011; SOUSA et al., 2011; FARIA et al., 2012; SIQUEIRA et al., 2012; RESENDE et al., 2014).

Verifica-se também o efeito da velocidade do ar sobre as curvas de secagem dos grãos de feijão-caupi em camada delgada, o qual apresenta um efeito bem menos significativo que o apresentado pela variação da temperatura do ar no tempo final de secagem. Para uma mesma temperatura, averiguou-se que, de modo geral, grãos de feijão-caupi secos nas velocidades do ar de secagem de $1,0$ e $1,6 \text{ m s}^{-1}$

apresentaram menor tempo de secagem em comparação aqueles secos à velocidade de $0,4 \text{ m s}^{-1}$, com exceção na secagem a 40°C . Resultado semelhante ao encontrado para nozes de pistache (KASHANINEJAD et al., 2007). Ao secarem sementes de sorgo, Resende et al. (2014) também constataram que a elevação da temperatura e da velocidade do ar de secagem resultaram em maiores taxas de secagem e, conseqüentemente, em menor tempo de secagem. Para os mesmos autores, a elevação da temperatura acarreta na ampliação da diferença de pressão parcial de vapor entre o ar de secagem e o produto, de modo que, a remoção de água do mesmo ocorre de maneira mais rápida e fácil.

Na Tabela 3 são apresentados os coeficientes do modelo de Page ajustados aos dados observados durante a secagem em camada delgada dos grãos de feijão-caupi para as diferentes combinações de temperatura e velocidades do ar.

TABELA 3. Parâmetros do modelo de Page para as diferentes temperaturas e velocidades do ar de secagem dos grãos de feijão-caupi.

T ($^\circ\text{C}$)	$0,4 \text{ m s}^{-1}$		$1,0 \text{ m s}^{-1}$		$1,6 \text{ m s}^{-1}$	
	k	n	k	n	k	n
40	0,4747	0,5894	0,5055	0,5699	0,5283	0,5525
50	0,5498	0,6111	0,5896	0,5989	0,6218	0,5635
60	0,6216	0,6529	0,7100	0,6091	0,7362	0,5852
70	0,7152	0,6848	0,8345	0,6325	0,8755	0,6056
80	0,8301	0,7229	1,0202	0,6743	1,0560	0,6184

As magnitudes da constante de secagem “k”, do modelo de Page, aumentaram de acordo com a elevação da temperatura do ar de secagem em uma mesma velocidade do ar (Tabela 3). Do mesmo modo as magnitudes da constante “k” aumentaram com o aumento da velocidade do ar de secagem para uma mesma temperatura do ar. A constante de secagem “k” pode ser usada como uma aproximação para caracterizar o efeito da temperatura, e está relacionado com a difusividade efetiva no processo de secagem no período decrescente, sendo que a difusão líquida controla o processo (MADAMBA et al., 1996; BABALIS & BELESSIOTIS, 2004).

O coeficiente “n” do modelo de Page, o qual reflete a resistência interna do produto a secagem, teve sua magnitude elevada conforme aumentou a temperatura, independentemente da velocidade do ar de secagem (Tabela 3), concordando com os resultados encontrados por Camicia et al. (2015), também com

feijão-caupi, Corrêa et al. (2007), com feijão-comum. Entretanto, para uma mesma temperatura, verificou-se que o aumento da velocidade do ar de secagem resultou na redução dos valores dessa constante (Tabela 3). Resende et al. (2014) não encontraram tendência definida para constante “n” durante a secagem de sementes de sorgo em diferentes velocidades do ar de secagem.

Devido à variação, com tendência definida, ocorrida nas magnitudes dos coeficientes “k” e “n” do modelo de Page com as diferentes condições de temperatura e velocidade do ar de secagem, os mesmos podem ser expressos pelas Equações 16 e 17, respectivamente.

$$k = -0,0851 + 0,0115T + 0,1044V, R^2 = 0,9450 (P_{\text{level}} < 0,0001) \quad (16)$$

$$n = 0,5226 + 0,0025T - 0,0559V, R^2 = 0,9350 (P_{\text{level}} < 0,0001) \quad (17)$$

em que:

T: temperatura do ar de secagem, °C; e
V: velocidade do ar de secagem, m s⁻¹.

Verificou-se que ambas as equações obtidas para representar a variação dos valores dos coeficientes “k” e “n” (Equações 16 e 17), nas diferentes temperaturas e velocidades do ar de secagem, apresentaram satisfatórias magnitudes de coeficiente de determinação (R²) e probabilidades de erro inferiores a 1% (P_{level}).

Substituindo as Equações 1, 16 e 17 na Equação 9, do modelo de Page, obtém-se a Equação 18.

$$U = U_e + (U_i - U_e) \exp \left[-(-0,0851 + 0,0115T + 0,1044V) \theta^{(0,5226 + 0,0025T - 0,0559V)} \right] \quad (18)$$

em que:

θ: tempo de secagem, h;

Com esta equação (Equação 18) é possível estimar o teor de água dos grãos de feijão-caupi em função do tempo de secagem, temperatura e velocidade do ar de secagem, para uma faixa de temperatura de 40 a 80 °C e velocidade de 0,4 a 1,6 m s⁻¹.

4.2. Coeficiente de difusão efetivo

Os valores do coeficiente de difusão efetivo dos grãos de feijão-caupi aumentam com o incremento da temperatura e velocidade do ar de secagem (Tabela 4). Goneli et al. (2009), explica que havendo um aumento da temperatura a viscosidade da água diminui, sendo a viscosidade uma medida da resistência do fluido ao escoamento, as variações dessa propriedade implicam em alterações na difusão da água nos capilares dos produtos agrícolas, tornando favorável o deslocamento da água do interior para a superfície do produto. O mesmo autor ainda explica, que o aumento da temperatura também promove o aumento do nível das vibrações moleculares da água, contribuindo assim para que a difusão ocorra mais rapidamente.

TABELA 4. Magnitudes do coeficiente de difusão efetivo (D_i) dos grãos de feijão-caupi ajustado as diferentes condições de temperatura e velocidade do ar de secagem em camada delgada

Temperatura do ar °C	Velocidade do ar		
	0,4 m s ⁻¹	1,0 m s ⁻¹	1,6 m s ⁻¹
	(D _i x 10 ⁻¹⁰ m ² s ⁻¹)		
40	0,5408	0,5802	0,6050
50	0,7287	0,8020	0,8321
60	0,9327	1,1095	1,1522
70	1,1803	1,4629	1,5726
80	1,4849	1,9988	2,1371

Observa-se também, na Tabela 4, que com o aumento da velocidade do ar de secagem, para uma mesma temperatura, eleva-se o valor do coeficiente de difusão efetivo, esse comportamento pode ser atribuído ao fato da elevação da velocidade do ar de secagem colaborar com o processo de evaporação da água conduzida para a superfície do produto. Comportamento semelhante foi observado por RESENDE et al. (2008) e CORRÊA et al. (2006), estudando grãos de feijão-comum.

As variações dos valores do coeficiente de difusão efetivo para os grãos de feijão-caupi, nas diferentes condições do ar de secagem, ficaram entre 0,5408 x 10⁻¹⁰ a 2,1371 x 10⁻¹⁰ m² s⁻¹, para as condições de secagem de 40 °C à 0,4 m s⁻¹ a 80 °C à 1,6 m s⁻¹, respectivamente, utilizando o raio equivalente inicial dos grãos. De

acordo com Madamba et al. (1996), os valores do coeficiente de difusão, para a secagem de produtos agrícolas, apresentam-se na ordem de 10^{-9} a 10^{-11} $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$, estando os valores calculados de difusão efetiva para os grãos de feijão-caupi situados na faixa de valores relatados por esses autores.

São apresentados na Figura 6, os valores de $\text{Ln}(D)$ em função do inverso da temperatura absoluta ($1/T_a$) obtidos para os grãos de feijão-caupi nas diferentes condições de temperatura e velocidade do ar de secagem.

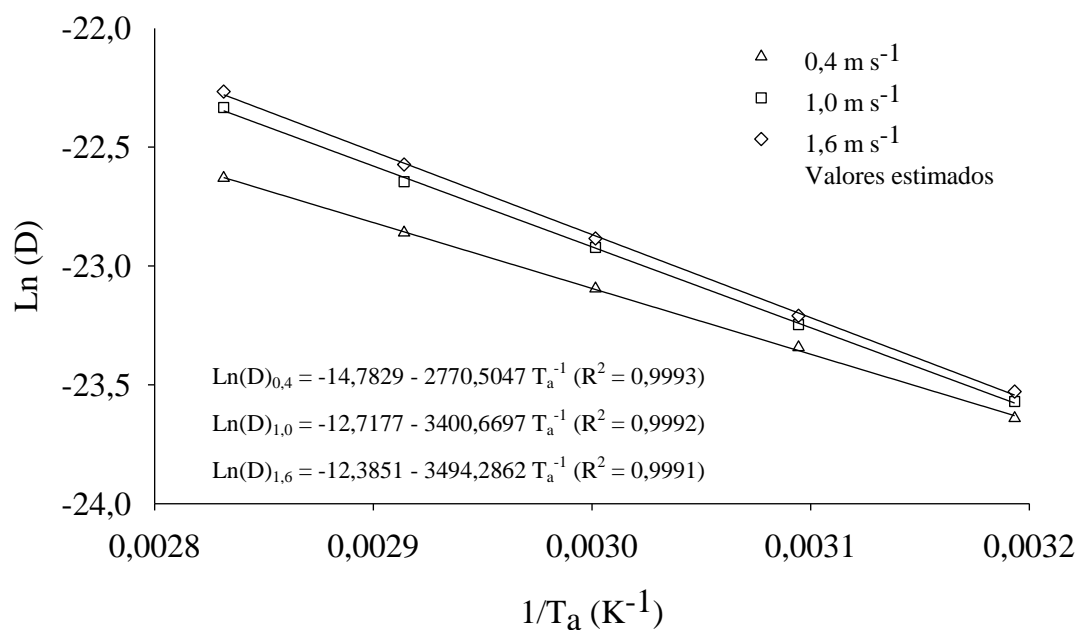


FIGURA 6. Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo durante a secagem em camada delgada dos grãos de feijão-caupi nas diferentes condições de temperatura e velocidade do ar de secagem.

As Equações 19, 20 e 21 apresentam os coeficientes da equação de Arrhenius (Equação 13) ajustadas para o coeficiente de difusão efetivo dos grãos de feijão-caupi para as velocidades do ar de 0,4; 1,0 e 1,6 m s^{-1} , respectivamente.

$$D_i = 3,80074 \times 10^{-7} \exp\left(\frac{23,0340}{R T_a}\right) \quad (19)$$

$$D_i = 2,9976 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{28,2732}{R T_a}\right) \quad (20)$$

$$D_i = 4,18042 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{29,0515}{R T_a}\right) \quad (21)$$

A energia de ativação para difusão líquida, para o intervalo de temperatura de 40 a 80 °C, durante a secagem dos grãos de feijão-caupi foi de aproximadamente 23,03; 28,30 e 29,05 kJ mol⁻¹ (Equações 19, 20 e 21), para as velocidades do ar de secagem de 0,4; 1,0 e 1,6 m s⁻¹, respectivamente.

Os valores de energia de ativação tiveram suas magnitudes elevadas com o aumento da velocidade do ar de secagem, esse comportamento também foi observado por Resende et al. (2014), trabalhando com grãos de sorgo. Segundo Zogzas et al. (1996), os valores de energia de ativação para produtos agrícolas variam de 12,7 a 110 kJ mol⁻¹, estando assim, os valores de energia de ativação obtidos no presente trabalho situados na faixa relatada por esses autores.

5. CONCLUSÕES

Conforme os resultados obtidos neste trabalho, podemos concluir que:

Os modelos da Aproximação da Difusão, Dois Termos, Logarítmico, Midilli, Page e Thompson podem ser utilizados para representar o processo de secagem dos grãos de feijão-caupi.

O coeficiente de difusão efetivo aumenta gradativamente sua magnitude com a elevação da temperatura e velocidade do ar de secagem.

Os valores de energia de ativação durante a secagem dos grãos de feijão-caupi, obtidas a partir da equação de Arrhenius, foram de 23,03; 28,30 e 29,05 kJ mo^{-1} para as velocidades de 0,4; 1,0 e 1,6 m s^{-1} , respectivamente.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AJIBOLA, O.O.; AVIARA, N.A.; AJETUMOBI, O.E. **Sorption equilibrium and thermodynamic properties of cowpea** (*Vigna unguiculata*). *Journal of Food Engineering*, London, v.58, p.317-324, 2003.

ARAÚJO, W.D. **Caracterização física dos grãos e frutos de amendoim durante a secagem**. 2013. 96p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados – MS.

BABALIS, S.J.; BELESSIOTIS, V.G. Influence of the drying condition on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *Journal of Food Engineering*, v.65, p.449-458, 2004.

BERBERT, P.A.; QUEIROZ, D.M.; SILVA, J.S.; PINHEIRO FILHO, J.B. Simulation of coffee drying in a fixed bed with periodic airflow reversal. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v.60, p.167-173, 1995.

BORÉM, A.; CARNEIRO, J. E. S. (2006), A cultura. In: Vieira, C.; Paula Júnior, T. J. de; Borém, A. (Ed.) *Feijão*. 2. Ed. Viçosa: Editora UFV, 19-40.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes**, Brasília, p.395, 2009.

BROOKER, D. B.; BAKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oil seeds**. Wetsport: AVI, 1992. 450 p.

CAMICIA, R.G.M.; CHRIST, D.; COELHO, S.R.M.; CAMICIA, R.F.M. Modelagem do processo de secagem de sementes de feijão-caupi. *Revista Caatinga*, Mossoró, v.28, n.3, p. 206-214, 2015.

CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M.; NOGUEIRA, B.L. Determinação do coeficiente de difusão líquida dos grãos de feijão. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v.8, n.2, p.117-126, 2006.

CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A.P.; GONELI A.L.D.; BOTELHO, F.M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. *Engenharia Agrícola*, v.27, n.2, p.501-510, 2007.

COSTA, L.M.; RESENDE, O.; SOUSA, K.A.; GONÇALVES, D.N. Coeficiente de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de sementes de crambe. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, n.10, p.1089–1096, 2011.

- DOYMAZ, I. Drying behavior of green beans. **Journal of Food Engineering**, London, v.69, p.161-165, 2005.
- DRAPER, N.R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 3thed. New York John: Wiley & Sons, 1998. 712p.
- DUC, L.A.; HAN, J.W.; KEUM, D.H. Thin layer drying characteristics of rapeseed (*Brassica napus* L.). **Journal of Stored Products Research**, v.47, n.1, p.32-38, 2011.
- EMBRAPA MEIO-NORTE. Disponível em: <<http://www.embrapa.gov.br/meio-norte>>. Acesso em: 15 mar. 2016.
- FARIA, R.Q.; TEIXEIRA, I.R.; DEVILLA, I.A.; ASCHERI, D.P.R.; RESENDE, O. Cinética de secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.5, p.573-583, 2012.
- FREIRE FILHO, F.R. Origem, evolução e domesticação do caupi. In: ARAÚJO, J.P.P.; WATT, E.E. (Org). **O caupi no Brasil**. Brasília, DF: IITA: EMPRABA, 1988. p. 26-46.
- FREIRE FILHO, F. R.; LIMA, J. A. A.; RIBEIRO, V. Q. (Ed.) **Feijão-caupi: avanços tecnológicos**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. p. 519.
- FREIRE FILHO, F. R.; CRAVO, M. S.; VILARINHO, A. A.; CAVALANTE, E. S.; FERNANDES, J. B.; SAGRILO, E.; RIBEIRO, V. Q.; ROCHA, M. M.; SOUZA, F. F.; LOPES, A. M.; GONÇALVES, J. R. P.; CARVALHO, H. E. L.; RAPOSO, J. A. A.; SAMPAIO, L. S. BRS Novaera: Cultivar de feijão-caupi de porte semiereto. **Comunicado técnico**, Belém, PA, set., 2008. ISSN 1517-2244.
- GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; AFONSO JÚNIOR, P.C.; OLIVEIRA, G.H.H. Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. **Revista Brasileira de Armazenamento**, n.11, p. 64-73, 2009.
- GONELI, A.L.D.; VIEIRA, M.C.; VILHASANTI, H.C.B.; GONÇALVES, A.A. Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.44, n.1, p.56-64, 2014.
- KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L.G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v.78,n.1, p.98-108, 2007.
- KEEY, R.B. **Drying: Principles and practice**. New York: Pergamon Press. 1972. 358p.
- LAHSASNI, S.; KOUHILA, M.; MAHROUZ, M.; JAOUHARI, J.T. Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus-indica*). **Journal of Food Engineering**, v.61, p.173-179, 2004.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. The Thin-layer Drying Characteristics of Garlic Slices. **Journal of Food Engineering**, v.29, n.1, p.75-97, 1996.

MARTINAZZO, A.P.; MELO, E.C.; CORREA, P.C.; SANTOS, R.H.S. Modelagem matemática e parâmetros qualitativos da secagem de folhas de capim-limão [*Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf]. **Revista Brasileira de plantas medicinais**, v.12, n.4, p.488-498, 2010.

MARTINS, E.A.S. **Dimensionamento e experimentação de um secador de leite fixo para a secagem de produtos agrícolas**. 2015. 123p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS.

MAYVAN, A.A.; MOTEVALI, A.; GHOBADIAN, B.; KHOSHTAGHAZA, M.H.; MINAEI, S. Effect of Air Velocity and Temperature on Energy and Effective Moisture Diffusivity for Russian Olive (*Elaeagnus angustifolia* L.) in Thin-Layer Drying. **Iranian Journal of Chemistry & Chemical Engineering**, v.31, n.1, p.65-69, 2012.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z.A. New model for single-layer drying. **Drying Technology**, v.20, n.7, p.1503–1513, 2002.

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

MOHSENIN, N.N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841p.

MORAIS, S.J.S.; DEVILLA, I.A.; FERREIRA, D.A.; TEIXEIRA, I.R. Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.44, n.3, p.455-463, 2013.

OZDEMIR, M.; DEVRES, Y.O. The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. **Journal of Food Engineering**, v.42, n.4, p.225-233, 1999.

PANCHARIYA, P.C.; POPOVIC, D.; SHARMA, A.L. Thin-layer modeling of black tea drying process. **Journal of Food Engineering**, v.52, n.4, p.349–357, 2002.

PARK, K.J.; VOHNIKOZA, Z.; BROD, F.P.R. Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.). **Journal of Food Engineering**, v.51, n.3, p.193-199, 2002.

RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M.; RODRIGUES, S. 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.

RESENDE, O.; ULLMANN, R.; SIQUEIRA, V.C.; CHAVES, T. H.; FERREIRA, L. U. Modelagem matemática e difusividade efetiva das sementes de pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) durante a secagem. **Engenharia Agrícola**, v.31, n.6, p.1123-1135, 2011.

RESENDE, O.; OLIVEIRA, D.E.C.; CHAVES, T.H.; FERREIRA, J.; BESSA, V. Kinetics and thermodynamic properties of the drying process of sorghum (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) grains. **African Journal of Agricultural Research**, v.9, p.2453-2462, 2014.

SINGH, B. B.; EHLERS, J. D.; SHARMA, B.; FREIRE FILHO, F. R. Recent progress in cowpea breeding. In: FATOKUN, C. A.; TARAWALI, S. A.; SINGH, B. B.; KORMAWA, P. M.; TAMBO, M. (Eds.). **Challenges and opportunities for enhancing sustainable cowpea production**. Ibadan: IITA, 2002. p. 22-40.

SIQUEIRA, V.C.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H. Drying kinetics of *Jatropha* seeds. **Revista Ceres**, v.59, n.2, p.171-177, 2012.

SIQUEIRA, V.C.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H. Mathematical modelling of the drying of *Jatropha* fruit: an empirical comparison. **Revista Ciência Agronômica**, v.44, n.2, p.278-285, 2013.

SOUSA, K.A.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H.; COSTA, L.M. Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). **Revista Ciência Agronômica**, v.42, n.4, p.883-892, 2011.

THOMPSON, T.L.; PEART, R.M.; FOSTER, G.H. Mathematical simulation of corn drying: A new model. **Transactions of the ASAE**, v.11, p.582-586, 1968.

ZOGZAS, N.P.; MAROULIS, Z.B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. **Drying Technology**, New York, v.14, n.10, p.2225-53, 1996.