

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

**SECAGEM DE GRÃOS DE SOJA EM DIFERENTES
TEMPERATURAS E VELOCIDADES DO AR**

HENRIQUE DA CRUZ BENITEZ VILHASANTI

**DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2014**

SECAGEM DE GRÃOS DE SOJA EM DIFERENTES TEMPERATURAS E VELOCIDADES DO AR

HENRIQUE DA CRUZ BENITEZ VILHASANTI
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
2014

**SECAGEM DE GRÃOS DE SOJA EM DIFERENTES TEMPERATURAS E
VELOCIDADES DO AR**

Por

Henrique da Cruz Benitez Vilhasanti

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

Aprovado em:11/12/2014

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

Prof. Dr. Valdiney Cambuy Siqueira
Membro da Banca – UFGD/FCA

Eng. Agrícola Elton Aparecido Siqueira Martins
Membro da Banca – UFGD/FCA

AGRADECIMENTOS

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

Aos meus pais, Dionisio Vilhasanti e Rosa Josefa Benitez Vilhasanti pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

À UFGD, por ser a responsável pela estrutura do curso de Engenharia Agrícola.

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

Ao Prof. Dr. Roberto Carlos Orlando, pelos bons conselhos nessa caminhada como professor, mas principalmente como amigo.

Aos amigos Cesar Pedro Hartmann Filho e Elton Aparecido Siqueira Martins, por toda ajuda, sugestões, conselhos e pela amizade na realização deste trabalho.

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

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

SUMÁRIO

	PÁGINA
RESUMO.....	v
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Cultura da soja.....	3
2.2. Secagem.....	4
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	7
3.1. Curvas de secagem dos grãos de soja em camada delgada.....	7
3.2. Determinação do coeficiente de difusão efetivo.....	10
3.2.1. Influência da temperatura.....	11
3.3. Análise estatística.....	11
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	13
4.1. Cinética de secagem em camada delgada dos grãos de soja.	13
4.2. Coeficiente de difusão efetivo.....	20
4.2.1. Influência da temperatura.....	21
5. CONCLUSÕES.....	23
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	24

VILHASANTI, Henrique da Cruz Benitez. **Secagem de grãos de soja em diferentes temperaturas e velocidades do ar**. 2014. 27p. Monografia (Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados – MS.

RESUMO

A soja é uma aleuro-oleaginosa largamente cultivada no mundo, sendo utilizada na alimentação humana e animal. 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 soja cultivados na safrinha. Foram utilizados grãos de soja colhidos com teor de água inicial de, aproximadamente, 0,30 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; 1,2 e 2,0 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 do modelo Exponencial de Dois Termos, todos os demais modelos ajustados aos dados experimentais da secagem dos grãos de soja 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 soja. 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 28,83; 29,15 e 30,60 kJ mol⁻¹, para as velocidades do ar de 0,4; 1,2 e 2,0 m s⁻¹, respectivamente.

Palavras-chave: Modelos matemáticos, Coeficiente de difusão efetivo, Energia de ativação.

1. INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine Max* L), é a uma importante cultura para o agronegócio brasileiro, sendo um produto com relevante importância na economia externa e interna do país, tanto pela receita gerada, pela exportação e industrialização, como também pelo número de empregos diretos e indiretos relacionados com o seu agronegócio.

Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB (CONAB, 2014), a soja será novamente a cultura mais produzida no Brasil na safra 2014/2015. Em seu segundo levantamento, de novembro de 2014, a estimativa da produção brasileira de grãos será de 197,18 milhões de toneladas de grãos, sendo que destas, a soja participará com 90,54 milhões de toneladas, e a área de plantio para a safra, será de aproximadamente de 31,29 milhões de hectares, sendo um acréscimo de área de 3,56%, em relação à safra 2013/2014.

Para consolidação do sucesso econômico e da sustentabilidade do agronegócio da soja, são fundamentais em um modelo tecnológico de produção, ações pontuais que contemplem em especial, a melhoria da qualidade do produto. 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 para maior competitividade e melhoria da qualidade do produto processado.

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 no produto. 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, a soja é normalmente colhida 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. Nesse contexto, a secagem é o processo mais utilizado para assegurar a qualidade e estabilidade após a colheita.

Considerando a importância da cultura da soja e que as principais variáveis manipuladas no processo de secagem são a temperatura e a velocidade do ar, o presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar e modelar a cinética de secagem dos grãos de soja safrinha 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 da soja

De acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (EMBRAPA, 2014), a soja é originária da Manchúria, região da China. É uma das culturas mais antigas, plantada pelo menos há cinco mil anos, espalhou-se pelo mundo por intermédio dos viajantes ingleses e por imigrantes japoneses e chineses. O primeiro relato da soja no Brasil deu-se no início do século XX, mas seu impulso maior aconteceu em meados dos anos 70, em razão da grande quebra de safra da Rússia e a incapacidade dos Estados Unidos suprirem a demanda mundial.

Para a cultura da soja, a prática cultural mais importante é a época de semeadura, sendo essa definida por um conjunto de fatores ambientais que inter-relacionam-se interagindo diretamente com a planta. Segundo Câmara (1991) as condições que mais afetam o desenvolvimento da soja são as que envolvem variações dos fatores climáticos, como: temperatura, umidade do solo e principalmente o fotoperíodo.

A cultura da soja apresenta uma grande variabilidade entre suas cultivares com relação à sensibilidade, época de semeadura e às mudanças na região de cultivo. Essas características passam a ser muito importantes nos casos em que o produtor opte ou necessite por antecipar ou atrasar o processo de semeadura. Portanto, somado ao excesso ou a falta de umidade e demais fatores climáticos, com problemas no parque de máquinas, todos os anos uma certa porcentagem variável da lavoura seja implantada após o término do período preferencial (safra), no período classificado como safrinha (janeiro e fevereiro) (LUDWIG et al., 2007).

Além disso, os elevados preços da soja nas últimas safras, faz com que os produtores rurais se sintam motivados a realizar uma nova semeadura, sendo essa simultânea à colheita (CONAB, 2014). Outro fator que agrava essa situação são os preços relativamente baixos atingidos durante a comercialização das principais culturas de inverno, principalmente do trigo, assim como a carência de outras opções de cultivo (BRACCINI et al., 2003; CONAB, 2014).

Embora o incremento da área cultivada com soja safrinha tenha ocorrido de maneira significativa nos últimos anos, pode-se afirmar que quando a cultura é

semeada fora de sua época preferencial, grandes prejuízos na produção e na qualidade dos grãos de soja podem ser esperados, em virtude do maior ataque de percevejos e principalmente devido à redução do fotoperíodo, o qual reduz significativamente o ciclo de desenvolvimento das cultivares, acarretando em reduções na altura das plantas, altura de inserção das vagens, número de vagens por planta, número de sementes por vagem e conseqüentemente o rendimento da cultura.

Apesar da época de semeadura ser um fator limitante para a cultura da soja, estudos relacionados ao cultivo da aleuro-oleaginosa fora de sua época preferencial merecem uma atenção em especial, devido à grande extensão territorial do Brasil, às condições edafoclimáticas bastante distintas e variáveis conforme a região de cultivo, ao surgimento de cultivares cada vez mais produtivas e melhor adaptadas e a expansão da cultura da soja para regiões ainda não tradicionais; destacando a importância da realização deste tipo de trabalho, com a finalidade de se aperfeiçoar as etapas relacionadas à pós-colheita da soja safrinha, como a secagem.

2.2. Secagem

Entre as etapas da pós-colheita, uma das mais importantes é o processo de secagem dos produtos agrícolas, que é 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 (YILBAS et al., 2003). São vários os fatores que influenciam o processo de secagem, dentre eles método de secagem, temperatura e umidade relativa e velocidade do ar de secagem. A falta do controle destes fatores pode comprometer a qualidade do produto final.

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).

Uma camada delgada possui a 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 uma sucessão de camadas delgadas superpostas (KASHANINEJAD et al., 2007).

Na descrição da cinética de secagem de produtos agrícolas, são utilizados três modelos de secagem em camada delgada. Sendo que o modelo teórico considera apenas a resistência interna a transferência de calor e água, entre o produto e o ar quente. Já os modelos semi-teóricos e os empíricos, consideram somente a resistência externa a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem (MIDILLI et al., 2002; PANCHARIYA et al., 2002).

Os modelos semi-teóricos são geralmente derivados da simplificação da segunda lei de Fick ou de modificações de modelos simplificados, que oferecem, freqüentemente, 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 apresentam micro poros 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. Outro fator que contribui para a complexidade do mecanismo de difusão é a diversidade da composição química e a estrutura física dos produtos. Dessa forma, os dados disponíveis na literatura apresentam elevada variação nos seus valores, não só devido à complexidade dos produtos, como também em função dos diferentes métodos de estimação, tipo de material, teor de água, processo de secagem e metodologia utilizada para sua obtenção (ZOGZAS et al., 1996).

Um fator 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), folhas de hortelã verde e urtiga (KAYA & AYDIN, 2009), bagaço de cenoura (KUMAR et al., 2011), 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 soja da cultivar SYN 1059 RR (V-TOP), produzida no período de safrinha, entre os meses de janeiro e abril de 2014, provenientes da fazenda São Lourenço da empresa Sementes Guerra S/A, localizada na Rodovia MS 162, Km 07, no município de Dourados, MS. A soja SYN 1059 RR (V-TOP), é uma cultivar adaptada para a região sul do Mato Grosso do Sul.

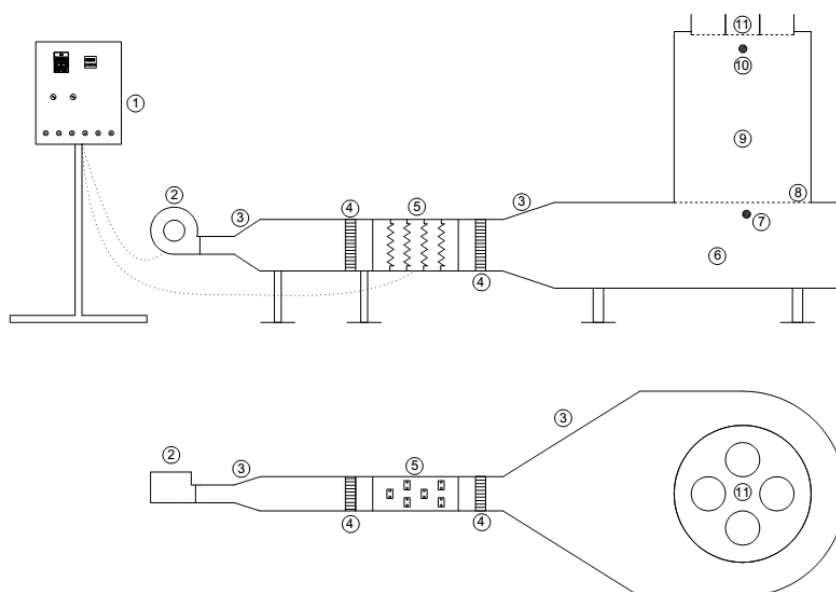
As vagens de soja foram colhidas manualmente, para evitar qualquer tipo de influência no produto, sendo realizada já no campo uma pré-seleção das vagens, onde procurou-se evitar vagens defeituosas, no intuito de evitar qualquer tipo de influência indesejável que pudesse interferir nos resultados da pesquisa. Posteriormente as vagens foram debulhadas manualmente, seguindo o mesmo critério de seleção anteriormente aplicado e os grãos foram acondicionados em saco plástico e armazenado 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 0,30 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 soja em camada delgada

O produto foi submetido à secagem em um secador experimental, 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.



Legenda:

- 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- Câmara de secagem em camada espessa; 10- Ponto de medição de temperatura para secagem em camada delgada; 11- Conjunto de bandejas para secagem em camada delgada.

FIGURA 1. Secador experimental utilizado na secagem dos grãos de soja.

Para a secagem em camada delgada dos grãos de soja foram utilizadas diferentes temperaturas (40, 50, 60, 70 e 80 °C) e diferentes velocidades (0,4; 1,2 e 2,0 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 0,01g 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 soja atingiram o teor de água de, aproximadamente, 0,11 decimal b.s..

A razão de umidade (RU) dos grãos de soja 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 de teor de água de equilíbrio dos grãos de soja foram obtidos durante a própria execução do trabalho, secando-se o produto até o equilíbrio com a condição de secagem em execução no momento. Modelos matemáticos tradicionalmente utilizados por vários pesquisadores para prever 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 soja.

Designação do modelo	Modelo	
Aproximação da difusão	$RU = a \exp(-k \theta) + (1 - a) \exp(-k b \theta)$	(2)
Dois termos	$RU = a \exp(-k_0 \theta) + b \exp(-k_1 \theta)$	(3)
Exponencial de Dois Termos	$RU = a \exp(-k \theta) + (1 - a) \exp(-k a \theta)$	(4)
Henderson e Pabismodificado	$RU = a \exp(-k \theta) + b \exp(-k_0 \theta) + c \exp(-k_1 \theta)$	(5)
Logarítmico	$RU = a \exp(-k \theta) + c$	(6)
Midilli	$RU = a \exp(-k \theta^n) + b \theta$	(7)
Page	$RU = \exp(-k \theta^n)$	(8)
Thompson	$RU = \exp\{[-a - (a^2 + 4 b \theta)^{0.5}]/2b\}$	(9)

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 soja, para as diferentes condições de secagem, foi calculado utilizando a Equação 10, 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.

O modelo de difusão efetivo para a forma geométrica esférica, considerando o raio equivalente dos grãos como 3,02 mm, foi obtido por regressão não linear, a partir da seguinte equação:

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{N_t=1}^{\infty} \frac{1}{N_t^2} \exp \left[-\frac{N_t^2 \pi^2 D_i \theta}{9} \left(\frac{3}{R_e} \right)^2 \right] \quad (10)$$

em que:

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

R_e : distância radial até a superfície, m; e

N_t : Número de termos.

Para o cálculo do raio equivalente utilizado no modelo de difusão efetivo (Equação 10), fez-se a medição dos três eixos ortogonais dos grãos de soja, 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 11, descrita por Mohsenin (1986).

$$V = \pi \left(\frac{a b c}{6} \right) \quad (11)$$

em que:

V: volume, mm^3 ;

a: comprimento, mm;

b: largura, mm; e

c: espessura, mm.

3.2.1. Influência da temperatura

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

$$D_i = D_o \exp\left(\frac{E_a}{R T_a}\right) \quad (12)$$

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. Para o ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais, foi utilizado o programa computacional STATISTICA 7.0. Para análise do grau de ajuste de cada modelo, foram consideradas as magnitudes do coeficiente de determinação ajustados (variância explicada), do erro médio relativo e desvio padrão da estimativa

Os valores do erro médio relativo (P) e do desvio padrão da estimativa (SE) foram calculados conforme descrito a seguir:

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^N \left(\frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (13)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (14)$$

em que:

N : número de observações experimentais;

Y : valor observado experimentalmente;

\hat{Y} : valor calculado pelo modelo; e
GLR: graus de liberdade do modelo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Cinética de secagem em camada delgada dos grãos de soja

Na Tabela 2, encontram-se as magnitudes do desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) e o coeficiente de determinação (R^2), utilizados para a comparação entre os oito modelos ajustados aos dados experimentais de razão de umidade dos grãos soja submetidos a diferentes condições de temperatura e velocidade do ar de secagem.

Verifica-se na Tabela 2 que, pode-se observar que, à exceção do modelo Exponencial de Dois Termos, todos os modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais apresentaram coeficientes de determinação superiores a 0,96. Mohapatra & Rao (2005) relatam que a utilização do coeficiente de determinação como o único critério de avaliação para a seleção dos modelos de secagem, não constitui um bom parâmetro para representação do fenômeno de secagem, sendo necessária a análise conjunta de outros parâmetros estatísticos.

Analisando a Tabela 2, constata-se que, dentre os oito modelos matemáticos utilizados para prever o fenômeno de secagem dos grãos de soja, apenas o modelo Exponencial de Dois Termos, não apresentou valores do erro médio relativo inferiores a 10% nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C. 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% inadequados 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 Henderson e Pabis Modificado, Midilli, Page e Thompson se destacam dentre os demais, por apresentarem os menores valores para todas as condições do ar de secagem.

TABELA 2. Parâmetros estatísticos obtidos na secagem dos grãos de soja.

Modelos	0,4 m s ⁻¹			1,2 m s ⁻¹			2,0 m s ⁻¹		
	SE	P	R ²	SE	P	R ²	SE	P	R ²
40°C									
(02)	0,0069	0,6139	0,9988	0,0135	1,8786	0,9947	0,0123	1,7012	0,9955
(03)	0,0067	0,6953	0,9989	0,0121	1,5581	0,9959	0,0112	1,4465	0,9964
(04)	0,0460	6,8502	0,9428	0,0762	11,9017	0,8256	0,0718	10,8944	0,8393
(05)	0,0060	0,3395	0,9992	0,0018	0,2285	0,9999	0,0022	0,2617	0,9999
(06)	0,0222	2,9660	0,9871	0,0303	3,6978	0,9735	0,0286	3,3818	0,9755
(07)	0,0112	1,0591	0,9969	0,0012	0,1550	0,9999	0,0012	0,1613	0,9999
(08)	0,0144	1,3609	0,9944	0,0040	0,6051	0,9995	0,0043	0,6494	0,9994
(09)	0,0089	0,6959	0,9979	0,0046	0,7042	0,9994	0,0054	0,8607	0,9991
50°C									
(02)	0,0108	1,4799	0,9962	0,0128	1,8873	0,9949	0,0114	1,5933	0,9956
(03)	0,0482	5,4211	0,9285	0,0124	1,7377	0,9955	0,0112	1,5335	0,9959
(04)	0,0685	10,0920	0,8423	0,0819	12,9406	0,7855	0,0775	11,5049	0,7868
(05)	0,0337	3,2580	0,9684	0,0030	0,4048	0,9998	0,0020	0,2286	0,9999
(06)	0,0276	3,1882	0,9754	0,0327	3,9513	0,9671	0,0309	3,5919	0,9677
(07)	0,0015	0,1680	0,9999	0,0021	0,3183	0,9999	0,0013	0,1418	0,9999
(08)	0,0037	0,5340	0,9995	0,0048	0,8132	0,9993	0,0040	0,6185	0,9994
(09)	0,0046	0,7208	0,9993	0,0054	0,8185	0,9991	0,0049	0,6425	0,9992
60°C									
(02)	0,0084	1,1561	0,9978	0,0110	1,4193	0,9960	0,0099	1,3642	0,9964
(03)	0,0080	1,0691	0,9981	0,0109	1,3689	0,9963	0,0100	1,3494	0,9965
(04)	0,0633	9,5174	0,8716	0,0714	10,5856	0,8232	0,0731	10,4125	0,7943
(05)	0,0012	0,1317	0,9999	0,0221	2,8971	0,9864	0,0279	2,7493	0,9766
(06)	0,0260	3,2086	0,9794	0,0298	3,5176	0,9706	0,0308	3,4865	0,9655
(07)	0,0030	0,3487	0,9997	0,0012	0,1680	0,9999	0,0014	0,1610	0,9999
(08)	0,0029	0,3549	0,9997	0,0039	0,5809	0,9995	0,0039	0,5979	0,9994
(09)	0,0029	0,4390	0,9997	0,0040	0,5984	0,9995	0,0055	0,5867	0,9989
70°C									
(02)	0,0069	0,9504	0,9987	0,0102	1,3588	0,9969	0,0083	1,0138	0,9976
(03)	0,0068	0,9141	0,9988	0,0103	1,3456	0,9970	0,0084	1,0073	0,9977
(04)	0,0543	7,8380	0,9128	0,0668	9,8755	0,8567	0,0630	8,6468	0,8507
(05)	0,0187	1,2108	0,9923	0,0110	1,3456	0,9970	0,0091	1,0074	0,9977
(06)	0,0241	2,9526	0,9838	0,0301	3,5365	0,9726	0,0286	3,1973	0,9713
(07)	0,0036	0,3564	0,9997	0,0014	0,2024	0,9999	0,0010	0,1190	0,9999
(08)	0,0036	0,3051	0,9996	0,0041	0,5791	0,9995	0,0034	0,4866	0,9996
(09)	0,0032	0,4889	0,9997	0,0055	0,8257	0,9990	0,0039	0,5618	0,9994
80°C									
(02)	0,0074	0,9419	0,9987	0,0098	1,2395	0,9978	0,0089	1,0677	0,9978
(03)	0,0074	0,9290	0,9988	0,0100	1,2181	0,9979	0,0093	1,0741	0,9978
(04)	0,0506	6,9040	0,9340	0,0640	9,1405	0,8971	0,0657	8,4794	0,8636
(05)	0,0010	0,0990	0,9999	0,0034	0,3287	0,9998	0,0015	0,1446	0,9999
(06)	0,0258	3,0197	0,9842	0,0323	3,9603	0,9759	0,0317	3,5402	0,9714
(07)	0,0021	0,2044	0,9999	0,0027	0,2394	0,9998	0,0012	0,1318	0,9999
(08)	0,0025	0,3298	0,9998	0,0044	0,6589	0,9995	0,0028	0,3369	0,9998
(09)	0,0065	0,9227	0,9989	0,0071	1,0645	0,9987	0,0033	0,4074	0,9997

Com base nos parâmetros estatísticos pré-estabelecidos, apenas o modelo de Exponencial de Dois Termos não é adequado para representar o processo de secagem em todas as condições do ar de secagem estudado. Assim, todos os modelos podem ser utilizados para descrever o processo de secagem de grãos de soja.

Dentre os modelos recomendados para descrever a secagem em camada delgada dos grãos de soja, nas diferentes condições do ar de secagem estudado, foi selecionado modelo de Page 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 grãos de café descascados (GONELI et al., 2009), canola (DUC et al., 2011), sementes de pinhão manso (RESENDE et al. 2011), grãos de amendoim (ARAUJO, 2013), frutos de pinhão manso (SIQUEIRA et al., 2013), grãos de sorgo (RESENDE et al., 2014).

Na Figura 2 são apresentados, para todas as condições do ar de secagem, correspondências entre os valores estimados e observados, pelo modelo de Page, de razão de umidade para a secagem em camada delgada dos grãos de soja.

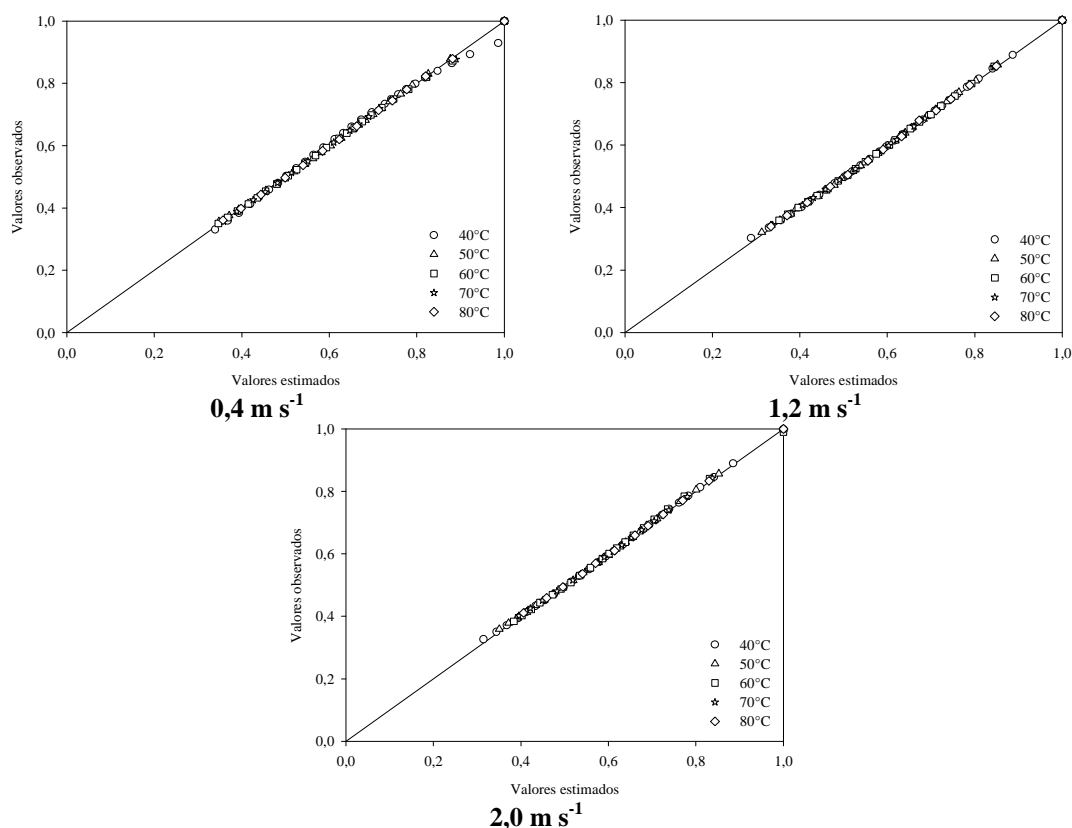


FIGURA 2. Curvas de correspondências nas diferentes temperaturas e velocidades do ar de 0,4; 1,2 e 2,0 m s⁻¹.

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

Nas Figuras 3, 4 e 5 são apresentadas, respectivamente, as curvas de secagem em camada delgada dos grãos de soja nas velocidades do ar de 0,4; 1,2 e 2,0 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 $^\circ\text{C}$, 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.

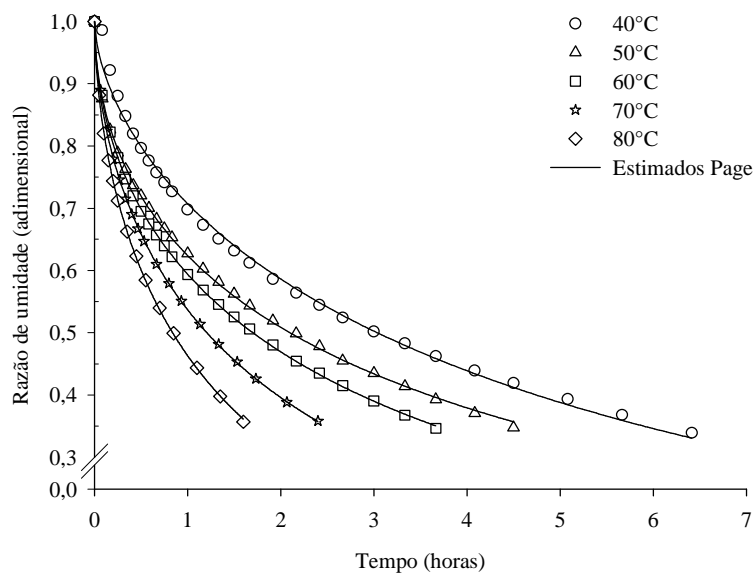


FIGURA 3. Valores de razão de umidade experimentais e estimados pelo modelo de Page para a secagem dos grãos de soja em camada delgada na velocidade do ar de $0,4 \text{ m s}^{-1}$.

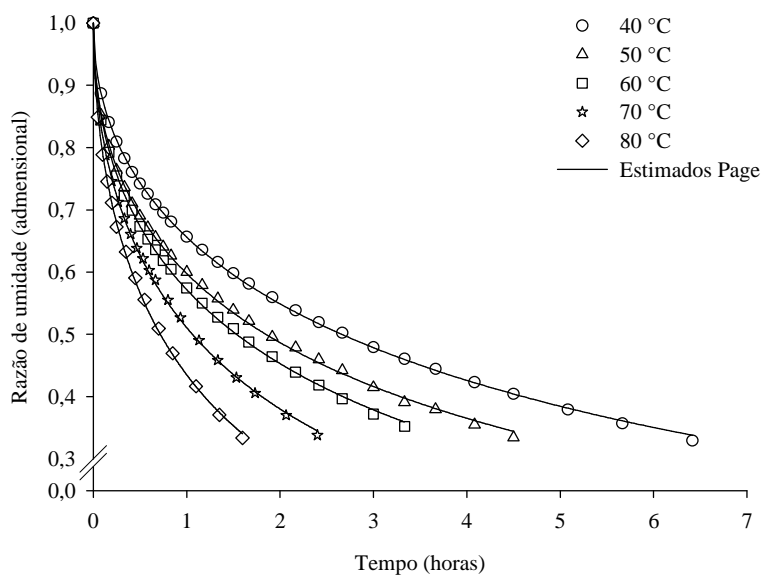


FIGURA 4. Valores de razão de umidade experimentais e estimados pelo modelo de Page para a secagem dos grãos de soja em camada delgada na velocidade do ar de $1,2 \text{ m s}^{-1}$.

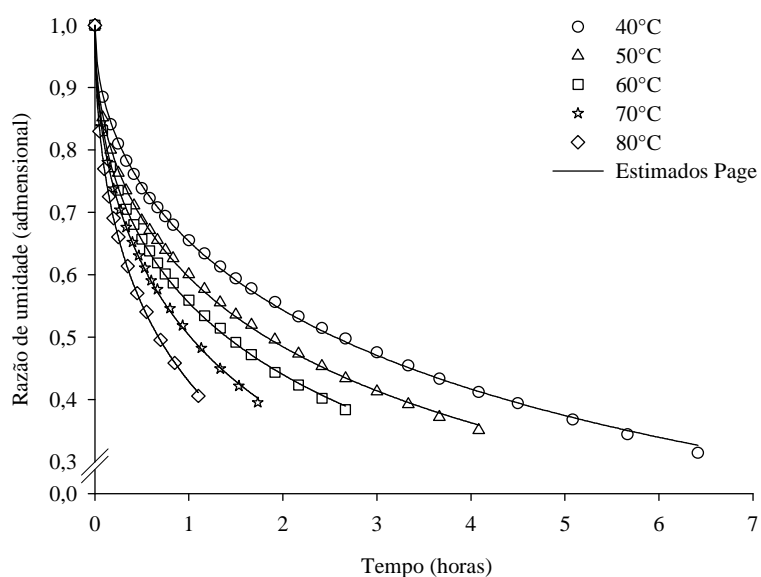


FIGURA 5. Valores de razão de umidade experimentais e estimados pelo modelo de Page para a secagem dos grãos de soja em camada delgada na velocidade do ar de $2,0 \text{ m s}^{-1}$.

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 influencia da temperatura do ar sobre as curvas de secagem dos grãos de soja 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 soja em camada delgada (Figuras 5, 6 e 7), o qual apresenta um efeito bem menos significativo que o apresentado pela variação da temperatura do ar no tempo final de secagem, para o produto atingir o teor de água de $0,11 \pm 0,01$ decimal b.s.. Efeito esse observado em café, como Muhidong et al. (2013), estudando o comportamento da secagem de café (*Coffea arabica* L.) e testando três níveis de velocidade do ar (0,5; 1,2 e 1,8 m s⁻¹) e uma temperatura de secagem de (47 °C), constatou que o aumento da velocidade do ar de secagem não conseguiu melhorar consideravelmente a taxa de secagem.

Na Tabela 3 são apresentados os coeficientes do modelo de Page ajustados aos dados observados durante a secagem em camada delgada dos grãos de soja 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 soja.

T (°C)	0,4 m s ⁻¹		1,2 m s ⁻¹		2,0 m s ⁻¹	
	k	n	k	n	k	n
40	0,3461	0,6251	0,4210	0,5126	0,4252	0,5204
50	0,4714	0,5197	0,5147	0,5147	0,5174	0,4853
60	0,5205	0,5392	0,5587	0,5028	0,5884	0,4803
70	0,6218	0,5752	0,6714	0,5261	0,6869	0,5131
80	0,7694	0,5962	0,8317	0,5526	0,8463	0,5129

As magnitudes da constante de secagem “k”, do modelo de Page, aumentou de acordo com a elevação da temperatura do ar de secagem em um 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, não apresentou tendência definida com o aumento da temperatura em uma mesma velocidade do ar de secagem, porém variando a velocidade do ar os valores do coeficiente “n”, sofrem redução com exceção na temperatura de 40 °C e fluxo de ar de 2,0 m s⁻¹. Porém ao se calcular a média dos valores do coeficiente “n”, de todas as temperaturas para uma mesma velocidade do ar, notou-se que os valores médios do coeficiente “n” também diminuem com o aumento da velocidade do ar.

Devido a tendências definida da constante “k” em função da temperatura e velocidade do ar, a mesma pode ser descrita pela Equação 15. A tendência definida dos valores médios do coeficiente “n” em função da velocidade do ar pode ser descrito pela Equação 16.

$$k = -0,0616 + 0,0419 V + 0,0100 T \quad (R^2 = 0,9615) \quad (15)$$

$$n = -0,0429 V + 0,5833 \quad (R^2 = 0,8807) \quad (16)$$

As Equações 15 e 16 utilizadas para expressar os valores da constante “k” e do coeficiente “n” do modelo de Page em função da temperatura e velocidade do ar de secagem apresentaram ajustes satisfatórios, com valores razoáveis do coeficiente de determinação (R²).

Substituindo as Equações 1, 15 e 16 na Equação 8 arranja-se a Equação 17, com a qual é possível estimar o teor de água dos grãos de soja em função do tempo, temperatura e velocidade do ar de secagem, para a faixa de temperatura e velocidade do ar de secagem estudado neste trabalho.

$$U = U_e + (U_i - U_e) \exp \left[(-0,0616 + 0,0419 V + 0,0100 T) \cdot \theta^{(-0,0429 V + 0,5833)} \right] \quad (17)$$

em que:

θ : tempo de secagem, horas;

T: temperatura do ar de secagem, °C; e

V: velocidade do ar de secagem, m s⁻¹.

4.2. Determinação do coeficiente de difusão efetivo

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios do coeficiente de difusão efetivo obtidos durante a secagem dos grãos de soja para as diferentes condições de temperatura e velocidade do ar de secagem, considerando o raio equivalente dos grãos de 3,02 mm.

TABELA 4. Coeficiente de difusão efetivo ($D \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) ajustado as diferentes temperaturas e velocidades do ar de secagem em camada delgada dos grãos de soja.

T (°C)	0,4 m s ⁻¹			1,0 m s ⁻¹			1,6 m s ⁻¹		
	D	SE	R ²	D	SE	R ²	D	SE	R ²
40	2,4533	0,0283	0,9776	2,8801	0,0206	0,9868	2,9977	0,0185	0,9890
50	3,6851	0,0186	0,9879	4,1019	0,0266	0,9764	4,2497	0,0251	0,9766
60	4,5143	0,0179	0,9893	5,0407	0,0220	0,9823	5,6235	0,0253	0,9739
70	6,3143	0,0189	0,9888	7,2583	0,0199	0,9866	7,7815	0,0209	0,9825
80	9,0005	0,0216	0,9870	10,6121	0,0205	0,9886	11,7395	0,0240	0,9799

Os valores do coeficiente de difusão efetivo dos grãos de soja 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.

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. (2014), estudando grãos de sorgo.

As variações dos valores do coeficiente de difusão efetivo para os grãos de soja, nas diferentes condições do ar de secagem, ficaram entre 2,4533 e 11,7395x 10⁻¹¹ m² s⁻¹ para as temperaturas e velocidades do ar de 40 °C – 0,4 m s⁻¹ e 80 °C – 2,0 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 soja situados na faixa de valores relatados por esses autores.

4.2.1. Influência da temperatura

Na Figura 8 são apresentados os valores de $\text{Ln}(D)$ em função do inverso da temperatura absoluta obtido para os grãos de soja nas diferentes condições de ar durante a secagem.

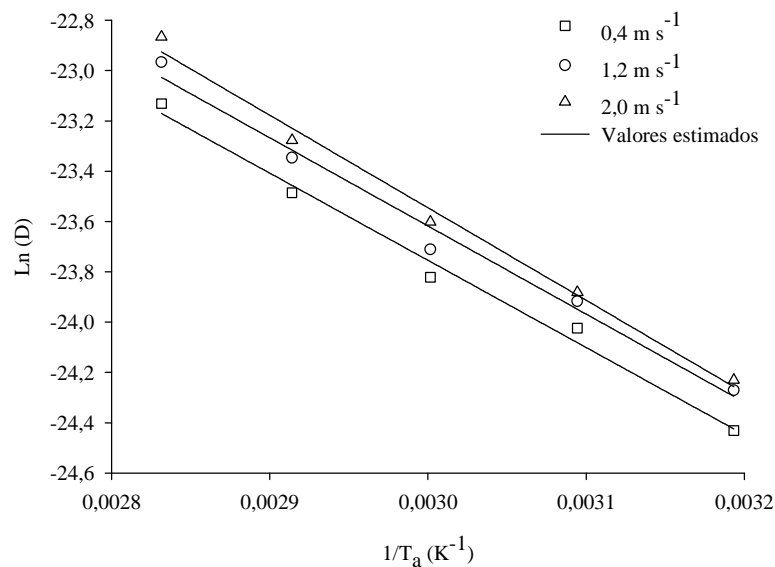


FIGURA 8. Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo em função das diferentes temperaturas, e para as diferentes velocidades do ar durante a secagem dos grãos de soja.

A dependência dos valores do coeficiente de difusão efetivo aumentaram linearmente com relação ao incremento da temperatura e velocidade do ar de secagem (Figura 8), comportamento semelhante foi observado por Resende et al. (2014). Com a inclinação da curva da representação de Arrhenius obtém-se a relação E_a/R , enquanto que com a sua interseção com o eixo das ordenadas obtém-se o valor de D_0 . As Equações 18, 19 e 20 apresentam os coeficientes da equação de Arrhenius ajustadas para o coeficiente de difusão efetivo dos grãos de soja para as velocidades do ar de 0,4; 1,2 e 2,0 m s^{-1} , respectivamente, calculados de acordo com a Equação 14.

$$D_i = 3,4491 \times 10^{-3} \exp\left(\frac{28,8295}{R T_a}\right) \quad (18)$$

$$D_i = 3,9042 \times 10^{-3} \exp\left(\frac{29,1531}{R T_a}\right) \quad (19)$$

$$D_i = 1,5515 \times 10^{-3} \exp\left(\frac{30,5931}{R T_a}\right) \quad (20)$$

A energia de ativação para difusão líquida, para o intervalo de temperatura de 40 a 80 °C, durante a secagem dos grãos de soja foi de aproximadamente 28,83; 29,15 e 30,60 kJ mol⁻¹ (Equações 18, 19 e 20), para as velocidades do ar de secagem de 0,4; 1,2 e 2,0 m s⁻¹, respectivamente.

Os valores de energia de ativação tiveram suas magnitudes elevadas conforme aumentou-se a 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. A energia de ativação calculada para os grãos de soja, no presente trabalho, apresentou valores situados entre os valores obtidos por alguns produtos oleaginosos, como em grãos de mamona de 15,25 kJ mol⁻¹ (GONELI, 2008), sementes de pinhão manso de 15,78 kJ mol⁻¹ (RESENDE et al., 2011), nabo forrageiro de 24,78 kJ mol⁻¹ (SOUSA et al., 2011), grãos de amendoim de 31,27 kJ mol⁻¹ (ARAUJO, 2013).

5. CONCLUSÕES

Conforme os resultados obtidos neste trabalho, podemos concluir que:

- Baseando-se em parâmetros estatísticos, apenas o modelo Exponencial de Dois Termos não apresentou resultados satisfatórios para a representação da cinética de secagem em camada delgada dos grãos de soja, sendo escolhido entre os modelos ajustados o modelo de Page para representar o processo.
- O coeficiente de difusão efetivo aumenta gradativamente sua magnitude com a elevação da temperatura e velocidade do ar de secagem.
- A relação do coeficiente de difusão efetivo com a temperatura do ar de secagem pode ser descrita pela equação de Arrhenius, que apresenta uma energia de ativação para a difusão durante a secagem dos grãos de soja de 28,83; 29,15 e 30,60 kJ mo⁻¹ para as velocidades de 0,4; 1,2 e 2,0 m s⁻¹, respectivamente.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, 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.

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

BRACCINI, A.L.; ALBRECHT, L.P.; ÁVILA, M.R.; SCAPIM, C.A.; BIO, F.E.I.; PELEGRINELLO, S.R. Qualidade fisiológica e sanitária das sementes de quinze cultivares de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) colhidas na época normal e após o retardamento de colheita. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.25, n.2, p.449-457, 2003.

CÂMARA, G.M.S. **Efeito do fotoperíodo e da temperatura no crescimento, florescimento e maturação de cultivares de soja (*Glycine max* L. Merrill)**. 1991. 266p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

CONAB. (2014). **Acompanhamento da Safra 2014/2015: Segundo levantamento**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 22 Nov. 2014.

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.

DRAPER, N.R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 3th ed. 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. Disponível em: <<http://www.embrapa.gov.br>>. Acesso em: 22 nov. 2014.

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.

GONELI, A. L.D. **Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade da mamona (*Ricinus communis* L.) durante a secagem e o armazenamento**. 2008. 186p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.

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.

KAYA, A.; AYDIN, O. An experimental study on drying kinetics of some herbal leaves. **Energy Conversion and Management**, v.50, n.1, p.118–124, 2009.

KEEY, R.B. **Drying: Principles and practice**. New York: Pergamon Press. 1972. 358p.

KUMAR, N.; SARKAR, B.C.; Sharma, H.K. Effect of air velocity on kinetics of thin layer carrot pomace drying. **Food Science and Technology International**, v.17, n.5, p.459-469, 2011.

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.

LUDWIG, M.P. Dutra, L.M.C.; Zobot, L.; Jauer, A.; Uhry, D.; Farias, J.R.; Losekann, M.E.; Stefanelo, C.; Lucca Filho, O.A. Efeito da densidade de semeadura e genótipos no rendimento de grãos e seus componentes na soja semeada após a época indicada. **Revista da Faculdade de Zootecnia, Veterinária e Agronomia, Uruguaiana**, v.14, n.2, p.13-22, 2007.

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.

- 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 (*Elaeagnu sangastifolial* 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.
- MUHIDONG, J.; MURSALIM; RAHMAN, A. The effect of air flow rate on single-layer drying characteristics of Arabica coffee. **International Food Research Journal**, v.20, n.4, p.1633-1637, 2013.
- OZDEMIR, M.; DEVRES, Y.O. The thin layer drying characteristics of halzenuts 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.; ULLMANN, R.; SIQUEIRA, V.C.; CHAVES, T. H.; FERREIRA, L. U. Modelagem matemática e difusividade efetiva das sementes de pinhão-mansô (*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.
- 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.
- YILBAS, B.S.; HUSSAIN, M.M.; DINCER, I. Heat and moisture diffusion in slab products to convective boundary condition. **Heat and Mass Transfer**, v.39, p.471–476, 2003.

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.