

SECAGEM DE GRÃOS DE SOJA EM SECADOR CAVALETE: CINÉTICA E UMIDADE AVALIADA ATRAVÉS DE MODELOS MATEMÁTICOS

Isabella Moreira da Silva Pinho, isabellamoreiraeq@hotmail.com¹

Maribel Valverde Ramirez, valverderamirez@hotmail.com²

Mauro Lúcio Naves de Oliveira, mauro.oliveira@ufmt.br²

^{1,2}Universidade Federal de Mato Grosso, R. Quarenta e Nove, 2367 - Boa Esperança, Cuiabá – MT.

Resumo: A operação unitária de secagem de grãos é fundamental para garantir o armazenamento seguro dado que minimiza as perdas por ataque de fungos e insetos. Conhecer os fenômenos físicos da operação de secagem e desenvolver procedimentos eficientes, é uma necessidade para diminuir custos operacionais e perdas de produto. O objetivo da presente pesquisa foi avaliar dados experimentais da secagem de grão de soja em um secador industrial tipo cavalete modelo KW DRM com capacidade de 125 toneladas/hora no município de Primavera do Leste-MT. Para isso foram analisados a cinética de secagem dos grãos através de curvas de secagem e o ajuste dos dados experimentais a modelos matemáticos disponíveis na literatura. Com as variáveis umidade e temperatura foi possível construir as curvas da cinética de secagem e os gráficos de umidade em função do tempo de secagem. Os dados experimentais foram divididos em dois grupos, onde Grupo A são dados coletados em dias de baixa umidade relativa do ar e alta umidade inicial do grão(muita umidade a ser retirada), e Grupo B são dados coletados em dias de alta umidade relativa do ar e baixa umidade inicial do grão(pouca umidade a ser retirada). Esta separação foi realizada para analisar os dados com as mesmas condições operacionais. Na análise estatística, foram utilizados quatro modelos matemáticos: Verma, Dois Termos, Logaritmo e Midilli. No ajuste dos modelos matemáticos para os dados experimentais, realizou-se uma análise de regressão não linear, empregando o programa computacional Curve Expert Basic 2.2®. A avaliação da adequação dos modelos empregados, foi realizada por intermédio do cálculo do coeficiente de determinação (R^2). Além disso, foi determinado o coeficiente de difusividade efetiva e a influência da temperatura na taxa de secagem. Nos resultados foi observado que as curvas de secagem apresentaram uma tendência exponencial típica e que o melhor desempenho de ajuste dos dados experimentais foi obtido pelo modelo de Midilli e pelo modelo Dois termos. Os valores dos coeficientes de difusão efetivos de todos os experimentos aumentaram com a elevação da temperatura do ar de secagem e apresentaram-se na ordem de 1×10^{-09} a $1 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. A energia de ativação para os dados analisados neste trabalho foram de 106,26 a 127,92 kJ.mol⁻¹ para o grupo B e de 127,92 a 172,08 kJ.mol⁻¹ para o Grupo A.

Palavras-chave: Cinética de secagem, Soja, Secagem, Modelos matemáticos, Coeficiente de difusão.

1. INTRODUÇÃO

O grão de soja possui grande variedade de usos, desde na alimentação humana e animal até como fonte de diversos insumos nas indústrias químicas. Além de ser um alimento funcional para o consumo *in natura*, o grão e seus derivados são amplamente utilizados na indústria alimentícia com aplicações tecnológicas como espessantes, estabilizantes, absorventes de água e gordura, controlador de cor e texturizador.

O grão de soja mesmo durante o armazenamento continua a sua atividade metabólica. Devido a este processo oxidativo, as sementes estão sujeitas a transformações contínuas e precisam ser submetidas a operações unitárias de secagem.

A secagem é um processo de preservação de alimentos que possui a vantagem de ser um método de baixo custo e de simples operação, quando comparada com a refrigeração, irradiação e tratamentos químicos. O processo de secagem tem como objetivo a retirada parcial da água, por meio de dois processos que ocorrem simultaneamente: a transferência de calor do ar para o material e a transferência de massa (água) do material para o ar. Ocorre a transferência de calor para vaporização do líquido presente no sólido e transferência de massa referente à movimentação do líquido ou vapor no interior do sólido se movendo em direção ao gás (Foust and Wenzel, 1980).

A partir da redução da disponibilidade de água nos grãos, é possível diminuir o desenvolvimento de microrganismos (principalmente fungos), o que evita o surgimento de grãos ardidos e mico toxinas, reduz-se o processo de respiração dos grãos, os quais provocam perdas de massa seca e gera calor na massa de grãos. A secagem desacelera a taxa de reações bioquímicas que promovem a autodegeneração do produto. Para o armazenamento de grãos de soja, dentro das

condições brasileiras, é recomendado um teor de água próximo a 13% (base úmida), pois a atividade de água (a_w) é estabilizada em níveis que inviabilizam o desenvolvimento de fungos e bactérias (Silva, 2005).

Durante o processo de secagem, os grãos de soja podem sofrer também perdas qualitativas importantes, causadas por excesso de aquecimento (perda de propriedades organoléticas), pela velocidade do ar (injúria no grão), pela umidade inicial e final, dependendo do sistema de secagem utilizado (Brooker et al., 1992). Para efetuar a operação de secagem e armazenagem de grãos e sementes, é necessário o conhecimento das relações entre a temperatura e a umidade relativa do ar e as condições desejáveis de conservação do produto. O fluxo de água nesses produtos durante a secagem depende de muitos fatores como a forma e a constituição química e se torna mais difícil à medida que o grão tende a atingir o teor de água de equilíbrio (Goneli, 2008).

A difusão é considerada o principal mecanismo de migração interno de umidade no processo de secagem, ocorrendo nos poros, capilares e pequenos espaços saturados de vapor ou líquido no interior do material sólido (quando desconsiderado o efeito de contração volumétrica do grão). Tal mecanismo pode ser modelado matematicamente pela equação da segunda Lei de Fick para difusão. (Cremasco, 2002)

Ocorrem dois processos simultâneos quando um sólido está sujeito à secagem térmica. O primeiro é a transferência de energia (em forma de calor) a partir do ambiente circundante para evaporar a superfície úmida; e o segundo é a transferência da umidade interna para a superfície do sólido e subsequente evaporação (Azevedo e Alves, 2017).

É necessário compreender a cinética de secagem e os mecanismos de transferência de massa e calor, para analisar e tratar dados experimentais, principalmente para realizar simulações.

A relação entre a o teor de umidade e o tempo durante a secagem de um grão é descrita por sua curva de secagem, ela pode ser obtida pela diferenciação em ordem ao tempo dos dados experimentais, neste caso são mais descritivas do processo e fornecem um conjunto de informações de grande utilidade (Azevedo e Alves, 2017).

Os modelos teóricos utilizam os fundamentos da matemática da difusão e da transferência de calor e massa e podem descrever de forma aceitável o perfil da distribuição de água no interior de determinado produto agrícola desde que seja possível correlacionar sua forma à geometria de um sólido perfeito, além da exigência do estabelecimento de uma relação funcional entre o coeficiente de difusão, o teor de água e a temperatura (Carlesso et al, 2007)

Geralmente o comportamento de um sólido submetido à secagem, sob condições de temperatura e umidade relativa fixas, tende a seguir um certo padrão, como representado na Figura 1, que evidencia os diferentes estágios de secagem que podem ser obtidas ao longo do tempo (Foust and Wenzel, 1980).

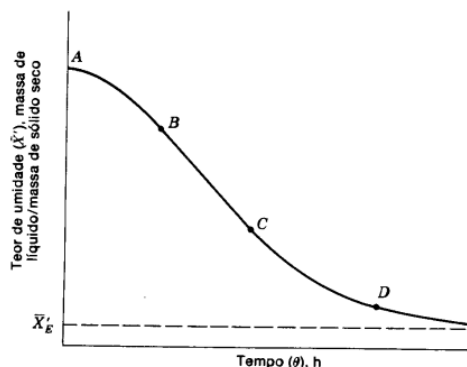


Figura 1. Curva de secagem do teor de umidade em função do tempo em condições constantes de secagem. (Foust and Wenzel, 1980).

No início do processo de secagem, a temperatura do sólido em contato com o ar de aquecimento tende se ajustar, atingindo o estado estacionário. Antes, porém, há um período de transição, correspondente à curva AB, que pode ocorrer à taxa crescente ou decrescente. O estado estacionário é atingido com a alteração tanto da temperatura do sólido quanto da taxa de secagem. A temperatura da superfície e do interior do sólido molhado passa a ser a temperatura de bulbo úmido do gás de aquecimento. Caso o produto esteja aquecido no início do processo, possivelmente o período AB não exista e a taxa de secagem, então, inicia diretamente no ponto B (Foust and Wenzel, 1980).

No ponto B, a temperatura do sólido se estabiliza, pois a temperatura do grão se aproxima da temperatura de bulbo úmido e passa ao denominado período de secagem a taxa constante, representado pelo segmento de curva BC. Nessa etapa, a superfície do sólido está saturada de água e a secagem ocorre como se fosse a evaporação de uma massa de líquido. A água proveniente do interior do sólido substitui a água retirada da superfície, mantendo a taxa de secagem constante (Foust and Wenzel, 1980).

A partir do ponto C, tem-se o primeiro período de secagem com taxa decrescente, na qual a temperatura do sólido aumenta à proporção que a taxa de secagem decresce gradativamente, nessa etapa a temperatura do produto atinge valores superiores aos da temperatura de bulbo úmido. Este comportamento cinético pode ser observado conforme a curva entre os pontos CD. A velocidade de remoção de umidade nessa etapa é inferior aos demais períodos, pois a superfície do sólido vai, gradativamente, empobrecendo em umidade pois ocorre a contração dos poros e a redução do diâmetro do grão. A taxa com que a água migra do interior do sólido para a superfície é menor do que a taxa com que a massa de água é retirada da superfície (Foust and Wenzel, 1980).

Figura 2. **Fluxo de ar do secador KW DRM** (Weber, 2015).

Foram coletados dados experimentais ao longo de vários ciclos de secagem durante a realização do estágio obrigatório. Nesta pesquisa são apresentados os principais resultados das coletas realizadas nos dias 08/03, 09/03, 15/03, 17/03, 24/03 e 09/04 em horários distintos, que foram selecionados por apresentarem as mesmas condições operacionais.

A coleta de dados foi realizada a cada 20 minutos, em tratamentos de 2,5 horas a 3,5 horas de operação, e são registradas de forma manual em um boletim de secagem. Dessa forma, foram monitorados parâmetros operacionais de secagem como:

- Umidade Absoluta e Temperatura do grão (°C): amostras dos grãos foram retiradas na descarga do secador para realizar a medição utilizando equipamento digital GAC® 2100 Agri, fabricante Dickey-john. A umidade é dada em base úmida (W).
- Umidade Relativa do ar e Temperatura Ambiente (°C): Foram coletados no painel de CLP (Controlador Lógico programável) do secador, que possui dados atualizados simultaneamente através de uma torre meteorológica local.
- Temperatura de secagem (°C): Dados obtidos por meio de três sensores de temperatura (T1, T2 e T3) do tipo PT-100 instalados no interior do secador em três níveis distintos do equipamento, indicados na Fig. 2. Os sensores são do tipo termopar e possuem ponta metálica e funcionam por meio da variação no valor da resistência elétrica de um condutor de metal, em função da temperatura.

A razão de umidade do produto durante a secagem, foi determinada por meio da Eq. (1).

$$MR = \frac{M - M_E}{M_0 - M_E} \quad (1)$$

onde: MR é a razão de umidade, adimensional; M é o teor de água do produto num dado instante de tempo, (base seca); M_E é o teor de água do produto em equilíbrio, (base seca) e M_0 é o teor inicial de água do produto, (base seca).

Durante a secagem dos grãos de soja no secador tipo cavalete, os valores de M_E foram relativamente pequenos em comparação com M e M_0 . Assim, a Eq. (1) foi simplificada (Pala *et al.* 1996; Doymaz, 2004).

$$MR = \frac{M}{M_0} \quad (2)$$

Na análise estatística, os dados foram ajustados para quatro equações de modelos matemáticos, frequentemente utilizadas na literatura para representação da secagem de produtos agrícolas e que estão apresentadas na Tab. (1).

Tabela 1. **Modelos para prever o fenômeno de secagem de produtos agrícolas.** (Midilli *et al.*, 2002)

Modelo	Equação	
Dois Termos	$MR = d \exp(-kt) + f \exp(-gt)$	(3)
Logaritmo	$MR = d \exp(-kt) + f$	(4)
Midilli	$MR = d \exp(-kt^n) + ft$	(5)
Verma	$MR = d \exp(-kt) + (1 - d) \exp(-gt)$	(6)

onde: t é o tempo de secagem, min; k é a constante de secagem, min^{-1} e d, f, g e n são os coeficientes de ajustes dos modelos, adimensionais.

O comportamento de um sólido durante a sua secagem em determinadas condições de temperatura e umidade é descrita por sua curva de secagem. Esta pode ser representada de duas maneiras, pela variação de umidade do sólido em função do tempo de secagem, ou pela variação instantânea da velocidade de secagem, representada na Eq. (7), que se define como a massa de líquido retirada por unidade de massa de sólido seco e por unidade de tempo em função da umidade média do sólido (Azevedo e Alves, 2017).

$$r(X) = \frac{-dX}{dt} \quad (7)$$

No ajuste dos modelos matemáticos para os dados experimentais, realizou-se análise de regressão não linear, empregando o programa computacional Curve Expert Basic 2.2®.

A avaliação da adequação dos modelos empregados para descrição do fenômeno estudado, foi feita por intermédio do cálculo do coeficiente de determinação (R^2), estimado como o quadrado do coeficiente de correlação linear entre valores preditos e observados para a variável dependente razão de umidade (Souza, 1998).

O coeficiente de difusão efetivo (D_{ef}) foi obtido por meio do ajuste do modelo matemático da difusão líquida aos dados experimentais da secagem dos grãos de soja, como demonstrado na Eq. (8). Essa equação é a solução, pela série de Fourier, para a segunda lei de Fick, desconsiderando a variação volumétrica do produto, pressupondo um modelo

esférico, com valores constantes para o volume e a condição de contorno de teor de água conhecido na superfície do produto (Botelho *et al*, 2018).

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[-\frac{n^2 \pi^2 D_{ef} t_s}{r_e^2} \right] \quad (8)$$

onde: r_e é o raio equivalente do produto, $3,37 \times 10^{-3}$ m, D_{ef} é o coeficiente de difusão efetivo, $m^2 s^{-1}$, n é o número de termos em série e t_s é o tempo, s.

Para avaliar a influência da temperatura na difusividade efetiva, foi utilizada a equação do tipo Arrhenius, Eq. (9).

$$D_{ef} = D_0 \exp \left(-\frac{E_a}{RT} \right) \quad (9)$$

Em que: D_0 é a constante chamada de fator pré-exponencial, $m^2 s^{-1}$, E_a é a energia de ativação, $J mol^{-1}$, R é a constante universal dos gases, $8,314 J mol^{-1} K^{-1}$ e T é a temperatura absoluta, K. Linearizando a Eq. (8) teremos:

$$\ln(D_{ef}) = \ln(D_0) - \left[\frac{E_a}{R} \frac{1}{T} \right] \quad (10)$$

Dessa forma, plotando um gráfico de $\ln(D_{ef})$ pelo inverso da temperatura é possível avaliar a dependência do coeficiente em relação a T , a fim de determinar a energia de ativação do processo. A inclinação da curva obtida a partir da Eq. (9) fornece a relação E_a/R enquanto a intersecção com o eixo das ordenadas indica o valor de D_0 (Costa *et al.*, 2011). Segundo Kashaninejad *et al.* (2007), a energia de ativação é uma barreira que deve ser ultrapassada a fim de que o processo de difusão possa ser desencadeado no grão, é a energia mínima necessária para que se inicie o processo de secagem. Quanto menor a energia de ativação, maior é a difusividade de água no material.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os tratamentos foram realizados em diversas condições de temperatura e umidade relativa do ar, que são parâmetros que refletem diretamente no comportamento da curva de secagem. Uma dessas influências é a umidade inicial do grão, pois tratamentos com grãos que entram com alta umidade no secador demandaram de mais tempo para alcançar a umidade desejada. Por isso, os tratamentos foram classificados em dois grupos baseados em dados similares de umidade inicial, tempo de secagem e umidade relativa do ar.

A Fig. 3 representa os dados experimentais com o grupo A, para dados coletados em dias de alta umidade relativa do ar e grãos com baixa umidade inicial, e o grupo B, que são dados coletados em dias de baixa umidade relativa do ar e alta umidade inicial dos grãos de soja.

É possível observar na Fig. 3 que as curvas de secagem apresentaram uma tendência exponencial típica, observada em produtos agrícolas durante o período de secagem com taxa decrescente, corroborando os inúmeros resultados relatados na literatura referente a este tema de investigação. Comparando os gráficos dos grupos A e B é possível observar que o tempo de secagem é maior para o grupo B, isso confirma que o conteúdo de umidade do grão é maior, tendo influencia na taxa de secagem.

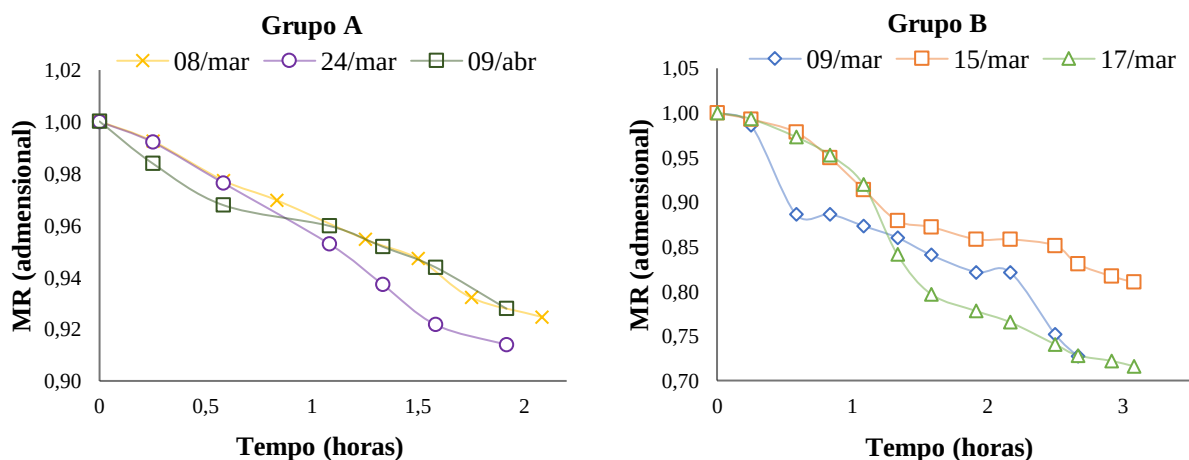


Figura 3. Curva de secagem dos experimentos.

Em outra perspectiva em relação a curva de secagem, a Fig. 4 representa a cinética do processo pela variação instantânea da velocidade de secagem em função da umidade média dos grãos de soja.

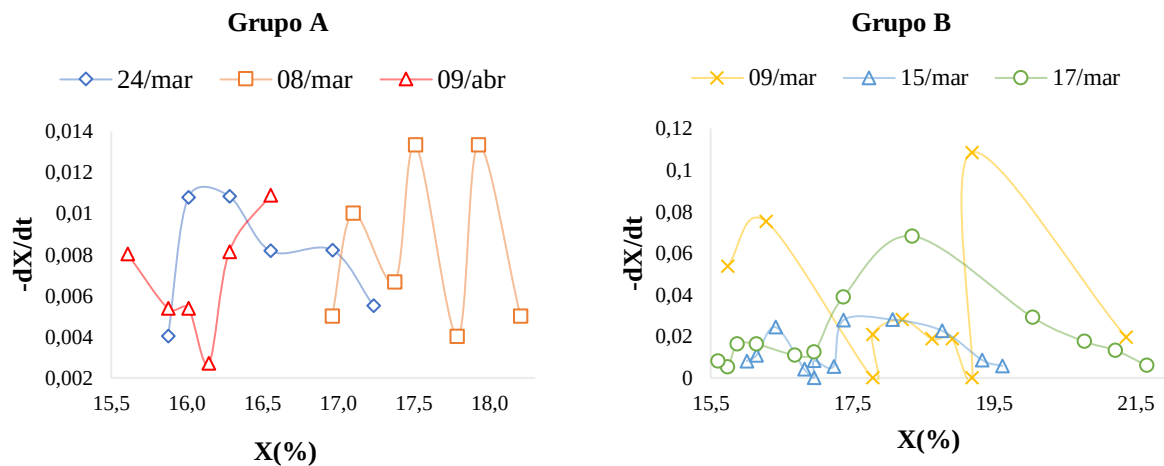


Figura 4. Curva de velocidade de secagem dos experimentos.

Segundo Azevedo e Alves (2017), as curvas de velocidade de secagem obtidas por diferenciação em ordem ao tempo dos dados experimentais, são muito mais descritivas do processo e fornecem um conjunto de informações de grande utilidade, principalmente para projeto e dimensionamento de equipamentos para secagem.

Dessa forma, é possível observar que no gráfico do grupo A as curvas são mais curtas, tendo relação direta com a baixa umidade inicial dos grãos.

3.1. Ajuste dos Modelos Matemáticos

Na Tab. 2, encontram-se os valores estatísticos obtidos através do software Curve Expert Basic 2.2® dos coeficientes de determinação (R^2) e valores da constante de secagem (k) para os modelos ajustados à cinética de secagem dos grãos.

Dessa forma, temos a constante de secagem (k), que segundo Goneli *et al.* (2009), representa o efeito das condições externas de secagem, e tende a aumentar com a elevação da temperatura do ar de secagem. Quando isso ocorre, menor é o valor do parâmetro n do modelo de Midilli, uma vez que há maior diferença entre a pressão de vapor do ar e do grão, promovendo maior remoção de água.

Tabela 2. Valores do ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais.

GRUPO A			GRUPO B		
Modelo	Parâmetro k	R^2	Modelo	Parâmetro k	R^2
08/mar			09/03		
Verma	3,879173	0,995578	Dois Termos	3,49186	0,971042
Midilli	4,738964	0,995518	Midilli	4,738964	0,966289
Logaritmo	1,448579	0,995497	Logaritmo	2,017936	0,961741
Dois Termos	3,846929	0,995439	Verma	1,121335	0,953963
24/mar			15/03		
Midilli	1,7298	0,99582	Midilli	1,969564	0,972015
Verma	5,2047	0,994295	Dois Termos	1,269541	0,968492
Logaritmo	1,3544	0,99236	Logaritmo	3,540008	0,9676
Dois Termos	4,9925	0,99212	Verma	7,163311	0,953067
09/abr			17/03		
Midilli	-1,8378	0,995706	Midilli	2,9598	0,987211
Dois Termos	3,1467	0,984774	Dois Termos	1,3914	0,965293
Verma	3,1472	0,984768	Verma	1,3241	0,960871
Logaritmo	1,999	0,972775	Logaritmo	2,1966	0,957707

Apesar de não ser um critério confiável para a seleção de modelos não-lineares, o coeficiente de determinação normalmente apresenta maiores valores para os modelos de melhor ajuste (Botelho *et al.*, 2018). É possível observar

que para todas os tratamentos de secagem testados, os modelos apresentaram elevados valores do coeficiente de determinação, sendo os melhores apresentando valores maiores que 97%, concordando aos resultados de Resende *et al.* (2010), que determinando a cinética de secagem do feijão adzuki obteve valores de (R^2) próximos a 98%, indicando uma representação satisfatória do fenômeno em estudo.

Ainda na Tab. 2, os modelos Midilli (3) e Dois Termos (1) aproximaram-se mais dos pontos experimentais que os demais modelos, constatado por meio do coeficiente de determinação (R^2), indicando que obtiveram os melhores ajustes. Botelho *et al.* (2018) também indicaram o modelo de Midilli como o melhor ajuste para experimentos com grãos de soja.

3.2. Determinação do coeficiente de difusão efetiva

Na Tab. 3, estão apresentados a relação dos valores do coeficiente de difusão efetiva obtidos durante a secagem dos grãos de soja para os diferentes tratamentos experimentais. Os valores estimados para os coeficientes de difusão efetiva condizem com trabalhos presentes na literatura para secagem de produtos agrícolas, que de segundo Madamba *et al.* (1996) apresentam-se na ordem de 1×10^{-08} a $1 \times 10^{-10} m^2 s^{-1}$.

Tabela 3. Coeficientes de difusão efetivos dos dados experimentais.

GRUPO A	
Experimento	$D_{ef}(m^2 s^{-1})$
08/mar	$3,59 \times 10^{-09}$ a $4,30 \times 10^{-10}$
24/mar	$3,68 \times 10^{-09}$ a $4,81 \times 10^{-10}$
09/abr	$3,74 \times 10^{-09}$ a $4,87 \times 10^{-10}$
GRUPO B	
Experimento	$D_{ef}(m^2 s^{-1})$
09/mar	$3,23 \times 10^{-09}$ a $3,02 \times 10^{-10}$
15/mar	$3,38 \times 10^{-09}$ a $2,74 \times 10^{-10}$
17/mar	$3,10 \times 10^{-09}$ a $2,52 \times 10^{-10}$

O coeficiente de difusão efetiva é um índice que possibilita avaliar a velocidade de secagem e sua dependência com a temperatura, sendo relatado em trabalhos similares como o de Chayjan *et al.* (2013), que investigou a secagem em camada fina de sementes de abóbora e obteve valores de difusividade de $0,160 \times 10^{-09}$ a $0,551 \times 10^{-10} m^2 s^{-1}$.

Já analisando a dependência do coeficiente de difusão efetiva de grãos de soja, em relação à temperatura do ar de secagem, temos a Fig. 5, que é representada a partir da equação de Arrhenius (Eq. 8).

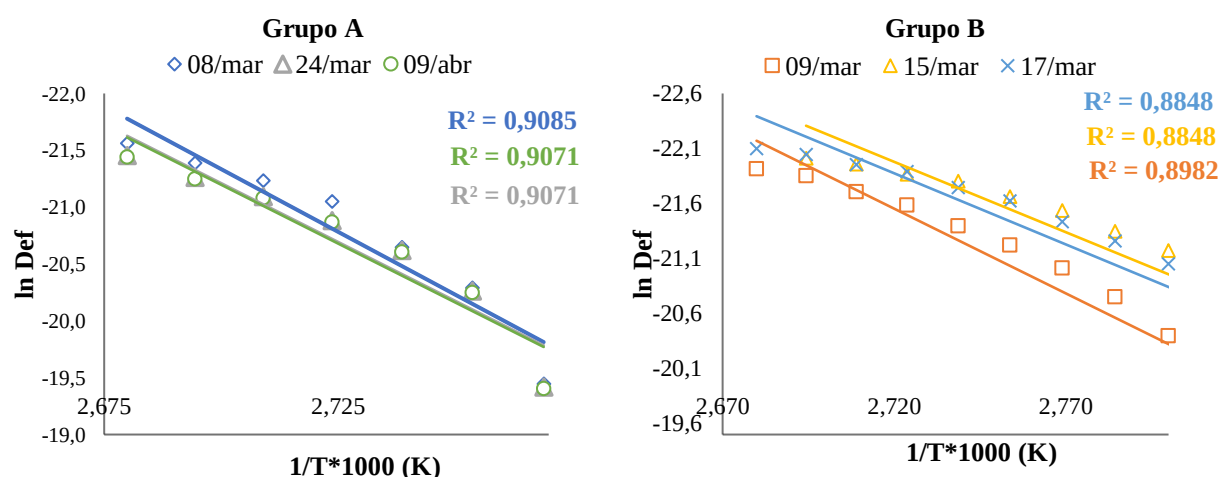


Figura 5. Dependência do coeficiente de difusão efetivo com a temperatura.

Foi possível analisar que os resultados para o coeficiente de difusão efetiva aumentaram com a intensificação da temperatura do ar de secagem ao longo do tempo de experimento. Com a elevação da temperatura, aumenta-se o nível de vibração das moléculas de água, favorecendo a difusão do vapor d'água durante a secagem do produto e, consequentemente, aumentando o coeficiente de difusão (Goneli *et al.*, 2009).

3.3. Energia de Ativação

Segundo Corrêa *et al.*, (2006), a energia de ativação é termodinamicamente definida como a facilidade com que as moléculas de água superam a barreira de energia durante a migração no interior do produto. Portanto, quanto menor a energia de ativação maior será a velocidade com que a água será removida dos grãos.

Os valores da energia de ativação encontrados no presente estudo estão descritos na Tab. 4.

Tabela 4. **Energia de ativação dos dados experimentais.**

Experimento	$E_a(kJ.mol^{-1})$
GRUPO A	
08/mar	127,92
24/mar	172,08
09/abr	172,08
GRUPO B	
09/mar	127,92
15/mar	106,26
17/mar	107,44

Analisando os resultados indicados na Tab. 4, verifica-se que a energia de ativação para a difusão de água nos grãos de soja não está na mesma ordem de grandeza dos valores encontrados na literatura, que de acordo com Zogzas *et al.*, (1996) varia de 12,7 a 110 kJ.mol⁻¹. Segundo Kashaninejad *et al.* (2007) a energia de ativação, é a energia mínima necessária para que desencadeie o processo difusivo do vapor d'água no produto.

Os valores de energia de ativação encontrada neste trabalho foram maiores que os encontrados para outras oleaginosas, como na mamona, de 15,25 kJ mol⁻¹, durante a secagem com uma faixa de temperatura de 25 a 55 °C (Goneli, 2008) e no nabo forrageiro de 24,78 kJ mol⁻¹ para a temperatura de 30 a 70 °C (Sousa *et al.*, 2011). Goneli *et al.* (2007), avaliando a secagem de trigo nas temperaturas entre 25 e 55 °C, verificaram que o produto apresentou energia de ativação para a difusão líquida de 42,0 kJ mol⁻¹. Em contrapartida, Aghbashlo *et al.* (2008) obtiveram valores de energia de ativação entre 110,83 e 130,61 kJ/mol⁻¹ na secagem de frutos de berberis (Berberidaceae). Isto se deve provavelmente ao fato de que, neste trabalho foi estudado o intervalo de temperatura de 80 a 100 °C, por se tratar de um procedimento de secagem em escala industrial, diferente do usado por outros autores (20 a 70 °C) em escala piloto.

Os experimentos do grupo B obtiveram menores valores de energia de ativação, entre 106,26 e 127,92 kJ mol⁻¹. Já para os experimentos referentes ao Grupo A, dois tratamentos obtiveram valores iguais (172,8 kJ mol⁻¹) e o terceiro apresentou um considerável desvio (127,92 kJ mol⁻¹).

4. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos neste trabalho é possível dizer que a cinética de secagem da soja, nas condições estudadas neste trabalho, ocorre em sua totalidade no período de taxa decrescente, análogo a outros trabalhos que estudaram o processo.

Os dados experimentais de secagem ajustaram adequadamente aos modelos estudados no intervalo de valores de umidade e tempo utilizados experimentalmente, mostrando que a maioria dos modelos testados poderia ser utilizado para prever o comportamento das curvas de secagem dos grãos de soja nas condições estudadas, se tratando de dados que foram obtidos em campo sem o devido controle de variáveis de dados experimentais. Os ajustes apresentaram valores de R² bem próximos. Porém, o modelo de Midilli e Dois Termos apresentaram valores superiores de R², sendo os que demonstraram o melhor ajuste aos dados experimentais estudados.

Os valores obtidos para o coeficiente de difusão efetiva corroboraram com os valores secagem de produtos agrícolas da literatura consultada, se apresentando na ordem de 1x10⁻⁰⁹ a 1x10⁻¹⁰ m²s⁻¹. O coeficiente de difusão efetiva apresentou menores valores para experimentos realizados com grãos mais úmidos e que tiveram maior tempo de secagem.

A energia de ativação para a secagem de soja analisados nesse trabalho foram de 106,26 a 127,92 kJ.mol⁻¹ para o grupo B e de 127,92 a 172,08 kJ.mol⁻¹ para o Grupo A, apresentando valores maiores que os encontrados na literatura para os grãos de soja, indicando que a energia mínima necessária para que desencadeie o processo difusivo do vapor d'água no produto é alta, tendo relação principalmente com as altas temperaturas e velocidade do ar de secagem durante o procedimento.

Além disso, vale ressaltar que os resultados se diferenciam em grande parte dos trabalhos presentes na literatura pois o presente trabalho se trata de um experimento de escala industrial, ocorrendo em diferentes condições de operação e condições climáticas locais, que influenciam diretamente no processo industrial.

5. REFERÊNCIAS

- Aghbashlo, M., Kianmehr, M. H., Samini-Akhijahani, H., 2008. "Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (Berberidaceae)". *Energy Conversion and Management*, Vol. 49, n. 10, pp. 2865-2871.
- Azevedo, E. G., Alves, A. M., 2017. *Engenharia de processos de separação*. 3. ed. Lisboa: IST Press.
- Barrozo, M.A.S., Henrique, H.M., Sartori, D.J.M., Freire, J.T. 2006. "The use of the orthogonal collocation method on the study of the drying kinetics of soybean seeds". *Journal Of Stored Products Research*, São Carlos, Sp, Vol. 42, n. 3, pp. 348-356.
- Botelho, F. M., Hoscher, R. H., Hauth, M. R., Botelho, S. C. C., 2018. "Cinética de Secagem de Grãos de Soja: Influência Varietal". *Revista Engenharia na Agricultura*, Viçosa, Vol. 26, n. 01, pp. 13-25.
- Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F.W., Hall, C. W., 1992. *Drying and storage of grains and oilseeds*. Westport: The AVI Publishing Company, 450 p.
- Cao, X., Zhang, M.; Fang, Z., Mujumdar, A. S., Jiang, H., Qian, H., Ai, H., 2016. "Drying Kinetics and Product Quality of Green Soybean Under Different Microwave Drying Methods." *Drying Technology: An International Journal*, China, Vol. 35, n. 2, pp. 240-248.
- Carlesso, V. O., Berbert, P. A., Silva, R. F., Detmann, E., 2007. Avaliação de modelos de secagem em camada fina de sementes de maracujá amarelo. *Revista Brasileira de Sementes*, São Paulo, Vol. 29, n. 2, pp. 28-37.
- Chayjan, R. A., Salari, K., Abedi, Q., Sabziparvr, A.A., 2013. "Modeling moisture diffusivity, activation energy and specific energy consumption of squash seeds in a semi fluidized and fluidized bed drying". *Journal of food science and technology*, Vol. 50, n. 4, pp. 667-677.
- Costa, L.M., Resende, O., Sousa, K.A., Gonçalves D.N., 2011. "Coeficientes de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de semente de crambe". *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, Vol.15, pp.1089-1096.
- Cremasco, M. A., 2002. *Fundamentos de transferência de massa*. 2. ed. Campinas: Editora da UNICAMP.
- Darvishi, H., 2017. "Quality, performance analysis, mass transfer parameters and modeling of drying kinetics of soybean." *Brazilian Journal Of Food Technology*, Sanandaj, Vol. 01, n. 34, pp. 143-158.
- Defendi, R. O., Nicolin, D. J., Paraíso, P. R., Jorge, L. M. M., 2015. "Assessment of the Initial Moisture Content on Soybean Drying Kinetics and Transport Properties." *Drying Technology: An International Journal*, Maringá, Pr, Vol. 14, n. 17, pp. 360-371.
- Doymaz, I., 2004. "Effect of pre-treatments using potassium metabisulphite and alkaline ethyl oleate on the drying kinetics of apricots". *Biosystems Eng*, Vol 89, pp.281-287.
- Foust, A. S., Wenzel, L. A., 1980. *Princípios das Operações Unitárias*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC.
- Goneli, A. L. D., 2008. "Variação das propriedades físicas-mecânicas e da qualidade da mamona (*Ricinus communis* L.) durante a secagem e o armazenamento". 186 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) *Universidade Federal de Viçosa*, Viçosa, 2008.
- Goneli, A. L. D., Vieira, M. C., Vilhasanti, H. C. B., Gonçalves, A. A., 2014. "Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem". *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, Vol. 44, n. 01, pp. 56-64.
- Goneli, A. L. D; Corrêa, P. C.; Afonso Júnior, P. C.; Oliveira, G. H. H., 2009. "Kinetics of thin layer drying of dehulled coffee beans." *Revista Brasileira de Armazenamento*, n. Especial 11, pp. 64-73.
- Guimarães, R. M., Oliveira, D. E. C., Resende, O., Silva, J. S., Rezende, T.A. M., Egea, M. B., 2018. "Thermodynamic properties and drying kinetics of 'okara'". *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, Vol. 22, n. 6, pp. 418-423.
- Jayas, D. S., Cenkowski, S.; Pabis, S., Muir, W. E., 2007. "Review Of Thin-Layer Drying and Wetting Equations". *Drying Technology: An International Journal*, Winnipeg, Canada, Vol. 9, n. 3, pp. 551-588.
- Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A., Tabil, L.G., 2007. "Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts". *Journal of Food Engineering*, Vol.78, pp.98-108.
- Khoshtaghaza, M. H., Darvishi, H., Minaei, S., 2015. "Effects of microwave - fluidized bed drying on quality, energy consumption and drying kinetics of soybean kernels." *Journal Of Food Science And Technology*, Sanandaj, Iran, Vol. 52, n. 8, pp. 4749-4760.
- Luz, G. R. et al., 2006. "Análise energética da secagem de farelo de soja em secador rotativo indireto." *Acta Scientiarum. Technology*, Vol. 28, n. 2, pp. 173-180.
- Madamba, P.S., Driscoll, R.H., Buckle, K.A., 1996. "Thin-layer drying characteristics of garlic slices". *Journal of Food Engineering*, London, v.29. p.75-97.
- Midilli, A., Kucuk H. Yapar Z., 2002. "A new model for single layer drying". *Drying Technology*, Vol. 20, n.7, pp.1503-1513.
- Miranda, L. C., Silva, W. R., Cavariani, C., 1999. "Secagem de sementes de soja em silo com distribuição radial do fluxo de ar". *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, Vol. 34, n. 11, pp. 2097-2108.
- Misra, R. N., Young, J. H., 1979. "Numerical Solution of Simultaneous Moisture Diffusion and Shrinkage During Soybean Drying". *Transactions Of The ASAE*, Raleigh, NC, Vol. 23, n. 5, pp. 1277-1282.
- Morey, R. V., Wilcke, W. F., Hansen, D. J., 2003. "Aeration Strategies for Reconditioning Dry Soybeans". *Applied Engineering In Agriculture*, St. Joseph, Michigan, Vol. 19, n. 4, pp. 433-446.

- Overhults, D. G., White, G. M., Hamilton, H. E., Ross, I. J., 1972. "Drying Soybeans With Heated Air". *Transactions Of The ASAE*, [S.L.], Vol. 16, n. 1, pp. 112-113.
- Pala M., Mahmutoglu T., Saygi B., 1996. "Effects of pretreatments on the quality of open-air and solar dried products". *Food*, Vol 40, pp.137-141.
- Rafiee, Sh., Keyhani, A., Sharifi, M., Jafari, A., Mobli, H., Tabatabaefar, A., 2009. "Thin Layer Drying Properties of Soybean (Viliamz Cultivar)." *Journal Of Agricultural Science And Technology (Jast)*, Vol. 11, n. 3, pp. 289-300.
- Resende, O., Ferreira, L. U., Almeida, D. P., 2010. "Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão Adzuki (*Vigna angularis*)". *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Vol. 12, n. 2, pp. 171-178.
- Ruivo, T. D., 2018. "Secagem de soja: determinação da difusividade e da porosidade do grão", 75 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Maringá, Maringá.
- Santos, D.C., Queiroz, A. J. M., Figueirêdo, R. M. F., Oliveira, E. N. A., 2013. "Cinética de secagem de farinha de grãos residuais de urucum". *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Vol. 17, n. 2, pp. 223-231.
- Silva, L. C., 2005. "Armazenagem: transporte de grãos". *Boletim técnico da Universidade Federal do Espírito Santo*.
- Silva, L. M. M., Sousa, F. C., Sousa, E. P., Mata, M. E. R. M. C., Duarte, M. E. M., 2014. "Modelos de predição da cinética de secagem dos grãos de guandu." *Brazilian Journal Of Food Technology*, Campinas, Vol. 4, n. 17, pp. 310-318.
- Souza, G. S., 1998. "Introdução aos modelos de regressão linear e não linear". Brasília: EMBRAPA/SPI, 505p.
- Weber, K., 2015. "Informativo Técnico Secador KW ADS Linha Pequeno Porte." Disponível em: <https://xdocs.com.br/doc/3b-informativo-secador-ads-pequeno-porte-jan-2015pdf-zo23195kx98m>. Acesso em: 24 fev. 2022.
- White, G. M., Bridges, T. C., Loewer, O. J., Ross, I. J., 1981. "Thin-Layer Drying Model for Soybeans." *Transactions Of The ASAE*, Lexington, EUA, Vol. 24, n. 6, pp. 1643-1646.
- Zhao, H., Yang, Z., Tao, Z., 2017. "Drying Kinetics of Continuous and Intermittent Heat Pump Drying of Green Soybean Seeds." *International Journal Of Food Engineering*, Tianjin, China, Vol. 13, n. 11, pp. 01-15.
- Zogzas, N.P., Maroulis, Z.B., Marinou-Kouris, D., 1996. "Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs." *Drying Technology*, Portugal, Vol.14, pp.2225-2253.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DRYING OF SOYBEANS IN AN EASEL DRYER: KINETICS AND MOISTURE EVALUATED THROUGH MATHEMATICAL MODELS

Isabella Moreira da Silva Pinho, isabellamoreiraq@hotmail.com¹

Maribel Valverde Ramirez, valverderamirez@hotmail.com²

Mauro Lúcio Naves de Oliveira, mauro.oliveira@ufmt.br²

^{1,2}Universidade Federal de Mato Grosso, R. Quarenta e Nove, 2367 - Boa Esperança, Cuiabá – MT.

Abstract. The unitary operation of grain drying is essential to ensure safe storage, as it minimizes losses due to fungal and insect attacks. Knowing the physical phenomena of the drying operation and developing efficient procedures is a necessity to reduce operational costs and product losses. The objective of the present research was to evaluate experimental data of the drying of soybeans in an industrial dryer with a capacity of 125 tons/hour type easel model KW DRM in the city of Primavera do Leste-MT, for this, the drying kinetics of the grains were analyzed through drying curves and the adjustment of experimental data to mathematical models available in the literature. With the humidity and temperature variables, it was possible to build drying kinetics curves and moisture graphs as a function of drying time. The experimental data were divided into two groups, where Group A are data collected on days of low relative humidity and high initial humidity of the grain, and Group B are data collected on days of high relative humidity and low initial humidity of the grain. This separation was performed to analyze the data with the same operating conditions. In the statistical analysis, four mathematical models were used: Verma, Two Terms, Logarithm and Midilli. In the adjustment of the mathematical models for the experimental data, a non-linear regression analysis was performed, using the computer program Curve Expert Basic 2.2®. The assessment of the adequacy of the models used was performed by calculating the coefficient of determination (R^2). In addition, the effective diffusivity coefficient and the influence of temperature on the drying rate were determined. In the results, it was observed that the drying curves showed a typical exponential trend and that the best performance of the fit of the experimental data was obtained by the Midilli model and the Two terms model. The values of the effective diffusion coefficients of all experiments increased with the elevation of the drying air temperature and were in the order of 1×10^{-09} to $1 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. The activation energy for the data analyzed in this work was from 106.26 to 127.92 kJ.mol^{-1} for group B and from 127.92 to 172.08 kJ.mol^{-1} for group A.

Keywords: Drying kinetics, Soy, Drying, Mathematical models, Diffusion coefficient.