

DETERMINAÇÃO DA DIFUSÃO LÍQUIDA DE FOLHAS DE NEEM INDIANO (*Azadirachta indica* A. JUSS.)

Jaqueline F. V. Bessa¹, Osvaldo Resende², Wilker A. Morais¹, Vitor M. Vidal¹, Lilian A. da Silva¹

¹ Mestre em Ciências Agrárias - Agronomia, Doutorando em Ciências Agrárias – Agronomia, IF Goiano, Rio Verde – GO, (0XX64) 3620 5636, jaqueline@agricola.eng.br;

² Doutor em Engenharia Agrícola, Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação, IF Goiano, Rio Verde – GO.

Apresentado no
XLIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2015
13 a 17 de setembro de 2015- São Pedro – SP, Brasil

RESUMO: A espécie *Azadirachta indica* A. Juss. conhecida como Neem Indiano é uma árvore nativa da Índia, recentemente introduzida no Brasil que possui ampla utilização nas áreas da medicina, agropecuária e cosmética, proporcionada particularmente por suas folhas desidratadas. Devido à importância desta espécie, tem-se a necessidade de conhecimentos específicos de seu pré-processamento, principalmente na secagem de suas folhas. Desta forma, neste estudo objetivou-se determinar a difusão líquida de folhas de Neem Indiano, utilizando três temperaturas de secagem: 35, 50 e 65 °C. As folhas apresentavam o teor de água inicial de $1,96 \pm 0,003$ b.s. (base seca, decimal). A secagem prosseguiu até que as folhas atingissem o teor de água de $0,037 \pm 0,004$ b.s. O modelo matemático da difusão líquida com a solução analítica para a placa plana infinita, com aproximação de oito termos, foi ajustado aos dados experimentais de secagem das folhas de Neem Indiano. Com a realização da secagem até seu equilíbrio higroscópico foi constatado que com aumento da temperatura, ocorre um decréscimo no tempo de secagem e aumento na intensidade do fenômeno de transporte de água. A energia de ativação foi de $27,77 \text{ kJ mol}^{-1}$, se mostrando dentro do intervalo indicado para produtos agrícolas.

PALAVRAS-CHAVE: Equação de Arrhenius, difusão efetiva, energia de ativação.

DETERMINATION OF LIQUID DIFFUSION SHEETS OF INDIAN NEEM (*Azadirachta indica* A. JUSS.)

ABSTRACT: The species *Azadirachta indica* A. Juss. known as Indian Neem tree is a native of India, recently introduced in Brazil that has wide use in medicine, agriculture and cosmetics, particularly provided by its dried leaves. Due to the importance of this kind, there is the need for specific knowledge of their pre-processing, particularly in drying the leaves. Thus, this study aimed to determine the net diffusion of Indian Neem leaves, using three drying temperatures: 35, 50 and 65 °C. The leaves had the initial water content of 1.96 ± 0.003 d.b. (dry basis, decimal). Drying continued until the leaves reach the water content of 0.037 ± 0.004 d.b. The mathematical model of liquid diffusion with the analytical solution for the infinite slab, to the nearest eight terms, was fitted to the experimental data of drying the leaves of Indian Neem. With the completion of drying to hygroscopic equilibrium has been found that with increased temperature, there is a reduction in drying time and an increase in the intensity of water transport phenomenon. The activation energy was $27.77 \text{ kJ mol}^{-1}$, showing within the range for agricultural products.

KEYWORDS: Arrhenius equation, effective diffusion, activation energy.

INTRODUÇÃO: O Neem Indiano (*Azadirachta indica* A. Juss.) pertence à família Meliaceae e é uma árvore nativa da Índia. Segundo Martinez et al. (2002) foi introduzida no Brasil pelo Instituto Agrônomico do Paraná (IAPAR) para estudos na utilização como planta inseticida. Para a utilização

de suas folhas como pesticida e também para demais finalidades, as folhas precisam passar pelo processo de secagem, este processo não pode danificar a composição das folhas devendo ser eficaz. De acordo com Radünz et al. (2006), outro fator importante proporcionado pela secagem, é o rendimento do óleo extraído, uma vez que, diferentes temperaturas do ar, interferem na permeabilidade ou resistência físico-mecânica dos tecidos vegetais, afetando a retenção dos compostos voláteis nas estruturas originais. Como a secagem é um processo que envolve uma transferência simultânea de energia e massa (BROOKER et al., 1992), a redução do teor de água durante o processo de secagem proporciona uma redução no tamanho do tecido celular, tal fenômeno é conhecido como contração volumétrica. Brooker et al. (1992) relatam a segunda lei de Fick para estabelecer a difusão da água em função do gradiente de concentração. Esclarecendo o coeficiente de difusão, Martinazzo et al. (2007) propõem que é a difusividade efetiva que engloba os efeitos de todos os fenômenos (internos e externos), podendo intervir sobre a migração da água e o seu valor é sempre obtido pelo ajuste das curvas experimentais. Diante do exposto, esta pesquisa objetivou-se estimar o coeficiente de difusividade efetiva e a energia de ativação durante a secagem das folhas de Neem Indiano, nas temperaturas de 35, 50 e 65 °C.

MATERIAL E MÉTODOS: O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Pós-Colheita de Produtos Vegetais do Instituto Federal Goiano - Câmpus Rio Verde (IF Goiano), com folhas de Neem Indiano. A secagem foi realizada em secador de camada fixa, confeccionado em chapa metálica número 16. A câmara de secagem tem as seguintes dimensões: 0,60 x 0,60 x 0,60 m, totalizando um volume de 0,216 m³, e possui ainda uma chapa com 25% de perfuração, situada a 0,33 m de altura. O ventilador é do tipo centrífugo, acionado por motor trifásico com potência de 1,5 cv. Cada secador é composto por seis sensores de temperatura pendulares e quatro resistências elétricas de 1.500 watts, perfazendo um total de 6.000 watts. Os sensores foram posicionados antes e após o sistema de aquecimento e no interior de cada bandeja. Na câmara de secagem foram colocadas quatro bandejas removíveis com fundo perfurado, com dimensões de 0,28 x 0,28 x 0,15 m. O sistema ainda dispõe de um controlador automático que gerencia o sistema e armazena os dados gerados. Foram envolvidas cerca de 0,25 kg de folhas de Neem Indiano por tecido do tipo voile e espalhadas sobre a bandeja, perfazendo uma camada de aproximadamente 0,06 m. A velocidade do ar utilizada para a secagem foi de 1,0 m s⁻¹. O sistema foi regulado para aquecer a 35, 50 e 65 °C. A umidade relativa dentro dos secadores durante a secagem foi de 40,39; 19,21 e 10,03% para as temperaturas de 36,2; 50,5 e 64,3 °C, respectivamente. As folhas apresentavam o teor de água inicial de 1,96 ± 0,003 b.s. (base seca, decimal). A secagem prosseguiu até que as folhas atingissem o teor de água de 0,037±0,004 b.s., determinado pelo método Brasil, 2009. A redução do teor de água ao longo da secagem foi acompanhada pelo método gravimétrico (perda de massa), utilizando-se uma balança com resolução de 0,01 g. A temperatura e a umidade relativa do ambiente externo à câmara de secagem foram monitoradas por um psicrômetro, e a temperatura interna foi monitorada por um termômetro instalado no interior da câmara de secagem. A umidade relativa no interior do secador foi obtida por meio dos princípios básicos de psicrometria, utilizando o programa computacional GRAPSI. Para a determinação das razões de teor de água das folhas do Neem Indiano durante a secagem, utilizou-se a seguinte expressão:

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} \quad (1)$$

em que,

RX - razão de teor de água do produto, adimensional; X - teor de água do produto, kg de água kg⁻¹ de matéria seca; X_i - teor de água inicial do produto, kg de água kg⁻¹ de matéria seca, e X_e - teor de água de equilíbrio do produto, kg de água kg⁻¹ de matéria seca.

Para obter o teor de água de equilíbrio das folhas de Neem Indiano em cada condição, foram utilizadas três repetições contendo 5 g, que permaneceram nas mesmas condições de secagem. As amostras foram pesadas periodicamente e o equilíbrio higroscópico foi atingido quando a variação da massa permaneceu, aproximadamente, invariável durante três pesagens consecutivas. O modelo matemático da difusão líquida com a solução analítica para a placa plana infinita, com aproximação de oito termos (Equação 2), foi ajustado aos dados experimentais de secagem das folhas de Neem Indiano:

$$RX = \frac{X^* - X_e^*}{X_i^* - X_e^*} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D \cdot t}{4} \cdot \left(\frac{S}{V} \right)^2 \right] \quad (2)$$

em que,

RX - razão de teor de água do produto, adimensional; N - número de termos; S - área da superfície do produto, m², e V - volume do produto, m³.

Obteve-se o volume de cada folha (V_f) por meio da medição dos três eixos ortogonais (comprimento, largura e espessura), em quinze folhas, no final da secagem, com auxílio de um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm, de acordo com a expressão proposta por Mohsenin (1986):

$$V_f = \frac{\pi \cdot (a \cdot b \cdot c)}{6} \quad (3)$$

em que,

V_f - volume das folhas, mm⁻³; a - comprimento, mm; b - largura, mm, e c - espessura, mm.

A relação entre o coeficiente de difusão efetivo e a elevação da temperatura do ar de secagem foi descrita por meio da equação de Arrhenius:

$$D = D_o \cdot \exp \left(\frac{E_a}{R \cdot T_a} \right) \quad (4)$$

em que,

D_o - fator pré-exponencial; E_a - energia de ativação, kJ mol⁻¹; R - constante universal dos gases, 8,134 kJ kmol⁻¹ K⁻¹, e T_a - temperatura absoluta, K.

Os coeficientes da expressão de Arrhenius foram linearizados com a aplicação do logaritmo na seguinte forma:

$$\ln D = \ln D_o - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T_a} \quad (5)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO: Na Figura 3A estão representados os coeficientes de difusão efetivos (m² s⁻¹) obtidos a partir da secagem em três condições de temperatura (35, 50 e 65 °C).

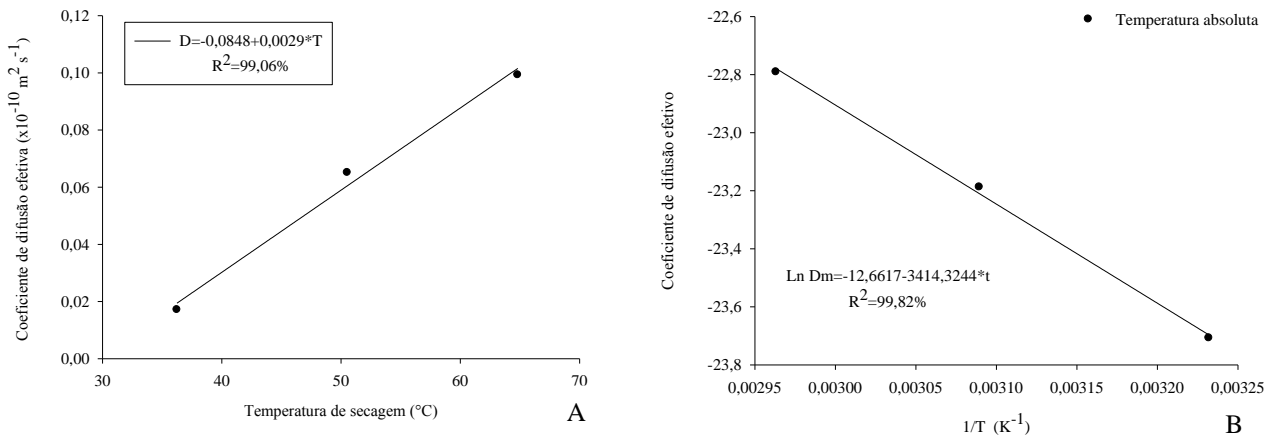


FIGURA 3. Coeficiente de difusão efetivo (m² s⁻¹) da secagem de folhas de Neem Indiano, em função das temperaturas do ar de secagem (A); Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo da secagem de folhas de Neem Indiano, em função das temperaturas do ar de secagem (B).

Verifica-se um aumento linear do coeficiente de difusão em função do aumento da temperatura, o que indica uma maior intensidade do fenômeno de transporte de água (SOUSA et al., 2011). Durante a secagem verificou-se que, os coeficientes de difusão apresentaram magnitudes entre 1,71 x 10⁻¹² a 9,93 x 10⁻¹² m² s⁻¹, para a faixa de temperatura de 35 a 65 °C, mostrando um aumento na difusividade em função da elevação da temperatura. Analisando folhas de capim-limão, Martinazzo et al. (2007),

também encontraram aumento do coeficiente de difusão de acordo com a elevação da temperatura do ar de secagem, apresentando resultados entre $1,20 \times 10^{-11}$ e $4,00 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para temperaturas de secagem entre 30 a 60 °C. Este aumento de difusividade proporcional a temperatura também ocorreu no trabalho de Prates et al. (2012), apresentando resultados entre $2,81 \times 10^{-11}$ e $8,85 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, para temperaturas de secagem entre 40 e 60 °C. Na Figura 3B são apresentados os valores do coeficiente de difusão efetivo em função do inverso da temperatura absoluta (T^{-1}).

Houve maior difusão de água na temperatura mais elevada (65 °C), corroborando com os resultados obtidos por Botelho et al. (2010), que descrevem que com o aumento da temperatura, ocorre elevação no nível de vibração das moléculas de água e, conseqüentemente, ocorre celeridade da difusividade.

A energia de ativação para o processo de secagem das folhas de Neem Indiano foi de $27,77 \text{ kJ mol}^{-1}$, apresentando-se dentro dos valores citados por Zogzas et al. (1996) para produtos agrícolas que variam entre 12,7 e 110 kJ mol^{-1} . Valores superiores foram encontrados por Barbosa et al. (2007) para cidreira-brasileira, apresentando energia de ativação de $31,79 \text{ kJ mol}^{-1}$, Goneli et al. (2014) para folhas de aroeira, com valor de $74,96 \text{ kJ mol}^{-1}$ e por Reis et al. (2012) para folhas de manjeriço, com energia de ativação de $70,79 \text{ kJ mol}^{-1}$. Nos processos de secagem, quanto menor a energia de ativação, maior será a difusividade de água no produto, dessa forma, é possível afirmar que as folhas de Neem Indiano, responderam em elevada difusividade de água durante a secagem, nas condições de temperatura de ar estudadas.

CONCLUSÕES: Com a elevação da temperatura, ocorreu um decréscimo no tempo de secagem e aumento na intensidade do fenômeno de transporte de água. A energia de ativação para o processo de secagem das folhas de Neem Indiano foi de $27,77 \text{ kJ mol}^{-1}$, se mostrando dentro do intervalo indicado para produtos agrícolas.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA, F. F.; MELO, E. C.; SANTOS, R. H. S.; ROCHA, R. P.; MARTINAZZO, A. P.; RADÜNZ, L. L.; GRACIA, L. M. N. Evaluation of mathematical models for prediction of thin layer drying of brazilian lemon-scented verbena leaves (*Lippia alba* (Mill) N.E. Brown). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.9, n.1, p.73-82, 2007.
- BOTELHO, F. M.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; MARTINS, M. A.; BAPTESTINI, F. M. Análise de hidratação do arroz na parboilização. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.30, n.1, p.713-718, 2010.
- BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes**. Brasília, 2009. 399p.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oil seeds**. Westport: The AVI Publishing Company, 1992. 450p.
- 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.
- MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; MELO, E. C.; BARBOSA, F. F. Difusividade efetiva em folhas de *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf submetidas à secagem com diferentes comprimentos de corte e temperaturas do ar. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v.9, n.1 p.68-72, 2007.
- MARTINEZ, S. S. **O Nim: Azadirachta indica - Natureza, usos múltiplos, produção**. Londrina: IAPAR, 2002. 142p.
- MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841p.
- PRATES, M. F. O.; REIS, R. C.; DEVILLA, I. A.; FARIA, R. Q.; LIMA JUNIOR, A. F. Cinética de secagem de folhas de *Solanum lycocarpum* A. St.-Hil. (fruta-de-lobo). **Revista Brasileira de Plantas mediciniais**, v.14, n.3, p.514-521, 2012.
- RADÜNZ, L. L.; MELO, E. de C.; BARBOSA, L. C. de A.; BARBOSA, F. F. Influência da temperatura do ar secagem no rendimento do óleo essencial de hortelã comum (*Mentha x villosa* Huds). **Engenharia na Agricultura**, v.14, n.4, p.250-257, 2006.
- REIS, R. C.; DEVILLA, I. A.; ASCHERI, D. P. R.; SERVULO, A. C. O.; SOUZA, A. B. M. Cinética de secagem de folhas de manjeriço (*Ocimum basilicum* L.) via infravermelho, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.12, p.1346-1352, 2012.
- SOUZA, K. A. de; 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.
- ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. **Drying Technology**, v.14, n.10, p.2225-2253, 1996.