

## ASSOCIAÇÃO DO MÉTODO DE SECAGEM CONVECTIVO COM RADIAÇÃO INFRAVERMELHA NA SECAGEM DE GRÃOS DE *MORINGA OLEIFERA*

Vânia Rosal Guimarães Nascimento<sup>1</sup>, João Domingos Biagi<sup>2</sup>, Rafael Augustus de Oliveira<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Eng. Agrícola, Doutora em Engenharia Agrícola, Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, Campinas – SP, vania\_rosal@yahoo.com.br

<sup>2</sup> Eng. Agrícola, Professor Titular, Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, Campinas - SP, (19) 3521 – 1080, biagi@feagri.unicamp.br

<sup>3</sup> Eng. Agrícola, Professor Doutor, Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, Campinas – SP.

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

**RESUMO:** A aplicação de radiação infravermelha na secagem promove maior eficiência energética, isso porque aquece diretamente o produto e atinge rapidamente altas taxas de aquecimento, reduzindo assim, o tempo de secagem. Os grãos de *Moringa oleifera* Lam, dentre suas múltiplas aplicações, destaca-se como coagulante natural no tratamento de água, devido a uma proteína catiônica de ação clarificante. O objetivo desse trabalho foi avaliar a secagem convectiva com aplicação de radiação infravermelha de grãos de *Moringa oleifera* quanto ao consumo de energia, temperatura do ar e dos grãos e remoção da turbidez de água. Utilizou-se temperatura do ar entre 30 °C e 58 °C e tempo de infravermelho de 2 min a 4,8 min, com aplicação intermitente em intervalo de 15 minutos. Realizaram-se ensaios de acordo com delineamento composto central rotacional (DCCR). Os grãos apresentavam teor de água inicial de 9,35% ± 0,08 (b.s.) e ao final de 4,53% ± 0,11 (b.s.). A partir da análise estatística dos dados, verificou-se os fatores apresentaram efeito significativo (95% de confiança). A elevação dos fatores resultou em aumento das temperaturas do ar e no interior dos grãos, reduziu o consumo de energia e a turbidez remanescente de águas.

**PALAVRAS-CHAVE:** consumo de energia, turbidez de água, teor de água

## ASSOCIATION OF CONVECTIVE DRYING METHOD WITH INFRARED RADIATION FOR DRYING OF *MORINGA OLEIFERA* GRAIN

**ABSTRACT:** The application of infrared radiation in the drying promotes greater energy efficiency, because it directly heats the product and quickly reaches high heating rates, thus reducing the drying time. *Moringa oleifera* Lam grains, which among its many applications, stand out as a natural coagulant in water treatment, due to the presence of a cationic protein with clarifier action. The aim of this study was to evaluate the convective drying with infrared radiation application of *Moringa oleifera* grains as energy consumption, air temperature, grain temperature and removal of water turbidity. The drying tests were performed with air temperatures between 30 °C and 58 °C and infrared time of 2 min to 4.8 min with intermittent application in 15 minutes interval. The experiments were carried out according to a central composite rotational design. The initial moisture content of the grains was 9.35% ± 0.08 (db) and at the end 4.53 ± 0.11% (db). Based on the statistical analysis it was found that the factors showed a significant effect (95% confidence). The increase of the factors resulted in higher temperatures of the air and within the grains, decreased energy consumption and the remaining water turbidity.

**KEYWORDS:** energy consumption, water turbidity, moisture content

**INTRODUÇÃO:** O método de secagem convectivo é amplamente difundido e empregado na secagem de produtos agrícolas, no entanto, a transferência de calor indireta para o condicionamento do ar (temperatura e umidade) reduz a eficiência energética, elevando o custo. O tempo de secagem também é prolongado devido à transferência de calor do ar para o produto ocorrer lentamente. O fornecimento de calor por meio da aplicação de radiação infravermelha em processos de secagem pode superar as características indesejáveis do método convectivo (KOCABIYIK, 2011). Isso porque essa radiação aquece diretamente o produto exposto, com poucas perdas com aquecimento do ar circundante, o que

favorece uma maior eficiência energética e, além disso, atinge rapidamente altas taxas de aquecimento, promovendo redução do tempo de secagem. A convecção de ar aquecido, por sua vez, atua removendo a umidade evaporada e substituindo o ar saturado por ar seco, com maior volume específico.

*Moringa oleifera* L. é uma planta com diversas possibilidades de uso, dentre estas, destaca-se sua aplicação como coagulante natural no tratamento de águas. A ação coagulante dos grãos é devida à presença de proteínas catiônicas solúveis em água, as quais desestabilizam e agregam microrganismos e partículas coloidais de carga superficial negativa, contidas na água. Embora seja constatada a necessidade de utilização de grãos secos para o tratamento de água (NDABIGENGESERE *et al.*, 1995), não se verificou na literatura científica recomendação das condições de secagem desses grãos. Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi avaliar a secagem convectiva com aplicação de radiação infravermelha de grãos de *Moringa oleifera* quanto ao consumo de energia, temperatura do ar e dos grãos e remoção da turbidez de água tratada com solução coagulante advinda desses grãos.

**MATERIAL E MÉTODOS:** O secador utilizado nos experimentos é composto de uma câmara cilíndrica com diâmetro de 0,50m e extensão de 1,20m, equipado com ventilador centrifugo (2,2 kW, WEG, Brasil), bateria de resistências elétricas com potência total de 1500 W e três unidades radiantes infravermelhas (modelo CQZ 10, Corel, Brasil) com potência total de 4500 W.

Planejamento experimental fatorial completo com dois fatores (2<sup>2</sup>) foi utilizado para definir as condições dos experimentos. Os fatores estudados foram: temperatura do ar de secagem (T) e tempo de aplicação da radiação infravermelha (t). Acrescentaram-se 4 pontos axiais e 3 repetições no ponto central, totalizando 11 ensaios (Tabela 1). As respostas foram: consumo de energia, temperatura do ar na câmara de secagem e no interior dos grãos e remoção da turbidez de água tratada com grãos de *Moringa oleifera*.

Durante os experimentos o acionamento da radiação infravermelha se deu de forma manual e durante o tempo definido no planejamento, após esse período desligou-se a radiação e aguardou-se completar 15 minutos para a realização de pesagem das amostras. Esse procedimento foi repetido até teor de água dos grãos em torno de 4,5% (b.u.).

O teor de água dos grãos foi determinado no início e final dos ensaios, de acordo com método-padrão da estufa a 105 ± 3°C por 24 horas (BRASIL, 2009), em triplicata de 3 g.

O monitoramento da temperatura do ar na câmara de secagem foi realizado por termopares Tipo T, enquanto a temperatura no interior dos grãos com termopares Tipo J (TFIR 005, Omega Engineering, Brasil), ambos interligados com sistema de aquisição de dados (FieldLogger, TECNAL, Brasil).

O consumo de energia elétrica das resistências de infravermelho e das resistências elétricas foi realizado por multimedidor da marca Kron, modelo Mult-K Plus, enquanto o registro dos dados de energia do ventilador foi realizado por medidor da marca ESB / Landis + Gyr, modelo SAGA 4000.

Ensaio de coagulação, floculação e sedimentação em reatores estáticos (Jar-Test) foram realizados para determinar a eficiência das soluções obtidas de grãos das operações de secagem. Utilizou-se dosagem da solução de *Moringa oleifera* L. de 10 mL L<sup>-1</sup> com concentração de 2%, recomendada por Arantes (2010) para turbidez inicial de 60 NTU. Durante o tratamento da água bruta a etapa de coagulação foi operada sob condição de gradiente médio de velocidade 400 s<sup>-1</sup> e tempo de mistura rápida de 60 segundos, enquanto que a floculação ocorreu sob gradiente médio de velocidade 40 s<sup>-1</sup> e tempo de mistura lenta de 10 minutos (ARANTES, 2010). A sedimentação consistiu de repouso por 60 minutos. A avaliação da turbidez se deu por turbidímetro (2100 NA, HACH, Brasil).

A análise estatística foi realizada através do software STATISTICA, versão 9.0. Aplicou-se o teste F com nível de significância de 95% de confiança, realizou-se Análise de Variância (ANOVA) e avaliou-se a significância dos modelos pelo coeficiente de correlação (R<sup>2</sup>).

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** O teor de água inicial dos grãos de *Moringa oleifera* L. era de 9,40% (b.u.). Ao final dos ensaios de secagem essa propriedade variou entre 4,39% e 4,76% (b.u.) (Tabela 1). Estatisticamente não houve diferença significativa entre os ensaios (Tabela 2), o que era desejado, uma vez que o objetivo era realizar as operações de secagem até alcançar teor de água de 4,5% (b.u.).

As temperaturas médias na câmara de secagem e no interior dos grãos dos ensaios de secagem são apresentadas na Tabela 1. Os resultados da análise estatística demonstraram que os efeitos lineares dos fatores e o efeito quadrático do tempo de radiação foram significativos para a resposta temperatura do ar dentro do secador (p ≤ 0,05). Considerando-se também que os efeitos foram positivos, pode-se afirmar que o aumento dos fatores acarretou elevação da temperatura do ar na câmara de secagem. Em

relação à temperatura no interior dos grãos, os termos lineares dos fatores foram significativos (95% de confiança) e com efeito positivo, ou seja, a temperatura no interior dos grãos foi aumentada proporcionalmente à elevação dos fatores (Tabela 2). As respostas temperatura do ar na câmara de secagem ( $F_{cal} = 146,04 > F_{tab} = 4,35$ ) e no interior dos grãos ( $F_{cal} = 45,70 > F_{tab} = 4,46$ ) apresentaram regressão significativa e explicaram 98,43% e 91,95% da variação dos dados ( $R^2$ ), respectivamente. Dessa forma, pode-se afirmar que os modelos (Equações 1 e 2) são válidos e preditivos do processo.

TABELA 1. Variáveis independentes: temperatura do ar de secagem (T) e tempo de aplicação da radiação infravermelha (t) e variáveis dependentes: teor de água (TA), temperatura média do ar ( $T_{ar}$ ), temperatura média dos grãos ( $T_{grão}$ ), consumo de energia (CE) e turbidez remanescente ( $T_{rem}$ ).

Ensaio	Variáveis independentes		Variáveis dependentes				
	T (°C)	t (min)	TA (% b.u.)	$T_{ar}$ (°C)	$T_{grão}$ (°C)	CE (kWh)	$T_{rem}$ (NTU)
1	-1 (34)	-1 (2,4)	4,40	42,65	56,32	4,93	5,76
2	1 (54)	-1 (2,4)	4,55	56,16	67,88	5,28	1,91
3	-1 (34)	1 (4,4)	4,65	48,63	68,82	2,55	1,36
4	1 (54)	1 (4,4)	4,54	60,89	76,19	2,70	1,51
5	-1,41 (30)	0 (3,4)	4,39	42,24	58,90	3,48	5,20
6	1,41 (58)	0 (3,4)	4,41	61,82	73,79	3,07	1,45
7	0 (44)	-1,41 (2,0)	4,76	50,27	62,59	4,54	2,49
8	0 (44)	1,41 (4,8)	4,57	55,59	73,22	2,19	1,49
9	0 (44)	0 (3,4)	4,53	51,45	70,45	3,12	1,55
10	0 (44)	0 (3,4)	4,47	49,84	64,14	3,02	1,50
11	0 (44)	0 (3,4)	4,54	50,17	67,29	3,30	1,54

Os resultados do consumo de energia elétrica apresentados na Tabela 1 correspondem à soma da demanda do ventilador, resistências elétricas e resistências radiantes de infravermelho. As resistências elétricas tiveram a maior contribuição no consumo energético, sendo responsáveis por, no mínimo 50% (ensaio 5) e no máximo 85% (ensaio 2). Isso provavelmente ocorreu devido à potência das resistências elétricas (6 kW) e ao tempo em que elas ficaram acionadas para aquecimento do ar. Os emissores da radiação infravermelha apresentaram consumo energético variando entre 0,48 kWh (ensaio 6) e 1,56 kWh (ensaio 5). Considerando a porcentagem do consumo relativa às resistências de infravermelho em cada ensaio, sua contribuição variou de 12,88% (ensaio 2) a 44,83% (ensaio 5). Observa-se, então, que mesmo sendo alta a potência dos emissores de radiação infravermelha (4,5 kW), o curto período de operação provocou menor consumo de energia que as resistências elétricas. O ventilador foi o componente do sistema que demandou menor consumo de energia em todos os ensaios. Isso porque, utilizou-se baixa intensidade da velocidade do ar ( $0,93 \text{ m s}^{-1}$ ) e, portanto, baixa potência do ventilador (aproximadamente 0,086 kW). A participação do ventilador em relação ao consumo total de cada ensaio em particular variou entre 1,73% (0,053 kWh) no ensaio 6 e 4,11% no ensaio 5 (0,143 kWh). O ensaio 8 apresentou o menor consumo de energia dentre os tratamentos. Do total de 2,19 kWh, 64,38% foi gasto com resistências elétricas, 33,79% com radiação infravermelha e 2,10% com ventilador. Dessa forma, pode-se afirmar que o ensaio 8 foi mais eficiente na secagem de grãos de *Moringa oleifera* L, indicando que a combinação dos maiores níveis da temperatura do ar e do tempo de aplicação da radiação infravermelha proporcionaram redução do tempo de secagem e do consumo de energia.

Pela Tabela 2, observa-se que o termo linear do tempo de aplicação da radiação infravermelha foi significativo ( $p \leq 0,05$ ) em relação ao consumo de energia, sendo o efeito foi negativo sobre essa resposta. Isso indica que o aumento do tempo de aplicação da radiação infravermelha na secagem de grãos de *Moringa oleifera* L. proporciona redução do consumo de energia. Pela Análise de variância (ANOVA) observou-se que o valor de F calculado foi maior que o tabelado ( $F_{cal} = 48,77 > F_{tab} = 5,12$ ). Dessa forma, pode-se inferir que as regressões são significativas. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) demonstrou que o modelo (Equação 3) explica 84,42% da variação dos dados, sendo satisfatório.

Em relação à turbidez de água tratada com solução de grãos de *Moringa oleifera* L., é possível verificar na Tabela 2, que os efeitos da temperatura do ar, do tempo de radiação e da interação entre eles foram

significativos ( $p \leq 0,05$ ). Os termos lineares desses fatores tiveram efeito negativo sobre a turbidez remanescente, indicando que um aumento nos fatores provoca redução dessa resposta, o que é desejado em sistemas de tratamento de água. Em contrapartida, o termo quadrático da temperatura do ar de secagem e da interação entre os fatores apresentaram efeito positivo sobre a turbidez. O modelo obtido para a turbidez explicou 91,94% da variação dos dados ( $R^2$ ), considerado satisfatório. Pela Análise de Variância (ANOVA) observou-se que o valor calculado de F da regressão em relação aos resíduos ( $F_{cal} = 17,11$ ) foi superior ao valor tabelado ( $F_{tab} = 4,53$ ), indicando que o modelo é válido (Equação 4).

$$\text{Temperatura do ar na câmara de secagem (}^\circ\text{C)} = 51,12 + 6,68T + 2,28t + 0,92t^2 \quad (1)$$

$$\text{Temperatura no interior do grão (}^\circ\text{C)} = 67,23 + 4,50T + 4,48t \quad (2)$$

$$\text{Energia total (kWh)} = 3,47 - 1,04t \quad (3)$$

$$\text{Turbidez (NTU)} = 1,741 - 1,124T + 0,824T^2 - 0,777t + 0,999Tt \quad (4)$$

em que,

T – temperatura do ar de secagem,  $^\circ\text{C}$

t – tempo de aplicação da radiação infravermelha, min

TABELA 2. Efeito estimado e significância estatística (p) das variáveis dependentes: teor de água, temperatura do ar dentro da câmara de secagem, temperatura no interior dos grãos, consumo de energia e turbidez remanescente.

Fator	Teor de água (% b.u.)		Temperatura do ar ( $^\circ\text{C}$ )		Temperatura do grão ( $^\circ\text{C}$ )		Consumo de energia (kWh)		Turbidez remanescente (NTU)	
	Efeito	p	Efeito	p	Efeito	p	Efeito	p	Efeito	p
Média	4,51	0,00	50,49	0,00	67,29	0,00	3,15	0,00	1,531	0,006
T(L)	0,01	0,82	13,36	0,00	10,00	0,00	-0,02	0,961	-2,247	0,003
T(Q)	-0,11	0,18	1,35	0,11	-0,86	0,67	0,40	0,359	1,780	0,016
t(L)	-0,00	0,95	4,56	0,00	8,97	0,00	-2,07	0,002	-1,554	0,014
t(Q)	0,16	0,08	2,24	0,02	0,70	0,72	0,49	0,272	0,447	0,410
T(L) x t(L)	-0,12	0,19	-0,63	0,49	-2,10	0,39	-0,10	0,842	1,998	0,020

T: temperatura do ar de secagem; t: tempo de aplicação da radiação infravermelha; (L): termo linear dos fatores; (Q): termo quadrático dos fatores; T(L) x t(L): interação entre os fatores

**CONCLUSÕES:** Conclui-se que os fatores temperatura do ar e tempo de aplicação da radiação infravermelha interferiram significativamente na elevação da temperatura do ar na câmara de secagem e dentro dos grãos de *Moringa oleifera* L. durante os ensaios de secagem. A aplicação da radiação infravermelha reduziu consideravelmente o consumo de energia. A elevação do nível de temperatura do ar de secagem provocou proporcional aumento do consumo de energia, pois demandou maior período de acionamento das resistências elétricas. A associação da radiação infravermelha ao método convectivo de secagem favoreceu a redução do tempo de secagem e do consumo de energia elétrica. A remoção da turbidez de água foi mais eficiente com grãos advindos dos ensaios com maior intensidade da temperatura do ar e do tempo de aplicação da radiação infravermelha.

**AGRADECIMENTOS:** À CAPES, FAEPEX, FEAGRI E UNICAMP.

## REFERÊNCIAS

- ARANTES, C.C. **Utilização de coagulantes naturais à base de sementes de *Moringa oleifera* e tanino como auxiliares da filtração em mantas não tecidas.** 109p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes.** Secretaria de Defesa Agropecuária, Brasília: Mapa/ACS, 2009.
- KOCABIYIK, H. Combined infrared and hot air drying. In: PAN, Z.; ATUNGULU, G. G. **Infrared Heating for Food and Agricultural Processing.** New York: CRC Press, Cap. 6, p. 101 – 116, 2011.
- NDABIGENGESERE, A.; NARASIAH, K.S.; TALBOT, B.G. Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*. **Water Research**, v.29, n.2, p.703-710, 1995.