ESTUDO DA SECAGEM DO *HUMULUS LUPULUS.*

MARIANA BIANCHI FAZOLO AYALA; VIVIANE DA SILVA LOBO; ARACELI SCALCON

RESUMO

O lúpulo tem grande importância no processo de produção de cerveja, sendo o Brasil o 3º maior produtor de cerveja no mundo, possuindo somente 0,066% de área plantada de lúpulo se comparado ao resto do mundo. Sua umidade é de 75-80% após a colheita e para ser utilizado no processo produtivo deve conter de 8-10% de umidade. Com o crescente aumento da demanda interna brasileira pelo cultivo de lúpulo *in natura* e com a importante da secagem do lúpulo para a fabricação da cerveja, torna-se necessário uma avaliação da secagem da planta. Objetivou-se assim realizar o processo de secagem da planta *Humulus lupulus* (lúpulo), obter sua curva de secagem e avaliar o modelo matemático com melhor ajuste aos dados experimentais. Foram utilizados 10 g da planta *in natura,* da variedade Comet, para a secagem em estufa de ventilação forçada, nas temperaturas de 40, 50 e 60ºC. Foram avaliados nove modelos matemáticos ajustados por regressão não-linear aos dados experimentais. Todos os modelos matemáticos apresentaram coeficiente de determinação acima de 0,99 e erro médio estimado abaixo de 0,05, com exceção do modelo de Page modificado. Os modelos de Midilli e Midilli Modificado foram os mais adequados para descrever o processo de secagem do lúpulo para todas as temperaturas estudadas, pois apresentaram alto coeficiente de determinação, com valores acima de 0,998, e baixo erro médio estimado, com valores menores que 0,02.

Palavras-chave: Lúpulo, Umidade, Desidratação, Modelagem Matemática, Cinética.

1 INTRODUÇÃO

Botanicamente, o *Humulus lupulus* (lúpulo) é uma planta perene, dioica, trepadeira, constituída de componentes voláteis e não voláteis, como o óleo essencial e os ácidos amargos (bitter acids), respectivamente (ROBERTS; WILSON, 2006; DURELLO *et al.*, 2019).

O lúpulo tem grande importância no processo de produção de cerveja, sendo que 98% da sua produção é utilizado pela indústria cervejeira (KORPELAINEN; PIETILÄINEN, 2021). A demanda brasileira de lúpulo para matéria-prima da indústria cervejeira é alta, sendo o Brasil o terceiro maior produtor de cerveja do mundo. No entanto, em 2021, o Brasil possuía somente 42 ha ou 0,066% de área plantada de lúpulo se comparado ao mundo todo (APROLÚPULO, 2021). Segundo dados extraídos da plataforma COMEXSTAT, do Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC), no ano de 2020, o Brasil importou 3.243 mil toneladas do insumo, um valor equivalente a US$ 57 milhões.

Em contrapartida, nos últimos 10 anos, o número de estabelecimentos produtores de cerveja no Brasil cresceu 12 vezes, impulsionado pelo crescimento das cervejarias artesanais (MAPA, 2020). A indústria de cerveja artesanal demanda matéria-prima *in natura*, recém colhida e/ou desidratada, uma vez que o lúpulo perde sua qualidade ao longo

DOI: 10.51189/iii-conbiotec/16442

do tempo, devido à oxidação e degradação dos seus compostos químicos (DURELLO *et al.*, 2019).

O lúpulo recém-colhido apresenta de 75-80% de umidade, dificultando a armazenagem, propiciando o desenvolvimento de micro-organismos deteriorantes (DURELLO *et al.*, 2019). Antes da sua utilização, o lúpulo é seco até 8-10% de umidade (PEACOCK *et al.*, 2018). Porém, como o lúpulo possui componentes voláteis, o processo de secagem não pode alterar suas propriedades, algo que pode acontecer caso a secagem seja realizada em temperaturas incompatíveis com a estrutura da planta. Nesse sentido, é necessário um estudo de secagem de lúpulo com técnicas aplicadas em menores escalas, para pequenos produtores rurais ou cervejarias.

O presente trabalho teve como objetivo realizar a secagem do lúpulo *in natura*, obter a Cinética de Secagem e a Modelagem Matemática.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido no laboratório do Grupo de Pesquisas de Tecnologias Químicas, localizado no prédio da Universidade Federal do Paraná campus Toledo, cedido pelo Biopark Educação. Foram utilizadas amostras *in natura* de lúpulo da variedade Comet. As amostras foram embaladas a vácuo e armazenadas em *freezer* a -20ºC. Para a secagem, as amostras eram retiradas do *freezer* permanecendo em temperatura ambiente por 10 minutos. Realizou-se a secagem do lúpulo *in natura* em estufa de secagem com circulação de ar forçada LUCADEMA modelo 82/180.

Para a obtenção das Curvas de Secagem, foram realizadas secagens nas temperaturas de 40, 50 e 60ºC. As amostras eram pesadas em intervalos a cada 10 minutos por 1 hora e 30 minutos e depois a cada 30 minutos até atingir-se o equilíbrio, isto é, quando a diferença de massas da amostra mantivesse constante em 0,001g. Foram utilizados 10 gramas de lúpulo, em triplicata, espalhados em uma camada uniforme.

O Teor de Umidade (RU) do lúpulo foi determinado através da Equação 1 e a Curva de Secagem (R) através da Equação 2:

$$RU = (M - Me)/(Mi - Me) \quad (1)$$

$$R = (M + M\Delta t)/\Delta t \quad (2)$$

Onde:

M: o teor de umidade da amostra em um dado tempo de secagem; Mi: o teor de umidade inicial da amostra; Me: o teor de umidade no equilíbrio da amostra. MΔt: o teor de umidade da amostra no tempo Δt de secagem; Δt: é a diferença no tempo de secagem.

Sendo que todos os dados de teor de umidade foram expressos em base seca.

O Teor de Umidade Inicial (Mi) foi determinado através do Método Gravimétrico recomendado pela ASAE, (2000), em estufa a 105 ± 1ºC por 24h.

Os dados de Teor de Umidade obtidos a partir do processo de secagem do lúpulo foram ajustados por meio de análise de regressão não-linear pelo método Gauss Newton. Foram avaliados nove modelos matemáticos, escolhidos por tradicionalmente predizerem o fenômeno de secagem de produtos agrícolas (CARVALHO *et al.*, 2022).

A seleção do modelo com melhor ajuste aos dados experimentais foi realizada com base no coeficiente de determinação (R^2) obtido, bem como o erro médio estimado (SE). Os dados experimentais foram analisados através da Análise de Variância (ANOVA) usando o

DOI: 10.51189/iii-conbiotec/16442

programa estatístico STATISTICA 14 utilizando nível de significância $\rho < 0,01$. O ajuste dos modelos matemáticos e regressões também foram realizados no programa STATISTICA 14. Os gráficos de curva de secagem foram criados no programa Microsoft Excel.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentados os parâmetros estatísticos usados para comparar os nove modelos matemáticos que descrevem a cinética de secagem do lúpulo. Para todas as temperaturas foram obtidos coeficientes de determinação maiores que 0,99, com exceção do modelo Page Modificado. Entretanto, em regressões não-lineares, é importante analisar outro parâmetro, no caso o erro médio estimado (SE) (CORRÊA *et al.*, 2010). De acordo com Draper e Smith (1998), a capacidade de um modelo para descrever com fidelidade determinado processo físico é inversamente proporcional ao valor do erro médio estimado (SE). Os modelos Midilli e Midilli Modificado se ajustaram satisfatoriamente aos dados de secagem com valores de R^2 acima de 0,998 e com o menor valor encontrado para o erro médio estimado (SE < 0,02).

Tabela 1 - Erro médio estimado (SE decimal) e coeficientes de determinação (R^2 decimal) para os nove modelos analisados, durante a secagem de lúpulo, em três condições de temperatura (°C).

Modelo	40°C		50°C		60°C	
	SE	R^2	SE	R^2	SE	R^2
Midilli	0,0151	0,9992	0,0108	0,9996	0,0157	0,9992
Midilli Modificado	0,0174	0,9989	0,0115	0,9995	0,0170	0,9990
Logarítmico	0,0214	0,9984	0,0221	0,9983	0,0249	0,9978
Page	0,0211	0,9983	0,0132	0,9994	0,0190	0,9986
Henderson e Pabis	0,0345	0,9955	0,0315	0,9963	0,0363	0,9950
Newton	0,0371	0,9946	0,0370	0,9947	0,0396	0,9937
Aproximação da Difusão	0,0385	0,9988	0,0216	0,9984	0,0418	0,9982
Thompson	0,0384	0,9946	0,0385	0,9947	0,0413	0,9937
Page Modificado	0,0841	0,9731	0,0741	0,9794	0,0757	0,9780

Logo, os modelos de Midilli e Midilli Modificado foram utilizados na cinética de secagem do lúpulo conforme Figura 1 e Figura 2 e são apresentados pelas Equações 03 e 04 abaixo.

$$RU = a * Exp(-k * (T^n)) + b*T \quad (3)$$

$$RU = Exp(-k * (T^n)) + b*T \quad (4)$$

Onde:

DOI: 10.51189/iii-conbiotec/16442

T: Tempo de secagem; a, b, n: coeficientes dos modelos; k: constante de secagem.

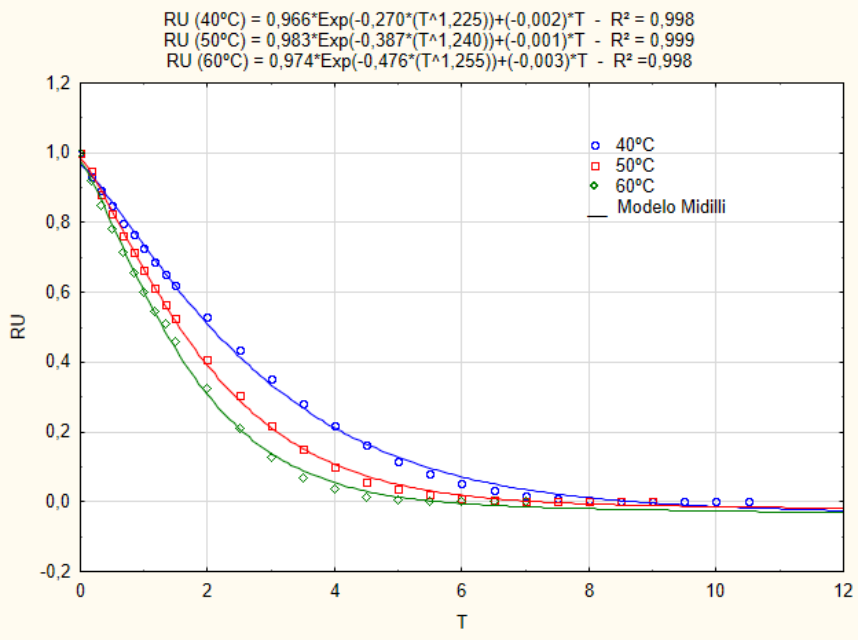

Figura 1 - Cinética de secagem do lúpulo, dados experimentais e estimados pelo modelo de Midilli, durante a secagem em três condições de temperatura.

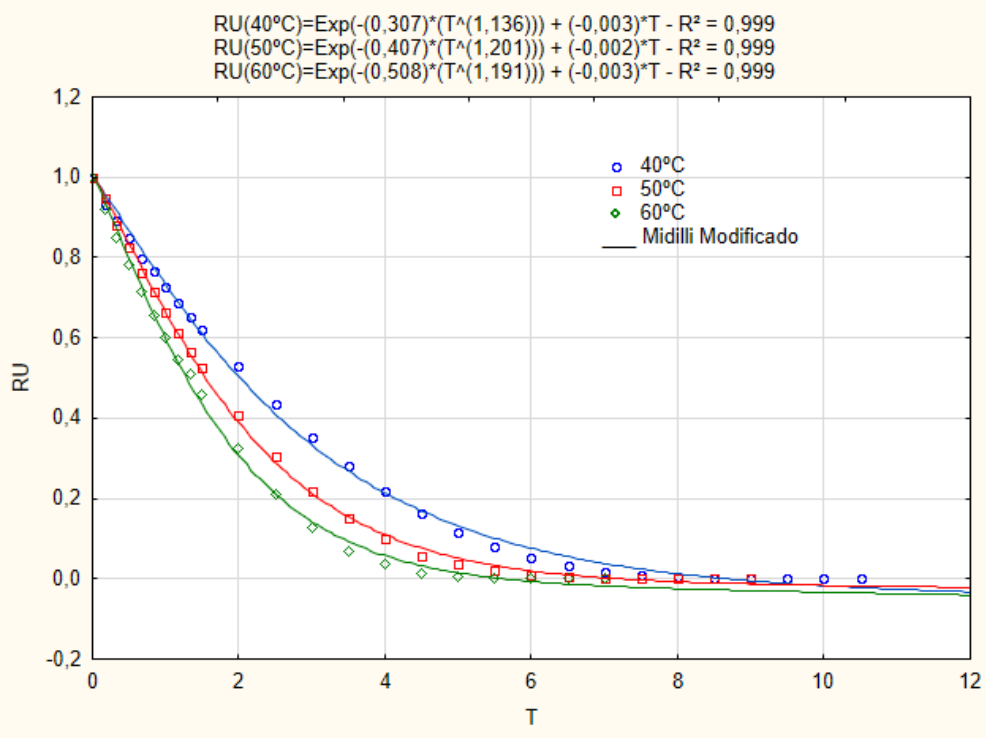

Figura 2 - Cinética de secagem do lúpulo, dados experimentais e estimados pelo modelo de Midilli Modificado, durante a secagem em três condições de temperatura.

Na Tabela 2 são apresentados os coeficientes do modelo de Midilli e Midilli modificado ajustados aos dados experimentais para as diferentes temperaturas de secagem.

DOI: 10.51189/iii-conbiotec/16442

Tabela 2 - Coeficientes e constantes dos modelos de Midilli e Midilli modificado ajustados aos dados das diferentes condições de temperatura de secagem de lúpulo.

Parâmetros	Temperatura			Temperatura		
	40ºC	50ºC	60ºC	40ºC	50ºC	60ºC
Modelo		Midilli		Midilli Modificado		
a	0,9660	0,9836	0,9742	-	-	-
b	-0,0024	-0,0015	-0,0027	-0,0032	-0,0018	-0,0034
k	0,2696	0,3874	0,4763	0,3075	0,4067	0,5079
n	1,2252	1,2396	1,2554	1,1357	1,2006	1,1907

O aumento da temperatura do ar de secagem provocou um aumento nos valores da constante k e do coeficiente n, já nos coeficientes dos modelos a e b não houve tendência para as variações de temperatura. A constante de secagem k do modelo de Midilli e Midilli modificado está relacionada à difusidade efetiva, variando de acordo com a temperatura de secagem e a quantidade de água inicial na planta (ERTEKIN e FIRAT, 2017; MUJUMDAR e DEVAHASTIN, 2000).

O modelo de Midilli também se ajustou para a secagem de folhas de aroeira-vermelha (GONELI *et al.*, 2014b); alecrim (MGHAZLI *et al.*, 2017) e timbó (MARTINS *et al.*, 2015).

Desta maneira, os modelos que apresentaram melhor ajuste aos dados experimentais de secagem do lúpulo foram Midilli e Midilli modificado.

4 CONCLUSÃO

Os modelos estudados tiveram boa aderência aos dados experimentais, sendo que somente o modelo de Page que obteve menor coeficiente de determinação (R^2). Os modelos Midilli e Midilli modificado tiveram valores de coeficiente de determinação (R^2) acima de 0,998 e erro médio estimado abaixo de 0,02. A avaliação destes dois parâmetros estatísticos mostra que ambos os modelos possuem a capacidade de descrever o processo físico da secagem. Os modelos de Midilli e Midilli Modificado foram os mais adequados para descrever o processo de secagem do lúpulo para todas as temperaturas estudadas.

REFERÊNCIAS

APROLÚPULO - Associação Brasileira de Produtores de Lúpulo. Lages, SC: 2018. Disponível online: https://www.aprolupulo.com.br/blog/levantamento-estatistico-aprolupulo-2021. Acesso em: 21 fev. 2023.

ASAE – American Society of Agricultural Engineers. Standards Engineering Practices Data: Moisture measurement-forages, ASAE S358.2 DEC99. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 2000. p.565-572.

CARVALHO et al. Kinetics and Mathematical Modeling of the drying process of Macaúba Almonds. Rev. Caatinga, Mossoró, v. 35, n. 1, p. 199 –205, jan. –mar., 2022

CORRÊA et al. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (Coffea arabica L.) durante o processo de secagem. Rev. Ceres, Viçosa, v. 57, n.5, p. 595- 601, set - out, 2010

DRAPER, N. R.; SMITH, H. Applied regression analysis. New York: Editora John Wiley & Sons, 1998, 3rd ed., p 505.

DURELLO, R. S., SILVA, L. M.; BOGUSZ JR, S. Química Do Lúpulo. Quim. Nova, v. 42, n. 8, p. 900-919, 2019. DOI 10.21577/0100-4042.20170412. Disponível em: http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170412. Acesso em: 21 mar. 2022.

ERTEKIN, C.; FIRAT, M. Z. A comprehensive review of thin-layer drying models used in agricultural products. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, v.57, p.701-717, 2017. https://doi.org/10.1080/10408398.2014.910493.

GONELI, A. L. D.; NASU, A. K.; GANCEDO, R.; ARAÚJO, W. D.; SARATH, K. L. L. Cinética de secagem de folhas de erva baleeira (Cordia verbenacea DC.). Revista Brasileira de Plantas Medicinais, v.16, p.434-443, 2014a. https://doi.org/10.1590/1983-084X/13_041

KORPELAINEN, H., PIETILÄINEN, M. Hop (Humulus Lupulus L.): Traditional and Present Use, And Future Potential. Economic Botany, v. 75, n. 3, p. 302–322, 2021.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Anuário da Cerveja 2021, Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inspecao/produtos-vegetal/publicacoes/anuario-da-cerveja-2021.pdf Acesso em: 25 fev. 2023.

MARTINS, E. A. S.; LAGE, E. Z.; GONELI, A. L. D.; HARTMANN FILHO, C. P.; LOPES, J. G. Cinética de secagem de folhas de timbó (Serjania marginata Casar). Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.19, p.238-244, 2015. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n3p238-244

MDIC - Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. COMEXSTAT - Portal do Comércio Exterior do Brasil. Disponível online: http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral. Acesso em 21 fev. 2023.

MGHAZLI, S.; OUHAMMOU M.; HIDAR, N.; LAHNINE, L.; IDLIMAM, A.; MAHROUZ, M. Drying characteristics and kinetics solar drying of Moroccan rosemary leaves. Renewable Energy, v.108, p.303-310, 2017. https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.022

MUJUMDAR, A. S.; DEVAHASTIN, S. Fundamental principles of drying. In: DEVAHASTIN, S. (ed.). Mujumdar's practical guide to industrial drying: Principles, equipment and new developments. Montreal: Exergex Corporation, 2000. Cap. 1, p.1-22.

PEACOCK, et al. A comparison of hop drying with unheated, dehumidified air versus traditional drying with heated air. MBAA TQ, v. 55, n. 3, p. 63–66, 2018. DOI 10.1094/TQ-55-3-1108-01. Disponível em: https://doi.org/10.1094/TQ-55-3-1108-01. Acesso em: 27 fev. 23.

ROBERTS, T. R.; WILSON, R. J. H. Hops, in PRIEST, F. J.; STEWART, G. G. (org.). Handbook of Brewing, Boca Raton: Editora Taylor & Francis, 2006. 2nd ed. p. 177–280.