

CINÉTICA DE SECAGEM DE CHIPS DE YACON EM SECADOR DE LEITO FLUIDIZADO

Drying kinetics of yacon chips in a dryer fluidized bed.

Tamires Ester Peixoto Bravo

Universidade Estadual de Goiás - UEG

Nathan Micakael de Bessa Cunha

Universidade Estadual de Goiás - UEG

Ivano Alessandro Devilla

Universidade Estadual de Goiás - UEG

RESUMO

O yacon é um tubérculo rico em fruto-oligossacarídeos (FOS) capaz de auxiliar no tratamento e prevenção de doenças. No entanto, devido sua sazonalidade e alta perecibilidade seu consumo é limitado. A elaboração de subprodutos como os chips é uma forma de aumentar sua vida útil. A indústria busca formas eficientes para a elaborações dos derivados, na qual se almeja a redução do teor de água em processos capazes de minimizar as perdas nutricionais durante o processamento. Sendo assim, este trabalho teve por objetivo estudar a cinética de secagem de chips de yacon em secador de leito fluidizado nas temperaturas de 30, 40, 50 e 60°C, tendo sido realizado os ajustes dos modelos matemáticos a cada temperatura. O modelo de Midilli apresentou melhor desempenho para a simulação das curvas de 30 e 40°C, com coeficiente de determinação superior a 0,99; erro relativo inferior a 10%; e erro médio abaixo de 1×10^{-4} . Nenhum dos modelos selecionados se adequaram aos parâmetros de seleção para as temperaturas de 50 e 60°C, a difusividade efetiva apresentou magnitudes entre $4,71 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ a $3,66 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Palavras-chaves: Alimentos funcionais; Cinética de secagem; *Smallanthus sonchifolius*.

ABSTRACT

Yacon is a tuber rich in fructooligosaccharides (FOS) capable of helping to treat and prevent diseases. However, due to its seasonality and high perishability, its consumption is limited. The production of by-products such as chips is a way to increase their useful life. The industry is looking for efficient ways to prepare derivatives, which aims to reduce water content in processes capable of minimizing nutritional losses during processing. Therefore, this work aimed to study the drying kinetics of yacon chips in a fluidized bed dryer at temperatures of 30, 40, 50 and 60°C, with adjustments to the mathematical models at each temperature. The Midilli model showed better performance for simulating the 30 and 40°C curves, with a coefficient of determination greater than 0.99; relative error less than 10%; and average error below 1×10^{-4} . None of the selected models suited the selection parameters for temperatures of 50 and 60°C, the effective diffusivity presented magnitudes between $4.71 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ to $3.66 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Keywords: Functional foods; Drying kinetics; *Smallanthus sonchifolius*.

INTRODUÇÃO

O Yacon, é um tubérculo nativo da Cordilheira dos Andes. O seu consumo está relacionado à promoção de benefícios à saúde e no auxílio para a prevenção de doenças (Bianchin et al., 2021). Dessa forma, é considerado um alimento com propriedades funcionais, devido a sua composição rica em compostos bioativos, em especial os fruto-oligossacarídeos (FOS), além de conter compostos fenólicos, minerais e fibras solúveis e insolúveis. Diversos estudos mostram seu potencial efeito na melhora da função intestinal, aumento na absorção de minerais, fortalecimento do sistema imune, aumento do controle dos níveis de glicemia em diabéticos, controle do colesterol entre outros (Borges et al., 2012; Gusso et al., 2015; apud Ross, 2019).

A forma mais comum de consumo do yacon é in natura, o que dificulta o aproveitamento devido à alta perecibilidade, além de sua disponibilidade sazonal. Diante disso, pesquisadores têm estudado formas para utilização no desenvolvimento de derivados.

A indústria de alimentos tem investido em tecnologias de secagem que propiciem menores tempo de processo e sejam capazes de minimizar as perdas nutricionais durante o processamento (Asquieri, 2020). Os secadores de leito fluidizado são uma alternativa de redução de tempo, pois o ar de secagem se mantém contato com toda a superfície do material o que garante uma rápida perda de água da superfície do produto para o ar (Nitz 2006).

A determinação do efeito da temperatura no produto e a obtenção de um modelo de secagem que represente satisfatoriamente os dados experimentais, são de suma importância para minimizar as alterações promovidas pelo processo de secagem (Mendonça et al., 2015).

Levando em consideração as qualidades nutricionais do tubérculo e a necessidade de eficaz processamento pós-colheita para o aumento de sua vida útil e conservação de seus nutrientes faz necessário a condução de estudos científicos sobre o tema. Assim, este trabalho teve por objetivo estudar a cinética de secagem de chips de yacon em secador de leito fluidizado, submetidos a diferentes temperaturas, com ajuste do modelo matemático que melhor prediz o fenômeno.

MATERIAL E MÉTODOS

Os tubérculos foram adquiridos no comércio local na cidade de Anápolis-GO e transportados ao Laboratório de Secagem e Armazenamento de Produtos Vegetais, no Campus Central – Henrique Santillo, da Universidade Estadual de Goiás – UEG – Anápolis/GO.

Os chips foram elaborados nas dimensões de 0,24 mm de espessura e 3 cm de diâmetro e submetidos ao tratamento de branqueamento por meio do banho térmico (ROSS, 2019). O teor de água inicial foi determinado de acordo com a norma analítica da AOAC (1995).

A secagem dos chips de Yacon foi realizada no secador de leito fluidizado desenvolvido por pesquisadores e alunos da instituição, nas

temperaturas de 30, 40, 50 e 60°C $\pm$ 1°C, com três repetições. Inicialmente foi aferida a massa das amostras em balança analítica com precisão de $\pm$ 0,001g, e durante o processo as amostras foram pesadas periodicamente até atingirem o equilíbrio higroscópico.

As curvas de secagem, nas diferentes temperaturas, foram obtidas pela conversão dos dados obtidos experimentalmente, referentes à perda de água no parâmetro adimensional razão de umidade (RU) em função do tempo de secagem em minutos. A Equação 1 foi utilizada na estimativa da RU.

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} \quad (01)$$

Em que: U – Teor de água do produto, decimal b.u.; U_i – Teor de água inicial do produto, decimal b.u.; e U_e – Teor de água de equilíbrio do produto, decimal b.u.

Os valores de RU observados, para cada temperatura do ar de secagem foram ajustados aos seis diferentes modelos matemáticos de regressão não linear, apresentados no Quadro 1.

Para o ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais de secagem foi utilizado o software STATISTICA v. 12. Já para seleção do melhor modelo foram observados os estimadores estatísticos: o coeficiente de determinação ajustado (R^2), o erro relativo (P) e o erro médio (SE), sendo P e SE estimados respectivamente pelas equações 8 e 9.

Quadro 1 - Modelos matemáticos avaliados para descrever o processo de secagem.

Modelo	Equação
Aproximação da Difusão	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k \cdot b \cdot t) \quad (02)$
Henderson & Pabis, modificada	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + c \cdot (k_1 \cdot t) \quad (03)$
Logaritimo	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c \quad (04)$
Midilli	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t \quad (05)$
Page	$RU = \exp(-k \cdot t^n) \quad (06)$
Peleg	$RU = 1 - \frac{t}{(a + b \cdot t)} \quad (07)$

Legenda: RU - razão de teor de água do produto, adimensional; t - tempo de secagem, min; k, k_0 , k_1 - constantes de secagem, min^{-1} ; a, b, c e n - coeficientes dos modelos.

Fonte: Adaptado, Barros (2018).

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y - y|}{Y} \quad (08)$$

$$Se = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - y)^2}{GLM}} \quad (09)$$

Em que: Y = valor observado experimentalmente; y = valor estimado pelo modelo; n = número de dados observados; e GLM = graus de liberdade do modelo.

O critério de seleção dos estimadores estatísticos foi o R^2 próximo de 100%, $P < 10\%$ e SE próximos de zero (Madamba et al., 1996). Os gráficos das curvas de secagem foram plotados no software Excel v.2016.

O coeficiente de difusão efetivo foi obtido por meio do ajuste do modelo matemático da difusão líquida, descrito pela Equação 10, aos dados experimentais da secagem dos chips de yacon. Esse modelo é baseado na Segunda Lei de Fick, para geometria de placa plana de acordo com o proposto por Crank (1975).

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-(2n+1)^2 \pi^2 D \frac{t}{4l^2} \right] \quad (10)$$

Em que: D - coeficiente de difusão efetivo ($m^2 s^{-1}$) l - meia espessura da amostra, (m); t - tempo de secagem (s) e n - número de termos.

RESULTADOS

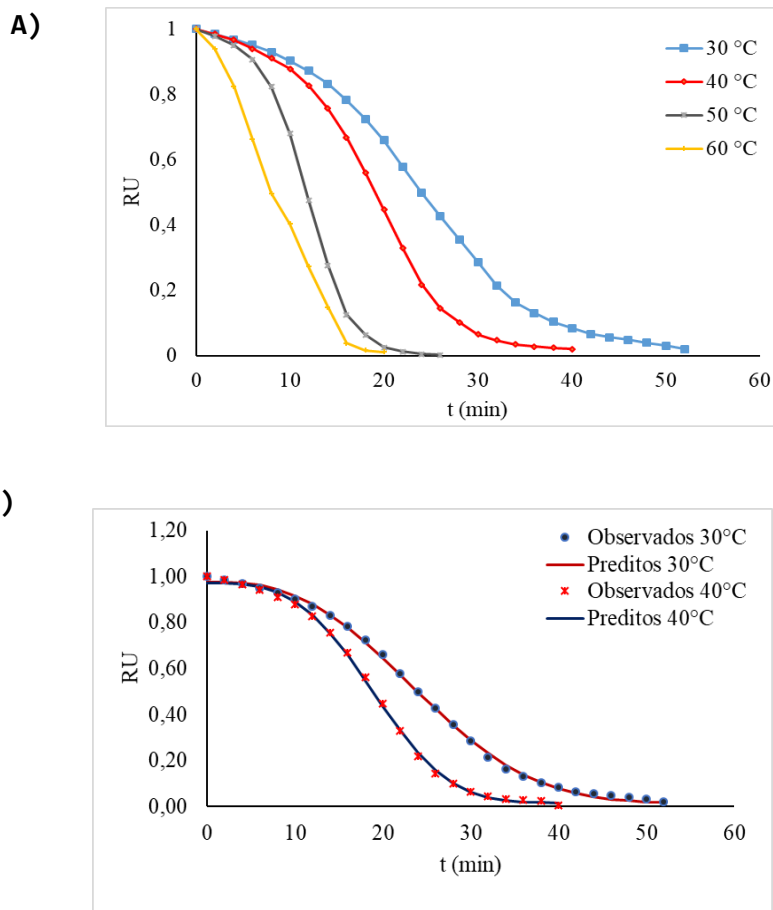
O teor de água inicial foi de $91,7 \pm 0,2\%$ b.u, reduzido até os teores de água finais de 2,86; 1,97; 2,04 e 1,37% b.u, para as temperaturas de 30, 40, 50 e 60°C.

Com variação de 20 a 52 (Figura 1 - A) minutos entre os tempos de secagem e as temperaturas estudadas, notou-se uma redução no tempo de secagem de acordo com a elevação da temperatura. Logo, a secagem realizada temperatura de 30°C se mostrou com maior tempo necessário para atingir o equilíbrio higroscópico dos chips de *Smallanthus sonchifolius*, 52 minutos. Já a temperatura de 60°C obteve a maior otimização do tempo de secagem, atingindo o equilíbrio higroscópico com 20 minutos. As temperaturas de 40°C e 50°C obtiveram respectivamente os tempos de 40 e 26 minutos.

Os modelos matemáticos que apresentaram valores para os parâmetros estatísticos segundo o critério de seleção foram: na temperatura de 30°C, os modelos matemáticos de Midilli ($R^2 = 99,92\%$; $P = 5,107$ e $SE = 0,0008$) e Page ($R^2 = 99,85\%$; $P = 9,875\%$ e $SE = 0,0032$; na temperatura de 40°C, apenas o modelo proposto por Midilli atingiu os parâmetros necessários para se adequar a cinética de secagem dos chips ($R^2 = 99,91\%$; $P = 6,609$ e $SE = 0,0009$).

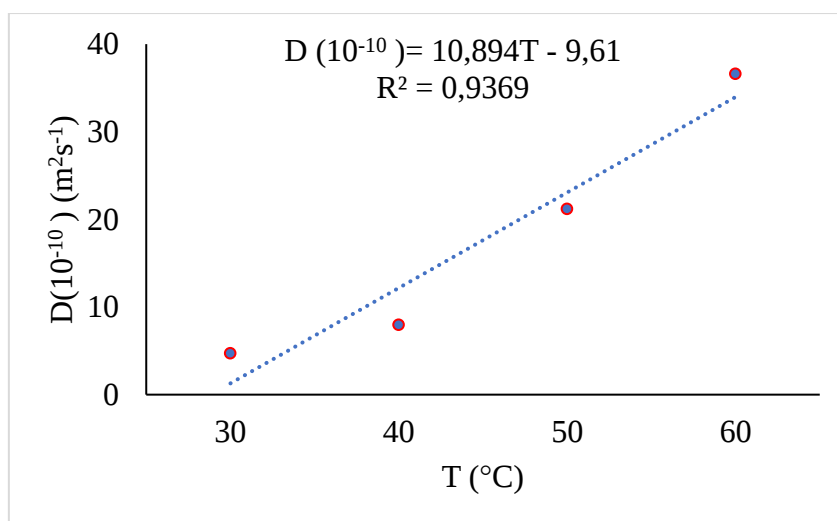
Para as temperaturas de 50 e 60°C nenhum modelo, testado neste estudo para a predição da cinética de secagem se adequou ao parâmetro de seleção Erro relativo (P), com $P > 10\%$.

Figura 1 - “A” - Curvas de secagem dos chips de yacon, em leito fluidizado nas temperaturas de 30, 40, 50 e 60°C (dados experimentais de $t \times RU$); “B” - Valores de RU experimentais e preditos pelo modelo de Midilli em função do tempo em minutos, para as temperaturas de 30 e 40°C.



Fonte: dos autores, 2024.

Figura 2 - Representação do coeficiente de difusão efetivo, em função da temperatura do ar, durante a secagem dos chips de Yacon.



Fonte: dos autores, 2024.

DISCUSSÃO

A secagem dos chips de yacon ocorreu com taxa decrescente, com maiores perdas do teor de água nos minutos iniciais do processo (Figura 1- A), indicando uma maior resistência à transferência de calor e massa do interior do produto para sua superfície em relação a superfície para o ambiente, assim se pode dizer que a difusão é o principal mecanismo de transporte de umidade, visto que o tempo de secagem é inversamente proporcional a temperatura. Esse fenômeno também foi observado por Lopes et al. (2015) ao analisar a cinética de secagem dos chips de yacon em secador de camada fixa.

O secador de leito fluidizado se mostrou bastante eficiente e otimizado, com redução de 130% em relação ao tempo de secagem, se comparado ao processo de secagem em secador de camada fixa e outros sistemas utilizados nos trabalhos de Lopes et al. (2015) e Asquieri et. al (2020).

Em relação a modelagem pode-se constatar que os modelos matemáticos Midilli e Page apresentaram elevados valores de R^2 e erros relativos (P) menores que 10%, o que segundo Madamba et al. (1996) significa um bom ajuste para representação de secagem. Para os erros médios estimados o modelo de Midilli apresentou os menores valores, sendo assim, o modelo que melhor representou a secagem para as temperaturas de 30 e 40°C (Figura 1 -B). Os coeficientes desse modelo para as temperaturas são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores das constantes e dos coeficientes do modelo de Midilli, para as temperaturas de 30 e 40°C.

Modelo Midilli	Coeficientes			
	a	b	n	k
Temperatura de 30°C	0,974575	0,000417	2,710361	0,000126
Temperatura de 40°C	0,972937	0,000267	3,161578	0,000162

Fonte: dos autores, 2024.

Nenhum dos modelos matemáticos (Quadro 1) se ajustou aos parâmetros de seleção. Uma possível causa para esse resultado é a direta relação o aumento da temperatura e tempo de secagem. O aumento da troca de calor entre o ar de secagem e o os chips proporciona a rápida perda de umidade nos primeiros minutos de secagem (Lopes, 2015), tornando necessário a redução do tempo de intervalo entre as pesagens dos chips para se obter mais dados experimentais, todavia o processo é difícil de ser implementado devido sua morosidade, por ainda ser realizado manualmente. A automação do processo de coletas de dados permitirá identificar clareza a relação de transferência de água do produto no sistema de secagem por leito fluidizado, o que torna essa tecnologia uma importante hipótese para desenvolvimento de estudos futuros.

Os valores do coeficiente de difusão da temperatura de secagem aumentaram sensivelmente, seguindo os resultados obtidos durante a secagem, apresentam magnitudes entre $4,71 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ a $3,66 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, para a faixa de 30 a 60°C (Figura 2). A variação desta propriedade promove alterações na difusão da água nos capilares dos produtos

agrícolas que, juntamente com a vibração mais intensa das moléculas de água, contribuem para uma difusão mais rápida (Melo, 2016). Portanto, pode-se dizer que houve maior difusão na temperatura 60°C.

CONCLUSÕES

A secagem dos chips de yacon em secador de leito fluidizado se mostra capaz de realizar a redução do tempo de secagem de maneira significativa em relação a outros tipos de secadores.

O modelo matemático Midille é capaz de predizer o fenômeno de se secagem em leito fluidizado dos chips, nas temperaturas de 30 e 40°C, e pode ser utilizado para automação do processo de chips de yacon.

Os valores da difusividade efetiva apresentaram um aumento de acordo com a elevação da temperatura do ar de secagem, apresentando resultados na ordem de grandeza entre $3,66 \times 10^{-11}$ a $4,71 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Por fim, observou -se também, uma alta perda no teor de umidade nos primeiros minutos de secagem proporcional a temperatura, o que dificultou a coleta de dados mais expressivos nas condições de ar mais quente. Sendo assim, nenhum dos modelos selecionados se enquadram nos parâmetros de seleção para as temperaturas de 50 e 60°C. Sendo necessário um novo estudo para automação na coleta de dados para a realização da cinética de secagem dos chips de yacon em leito fluidizado em temperaturas superiores a 50 °C.

REFERÊNCIAS

AOAC (ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS). **Official methods of analysis of A.O.A.C.** International. 16 th ed. Arlington: A.O.A.C., 1995. 949 p. ASQUIERI, E. R. et al. Secagem do extrato de yacon (*Smallanthus sonchifolius*) por spray dryer: efeito dos diferentes agentes carreadores e avaliação dos teores de frutooligossacarídeos e compostos fenólicos. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 7, p. e591974521-e591974521, 2020.

BIANCHIN, A. P. Efeito da batata yacon (*Smallanthus sonchifolia*) sobre os parâmetros glicêmicos de idosos institucionalizados. **Revista da Associação Brasileira de Nutrição-RASBRAN**, 12(1), 40-51, 2021.

LOPES, F. J. Secagem convectiva de yacon: influência do pré-tratamento osmótico e da temperatura de secagem. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 2, n. 1, p. 1693-1699, 2015.

MADAMBA, P. S.; D. R. H.; B., K. A. Thin layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, Davis, v.29, n.1, p.75-97, 1996.

MELO, J. C. S.; P. E. D.; O. K. P.; C. C. H.; F. R. M. Estudo da cinética de secagem da pimenta de cheiro em diferentes temperaturas. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 10, n. 2, p. 09-14, 2016.

MENDONÇA, T. A.; D. J. I.; N. I. L. Prospecção tecnológica da utilização da *Spirulina platensis*. **Cadernos de Prospecção**, Salvador, v. 5, n. 1, p. 44, 2015.

NITZ, M. **Fluidodinâmica secagem e recobrimento em leite pulso fluidizado**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2006.

ROSS, N. C. R. **Elaboração de chips de batata yacon (*Smallanthus sonchifolius*) com a utilização combinada de xilitol, sorbitol e maltitol como solutos da desidratação osmótica**. Tese (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimento) – Universidade Federal da Fronteira Sul, Laranjeiras do Sul, 2019.

Contato dos autores:

Autora: Tamires Ester Peixoto Bravo
E-mail: tamires.bravo@aluno.ueg.br

Autor: Nathan Micakael de Bessa Cunha
E-mail: nathanmicakaelcunha@gmail.com

Autor: Ivano Alessandro Devilla
E-mail: devilla@ueg.com.br

Manuscrito aprovado para publicação em: 10/12/2024