

CURVAS DE SECAGEM E MODELAGEM MATEMÁTICA DA SEMENTE DE ABACATE

G. FELTES¹, M. PECCIN², L. H. NASCIMENTO³, R. L. CANSIAN⁴, N. PAROUL⁵, C. STEFFENS⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Departamento de Engenharia de Alimentos

RESUMO – A liofilização é um dos métodos utilizados para secagem, e ocorre em três etapas o congelamento do produto para a formação dos cristais sólidos do líquido presente; secagem primária ocorre por sublimação do gelo formado no congelamento, esta etapa visa à remoção de aproximadamente 90 % da água; e secagem secundária que remove o restante de água ligada por evaporação a vácuo. Neste sentido, este estudo teve como objetivo avaliar a secagem por liofilização de sementes de abacate (*Persea americana* Mill.) com diferentes tamanhos de semente. Os tamanhos das sementes avaliados foram: inteiras, partidas ao meio e também quebradas em seis pedaços. A operação de secagem foi caracterizada pelas curvas de secagem. O período de taxa constante da umidade pode ser observado em cerca de 10 h para os pedaços pequenos de sementes; 12,5 h para a semente partida ao meio e de 24 h para a semente inteira. Os modelos de Overhults e de Page foram adequados para representar as curvas de secagem experimentais apresentando os maiores coeficientes de determinação (R^2). As condições ideais de secagem mostram que as sementes em pedaços obtiveram menor tempo de secagem e maiores constantes de secagem.

Palavras-chave: Modelos matemáticos; Curvas de secagem; Semente de abacate.

ABSTRACT – Freeze-drying is one of the methods used for drying, and the product is frozen in three stages to form solid crystals of the liquid present; primary drying occurs by sublimation of the ice formed during freezing, this step aims to remove approximately 90% of the water; and secondary drying which removes the remaining bound water by vacuum evaporation. In this sense, this study aimed to evaluate the drying by freeze drying of avocado seeds (*Persea americana* Mill.) with different seed sizes. The sizes of the seeds evaluated were: whole, split in half and also broken into six pieces. The drying operation was characterized by drying curves. The period of constant moisture rate can be observed to be about 10 h for the small pieces of seeds; 12,5 h for halved seed and 24 h for whole seed. The Overhults and Page models were adequate to represent the experimental drying curves presenting the highest coefficients of determination (R^2). The ideal drying conditions show that the seeds in pieces had a shorter drying time and higher drying constants.

Keywords: Mathematical models; Drying curves; Avocado seed.

1. INTRODUÇÃO

O abacate é distribuído em todo o mundo, nas regiões tropicais e subtropicais. Inúmeras variedades de abacate são encontradas pelo mundo, de acordo com o clima em que crescem, com diferentes formas, sabores, texturas, cores e aromas (ARAÚJO *et al.*, 2018). Há ainda as variedades híbridas resultantes dos cruzamentos naturais entre as diferentes espécies (NOGUEIRA-DE-ALMEIDA *et al.*, 2018). O abacate é cultivado em todas as regiões do Brasil, porém a maior parte da produção comercial está concentrada nas regiões sudeste e sul do país. Sendo os maiores estados produtores na região sudeste São Paulo e Minas Gerais correspondendo a 83,2 % da produção nacional, e na região Sul o estado do Paraná. Dentre as cultivares mais produzidas no estado de São Paulo estão a ‘Fortuna’, ‘Geada’, ‘Quintal’ e ‘Margarida’ (NASCIMENTO e GENUNCIO, 2019; PIO e MAGALHÃES, 2020).

Os produtos gerados, geralmente a partir da polpa do abacate, no processamento industrial incluem guacamole, pedaços do fruto fresco ou congelado e óleo (COWAN & WOLSTENHOLME, 2016). Assim durante o processamento há grandes quantidades de resíduos gerados, como casca e semente, subprodutos descartados como não valiosos (WANG, BOSTIC & GU, 2010). Juntos, casca e semente representam 33 % da fruta, e possuem alto potencial bioativo, podendo ser utilizados como antioxidantes, antimicrobianos, corantes, aromatizantes e agentes espessantes (AYALA-ZAVALA *et al.*, 2011; COMAN *et al.*, 2020).

O abacate possui uma única semente e é constituído por pericarpo (casca), mesocarpo (polpa) e endocarpo (semente). O principal uso potencial desse subproduto de frutas tropicais na indústria de alimentos pode ser como aditivos alimentares como antioxidantes, antimicrobianos, corantes, aromatizantes e agentes espessantes. Além disso, a utilização de subprodutos da fruta do abacate poderia levar a indústria a um agronegócio de menor desperdício, aumentando a lucratividade industrial.

Para obter sementes de abacate com maior vida útil, a operação de secagem é realizada evitando assim proliferação de micro-organismos e proporcionando uma redução significativa do peso total do produto (AVHAD e MARCHETTI, 2016). A liofilização é recomendada para a secagem de materiais contendo componentes antioxidantes sensíveis ao calor, como os tocoferóis, ácido ascórbico, carotenoides e compostos fenólicos, além disso, estende o *shelf life* de alimentos por retardar o crescimento microbiano e retardar a oxidação lipídica (SHOFIAN *et al.*, 2011). A liofilização é um dos métodos utilizados para secagem, e ocorre em três etapas: o congelamento do produto para a formação dos cristais sólidos do líquido presente; secagem primária ocorre por sublimação do gelo formado no congelamento, esta etapa visa à remoção de aproximadamente 90 % da água; e secagem secundária que remove o restante de água ligada por evaporação a vácuo. A desidratação das amostras, nesse método, retém maior valor nutricional, sabor, cor e estabelece uma estrutura porosa no produto seco (FAN, ZHANG e MUJUMDAR, 2019), além disso, os produtos liofilizados apresentam melhores propriedades de reidratação e dissolução (RAJI *et al.*, 2016)

Assim, o objetivo desse estudo foi realizar a secagem e modelagem matemática a partir de diferentes tamanhos de sementes de abacate desidratadas por liofilização.

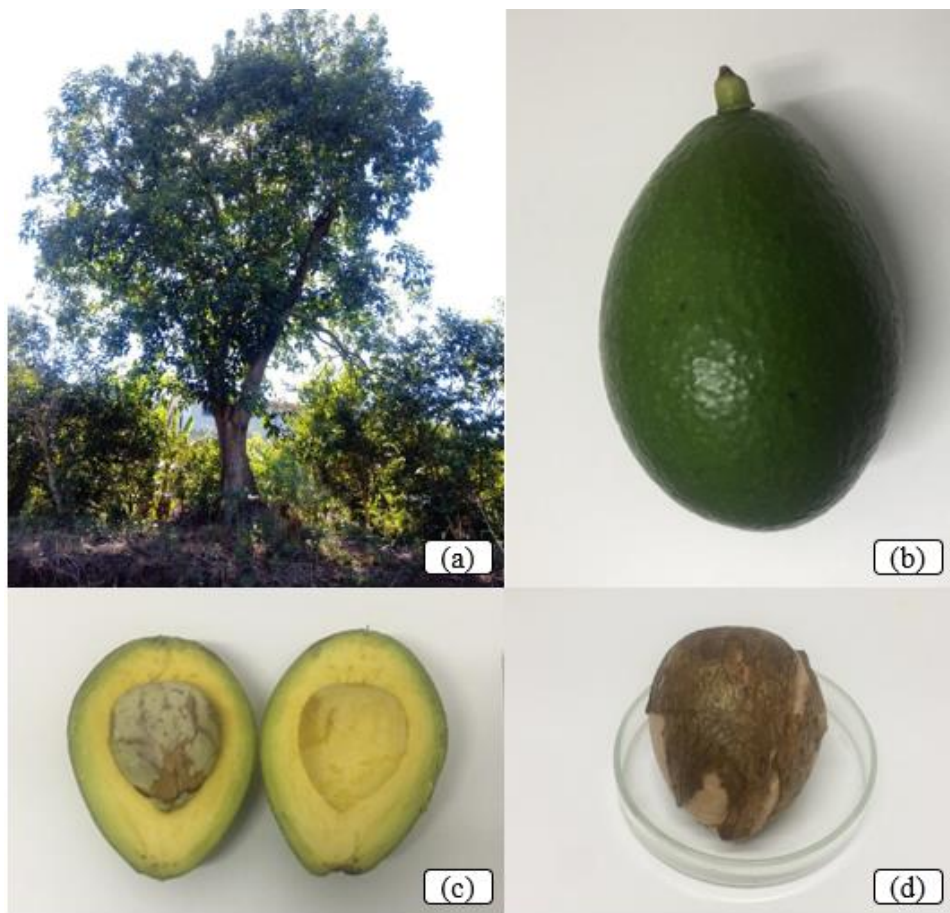
2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Obtenção da matéria prima

Os frutos de abacate (*Persea americana Mill.*) foram colhidos manualmente de uma mesma planta na região norte do Rio Grande do Sul. O período de colheita foi de junho a setembro de 2018. De acordo com a padronização, os frutos foram colhidos com um tempo de maturação desenvolvido e com aproximadamente 0,5 cm de pedúnculo. Os abacates ficaram armazenados em caixas de papelão até o término da maturação em condições ambiente (20 °C).

A Figura 1 mostra a planta ao qual o abacate foi colhido (a), o aspecto do fruto inteiro (b), o corte ao qual o fruto foi submetido para remoção da semente (c) e a semente antes do congelamento (d). Após a maturação completa as sementes de abacate foram removidas manualmente do fruto, realizada a lavagem em água corrente, e posteriormente armazenada em sacos de polietileno e submetida ao congelamento a -18 °C.

Figura 1- (a) Abacateiro; (b) Fruto inteiro; (c) Corte longitudinal do fruto; (d) Semente antes do congelamento.



Fonte: o autor.

2.2. Curva de secagem das sementes de abacate

As sementes congeladas foram divididas em três tamanhos diferentes para o processo de secagem, inteiras, partidas ao meio e também quebradas em seis pedaços para determinação do tempo e elaboração da curva de secagem, conforme ilustrado na Figura 2. Estes formatos foram escolhidos para evitar a oxidação, pois conforme o tamanho diminuía a oxidação da superfície iniciava-se.

Figura 2- Diferentes tamanhos das sementes (a) inteira; (b) partida ao meio; (c) dividida em seis pedaços.



Fonte: o autor.

O processo de secagem foi realizado em liofilizador (Terroni, LS3000M), esse método foi escolhido por preservar a cor da semente, por consequência à farinha obtida apresenta uma coloração alaranjada e o processo oxidativo é diminuído. A perda de massa das amostras foi acompanhada em intervalo de tempo de 1 h até obter peso constante e os dados foram convertidos para perda de umidade. A partir desses dados a umidade adimensional (MR) foi calculada conforme Equação 1.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (1)$$

Sendo: M_t o teor de umidade no tempo t , M_e a umidade de equilíbrio e M_i a umidade inicial da amostra.

Os dados experimentais foram ajustados para os modelos matemáticos apresentados na Tabela 1, de acordo com as Equações 2, 3, 4 e 5.

Tabela 1- Modelos matemáticos utilizados.

	Equação	Modelo	Referências
2	$MR = \exp(-k \cdot t)$	Lewis	Bruce (1985)
3	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	Henderson e Pabis	Henderson e Pabis (1961)
4	$MR = \exp(-k \cdot t^n)$	Page	Page (1949)
5	$MR = \exp[-(k \cdot t)^n]$	Overhults	Overhults (1973)

Fonte: o autor.

Sendo: MR a umidade adimensional, k (min^{-1}) a constante de secagem, t o tempo e a , n são parâmetros do modelo.

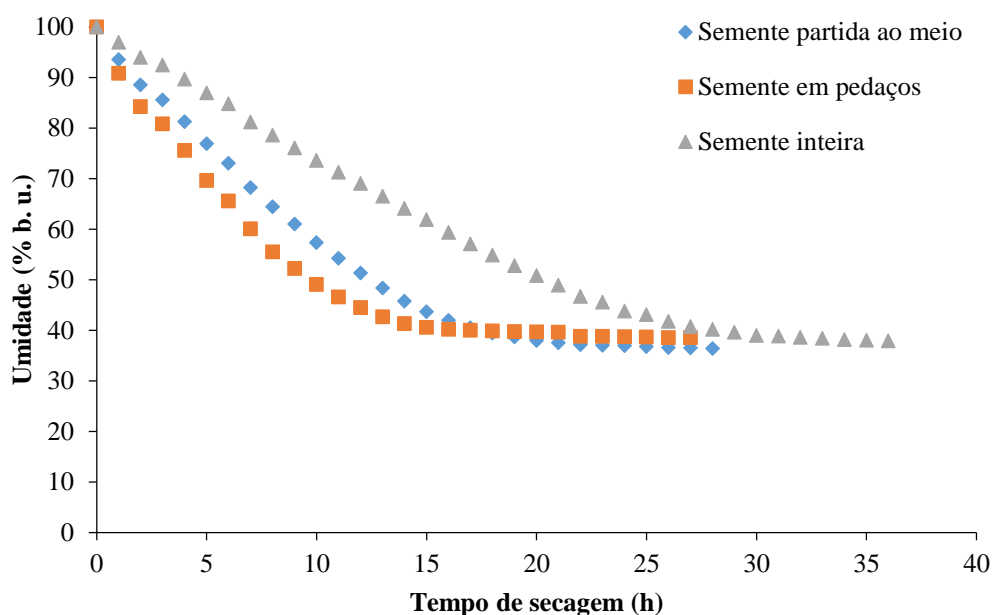
Os parâmetros de secagem foram determinados pelo ajuste dos modelos com os dados experimentais das curvas de secagem por meio de regressão não linear pelo método Quasi Newton, por meio do software Statística versão 7.0 (Statsoft, EUA) e o ajuste dos modelos foram avaliados pelo coeficiente de determinação (R^2).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Curva de secagem

O tempo necessário para reduzir o teor de água das sementes de abacate, como esperado, variou de acordo com o tamanho da amostra, como é observado pela Figura 3, assim os pedaços de sementes menores, seguida pelas partidas ao meio e inteiro obtiveram um tempo de 27, 28 e 36 h, respectivamente. O teor de umidade final ficou em aproximadamente 38 %. O período de taxa constante da umidade, quando o comportamento for linear, pode ser observado em cerca de 10 h para os pedaços pequenos de sementes; 12,5 h para a semente partida ao meio e de 24 h para a semente inteira.

Figura 3- Relação do tempo versus umidade da semente de abacate em diferentes tamanhos submetidas à secagem por liofilização.



Fonte: o autor.

A secagem da semente cortada em pedaços é mais eficiente, visto que o tempo total para finalizar o processo foi de 27 horas, a semente partida ao meio foi de 28 horas e a semente inteira 36 horas. Os tempos de secagem para as sementes inteiras foram maiores que para a semente partida ao meio e em

pedaços, obtendo um tempo de 1,33 vezes maior que os pedaços pequenos, isso se deve ao fato de que quanto maior a superfície de contato dos pedaços partidos de forma menor, maior será a transferência de massa que ocorre entre o ar e o produto. O mesmo foi observado por Avhad & Marchetti (2016) que, quando a espessura das amostras de sementes de abacate foi reduzida através do processo de pré-tratamento para promover a progressão da evaporação da umidade, o tempo de secagem necessário para reduzir a umidade das sementes de abacate fatiado e raladas foi 16 vezes menor do que a requerida para as sementes de abacate não pré-tratadas.

As curvas de secagem foram semelhantes, mas, o tempo necessário para atingir o equilíbrio foi maior nos nas sementes inteiras do abacate. Nas curvas de secagem verifica-se uma progressão da remoção de umidade que ocorre pela transferência simultânea de calor e massa entre a amostra e a atmosfera por meio da vaporização.

O método de liofilização tem como característica principal a remoção de água de um produto por sublimação do gelo. Por isso, nesta secagem da semente de abacate, a mesma deve passar primeiramente pela etapa de congelamento. A remoção da água congelada se dá por sublimação, onde a água passa do estado sólido diretamente para o estado de vapor. Para ocorrer à sublimação o material congelado é submetido a alto vácuo e aquecido por condução e/ou radiação (NIREESHA *et al.*, 2013).

A fim de se obter um modelo adequado para representar as curvas de secagem das sementes de abacate, os dados experimentais foram ajustados para quatro modelos matemáticos, Lewis, Page, Henderson e Pabis e Overhults e os resultados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2- Parâmetros cinéticos para a secagem das sementes de abacate.

Modelos	Amostras	K(min ⁻¹)	R ²
Lewis	Inteira	0,0717	97,449
	Partida ao meio	0,1193	98,469
	Pedaços	0,1625	99,121
Henderson e Pabis	Inteira	0,0796	98,165
	Partida ao meio	0,1279	98,786
	Pedaços	0,1702	99,246
Page	Inteira	0,0167	99,728
	Partida ao meio	0,0489	99,755
	Pedaços	0,0927	99,764
Overhults	Inteira	0,0681	99,728
	Partida ao meio	0,1126	99,755
	Pedaços	0,1547	99,764

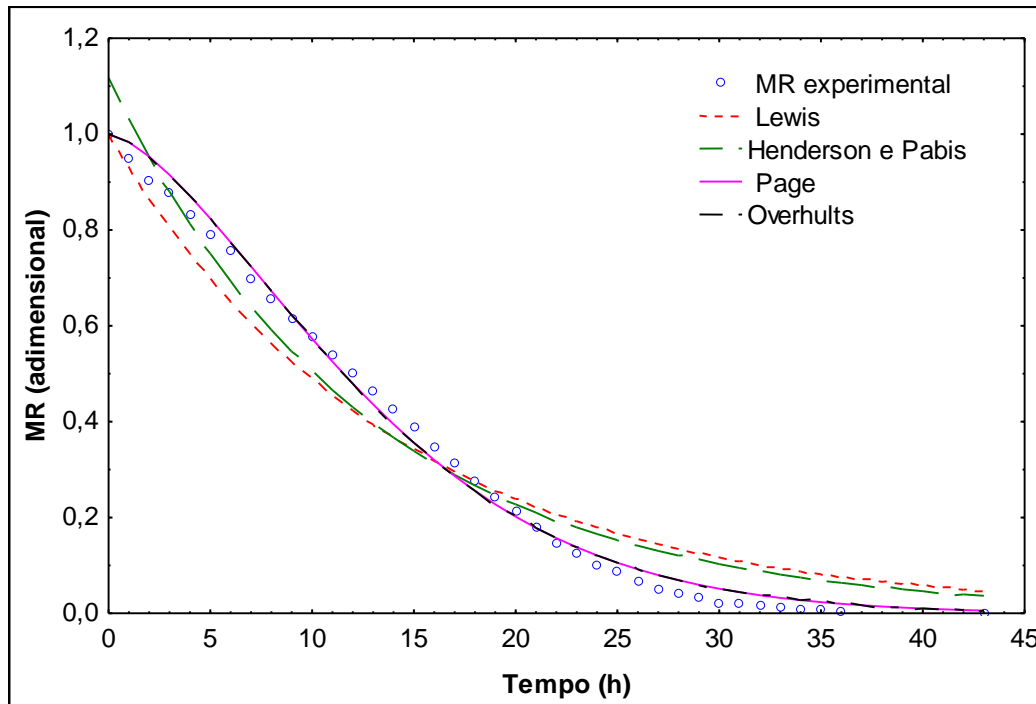
Fonte: o autor.

A partir da análise da Tabela 2 e Figura 4 (a), (b) e (c) observa-se que os quatro modelos matemáticos apresentaram um ajuste muito próximo aos dados experimentais. O modelo de Lewis apresentou ajuste mais distante dos dados experimentais, isso pode ser devido ao fato deste possuir apenas um termo para ajuste. O modelo de Henderson e Pabis apresentou ajustes satisfatórios em relação ao modelo de Lewis, obtendo valores do coeficiente de determinação (R²), acima de 0,98 para todos os

tamanhos de sementes. Os modelos de Overhults e Page foram os modelos que proporcionaram coeficiente de determinação (R^2) maiores ao comparar com os demais modelos e iguais para ambos tamanhos de sementes de abacate.

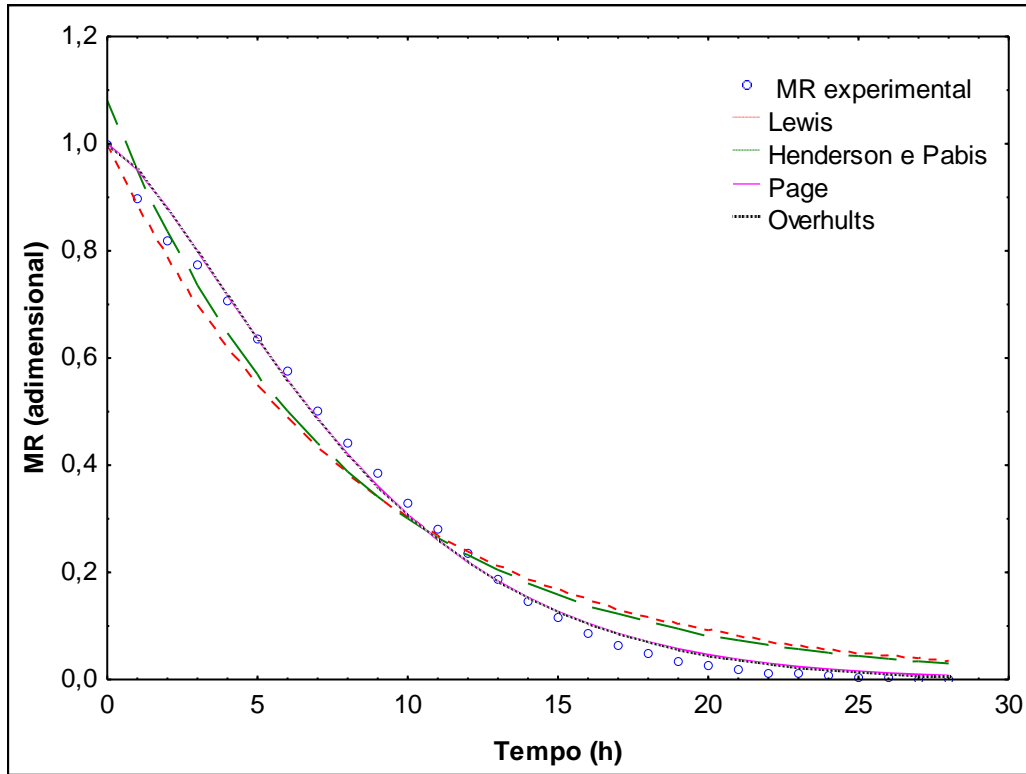
Figura 4- Ajuste aos modelos matemáticos das curvas de secagem da semente de abacate para sementes inteiras (a); sementes partidas ao meio (b) e sementes em pedaços pequenos (c).

(a)

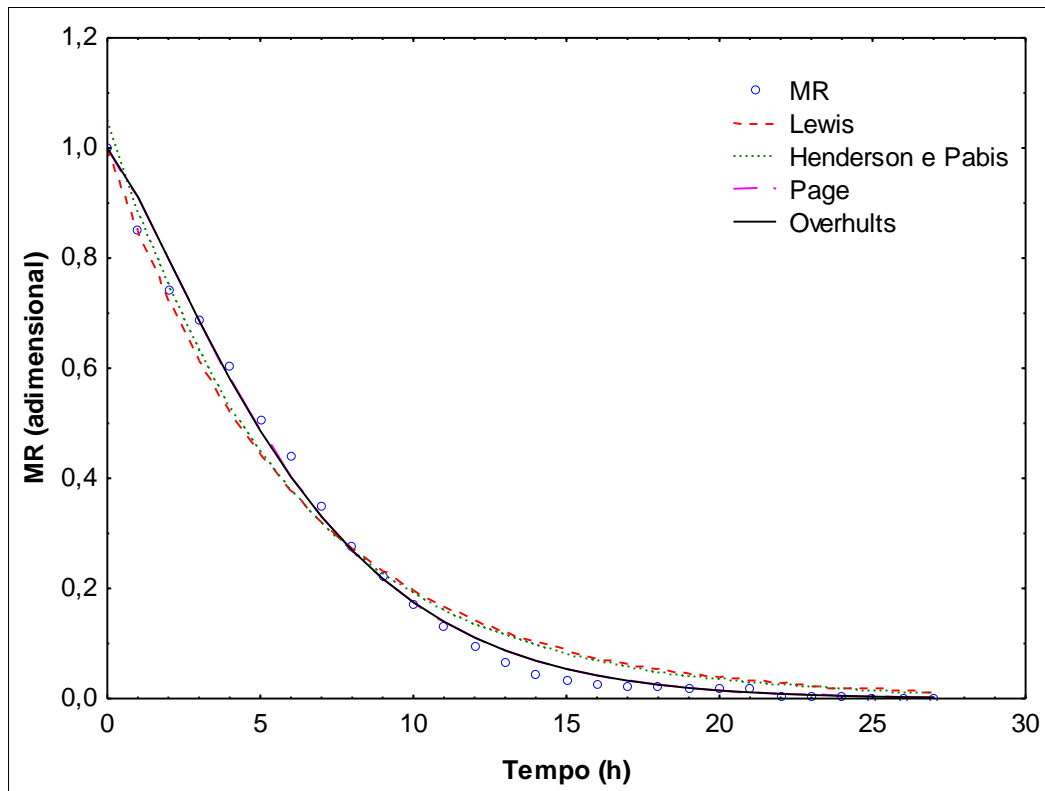


Os modelos matemáticos de Overhults e de Page apresentaram os melhores ajustes aos dados experimentais de secagem das sementes de abacate, esse fato pode estar relacionado ao número de parâmetros utilizados (k, n) quando comparado ao modelo de Lewis, que leva em consideração apenas um parâmetro (k).

(b)



(c)



4. CONCLUSÃO

O tamanho das sementes de abacate teve influência na redução do tempo de secagem, apresentando maior tempo para sementes inteiras, seguidas pelas partidas ao meio e por fim as sementes em pedaços, 36, 28 e 27 h, respectivamente.

As sementes em pedaços apresentaram os maiores valores da constante de secagem para todos os modelos matemáticos estudados. Os modelos matemáticos de Overhults e de Page apresentaram os melhores ajustes aos dados experimentais, com $R^2 > 0,997$, para as sementes inteiras, partidas ao meio e em pedaços.

5. REFERÊNCIAS

ARAÚJO, R. G.; RODRIGUEZ-JASSO, R. M.; RUIZ, H. A.; PINTADO, M. M. E.; AGUILAR, C. N. Avocado by-products: Nutritional and functional properties. **Trends in Food Science & Technology**, v. 80, p. 51-60, 2018.

AVHAD, M. R.; MARCHETTI, J. M. Mathematical modelling of the drying kinetics of Hass avocado seeds. **Industrial Crops and Products**, v. 91, p. 76-87, 2016.

AYALA-ZAVALA, J. F.; VEJA-VEGA, V.; ROSAS-DOMÍNGUEZ, C.; PALAFOX-CARLOS, H.; VILLA-RODRIGUEZ, J. A.; SIDDIQUI, Md. W.; DÁVILA-AVIÑA, J. E.; GONZÁLEZ-AGUILAR, G. A. Agro-industrial potential of exotic fruit byproducts as a source of food additives. **Food Research International**, v. 44, p. 1866–1874, 2011.

BRUCE, D. M. Exposed-layer barley drying, three models fitted to new data up to 150_C. **Journal of Agricultural Engineering**, v. 32, p. 337-347, 1985. BUSTOS, M. C.; MAZZOBRE, M. F.; BUERA, M. P. Stabilization of refrigerated avocado pulp: Effect of Allium and Brassica extracts on enzymatic browning. **LWT- Food Science and Technology**, v. 61, p. 89–97, 2015.

COMAN, V.; TELEKY, B. E.; MITREA, L.; MARTĂU, G. A.; SZABO, K.; CĂLINOIU, F.; VODNAR, D. C. Bioactive potencial of fruit and vegetable wastes. **Advances in Food and Nutrition Research**, v. 91, p. 157-225, 2020.

COWAN, A.; K.; WOLSTENHOLME, B.; N. Avocado. **Encyclopedia of Food and Health**, v. 294-300, 2016.

FAN, K.; MUJUMDAR, M. Z. A. S. Recent developments in high eficiente freeze-drying of fruits and vegetables assisted by microwave: A review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 59, p. 1357-1366, 2019.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory. II temperature effects on drying coefficients. **Journal of Agricultural**, v. 44, p. 1111-11-22, 1961.

NASCIMENTO, E. C.; GENUNCIO, G. C. Panorama nacional da produção de abacate. **Campos e Negócios**. Uberlândia, mai./2019. Disponível em: <https://revistacampoenegocios.com.br/panorama->

nacional-da-producao-de-abacate/. Acesso em: 5 nov. de 2021.

NIREESHA, G. R.; DIVYA, L.; SOWMYA, C.; VENKATESHAN, N.; NIRANJAN BABU, M.; LAVAKUMAR, V. Lyophilization/Freeze Drying – a review. **International Journal of Novel Trends in Pharmaceutical Sciences**, v.3, p. 87-98, 2013.

NOGUEIRA-DE-ALMEIDA, C. A.; UED, F. V.; ALMEIDA, C. C. J. N.; ALMEIDA, A. C. F.; CIAMPO, L. A. D.; FERRAZ, I. S.; SILVA, L. F. O.; ZAMBOM, C. R.; OLIVEIRA, A. F. Perfil nutricional e benefícios do azeite de abacate (*Persea americana*): uma revisão integrativa. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 21, p. 1-12, 2018.

OVERHULTS, D. G.; WHITE, G. M.; HAMILTON, H. E.; ROSS, I. J. Drying soybeans with heated air. **Transactions of the ASAE**, p. 112-113, 1973.

PAGE, G. E. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled com in thin layers. **Department of Mechanical Engineering**, Purdue University, 1949.

PIO, L. A. S.; MAGALHÃES, D. S. Abacate: Brasil entre os líderes mundiais de produção. **Campos e Negócios**. Uberlândia, dez./2020. Disponível em: <https://revistacampoenegocios.com.br/abacate-brasil-entre-os-lideres-mundiais-de-producao/>. Acesso em: 5 nov. de 2021.

RAJI, A. O.; AKINOSO, R.; ARUNA, T. E.; RAJI, M. O. Reconstitution potentials and moisture sorption isotherms of selected freeze dried Nigerian soups. **Journal of Food Process Engineering**, v. 40, p. 1-9, 2016.

SHOFIAN, N. M.; HAMID, A. A.; OSMAN, A.; SAARI, N.; ANWAR, F.; DEK, M. S. P.; HAIRUDDIN, M. R. Effect of freeze-drying on the antioxidant compounds and antioxidant activity of selected tropical fruits. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 12, p. 4678-4692, 2011.

WANG, W.; BOSTIC, T. R.; GU, L. Antioxidant capacities, procyanidins and pigments in avocados of different strains and cultivars. **Food Chemistry**, v. 122, p. 1193– 1198, 2010.