

## SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DOS PROCESSOS DE SECAGEM CONVECTIVA DE SEMENTES DE ABACATE (*PERSEA AMERICANA MILL*)

Emilly Dantas da Silva<sup>1</sup>, Aluizio Freire da Silva Junior<sup>2</sup>, Pedro Evanilson  
Barbosa Belmino<sup>3</sup>, Jessica Samara Costa Dantas<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Curso de Licenciatura em Química, Unidade Acadêmica de Biologia e Química, Universidade Federal de Campina Grande, Cuité-PB, Brasil.

<sup>2</sup> Prof Unidade Acadêmica de Física e Matemática, Universidade Federal de Campina Grande, Cuité, PB, Brasil.

<sup>3</sup> Curso de Licenciatura em Matemática, Unidade Acadêmica de Física e Matemática, Universidade Federal de Campina Grande, Cuité-PB, Brasil.

<sup>4</sup> Curso de Mestrado em Ciências Naturais e Biotecnologia, Programa de Pós-graduação em Ciências Naturais e Biotecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Cuité-PB, Brasil.

Email para correspondência: [emilly1480dantas@gmail.com](mailto:emilly1480dantas@gmail.com)

### Resumo

O presente trabalho foi desenvolvido para descrever a cinética de secagem de caroços de abacate (*Persea americana Mill*) por meio de modelos empíricos e difusivos. Em função disso, a secagem foi realizada numa estufa de circulação forçada de ar, operando em duas temperaturas de 60°C e 70°C, com intervalos de tempo previamente determinados. Os dados experimentais foram aplicadas no *software Lab Fit* para determinar parâmetros de ajuste e taxa de secagem através de equações empíricas. Considerando geometria esférica para as amostras, foi utilizado o *software Analitical* com solução analítica para equação de difusão e admitindo duas condições de contorno (primeiro e terceiro tipos). Como proposta para pesquisas posteriores nessa área, se realizou otimizações no *software Spherical* para solução numérica, com o intuito de analisar se este modelo matemático precisa de melhorias. Dentre os modelos empíricos estudados, o de Page apresentou os melhores valores para indicadores estatísticos, já em relação ao modelo analítico esse cenário foi observado para a condição de contorno do terceiro tipo. Mas, as melhores curvas de ajuste aos pontos experimentais foram observadas para o modelo numérico. Portanto, os resultados reforçam a importância de estudos sobre caroços de abacate, mediante aplicação da secagem e modelagem matemática.

**Palavras-chave:** caroço de abacate, secagem convectiva, modelos matemáticos difusivos.

### Abstract

The present work was developed to describe the drying kinetics of avocado pits (*Persea americana* Mill) using empirical and diffusion models. As a result, drying was carried out in a forced air circulation oven, operating at two temperatures (60°C and 70°C), with previously determined time intervals. The experimental information was applied to the Lab Fit software to determine adjustment parameters and drying rate through empirical equations. Considering spherical geometry for the samples, the Analytical software was used with an analytical solution for the diffusion equation and admitting two boundary conditions (first and third kind. As a proposal for further research in this area, optimizations were carried out in Spherical software for numerical solutions, with the aim of analyzing whether this mathematical model needs improvements. Also, among the empirical models studied, Page's presented the best values for statistical indicators, whereas in relation to the analytical model this scenario was observed for the boundary condition of the third kind. However, the best fitting curves to the experimental points were observed for the numerical model. Therefore, the results reinforce the importance of studies on avocado seeds, through the application of drying and mathematical modeling.

**Keywords:** avocado pit, convective drying, diffusive mathematical models.

## 1 Introdução

Em uma primeira análise, o abacateiro (*Persea americana*) é uma árvore da família botânica da *Lauraceae*, nativa do México e de algumas regiões da América do Sul. Inclusive é muito popular no território brasileiro, além de ser cultivado em quase todos os seus estados, devido à sua grande extensão territorial e variações climáticas que influenciam o avanço dessa cultura. O fruto do abacateiro apresenta elevada concentração lipídica e alta qualidade nutricional sendo rico, por exemplo, em ácidos graxos insaturados, fibras, vitaminas B (especialmente B5 e B6) e E, entre outros nutrientes essenciais (Dabas *et al.*, 2019). Além disso, o abacate corresponde em um ingrediente muito presente na culinária tanto de brasileiros como estrangeiros, sendo utilizado na preparação de sucos, saladas, pudim, guacamole, sorvetes, tortas, etc.

Como a maioria das frutas e produtos agrícolas (sementes), o abacate (*Persea americana* Mill) contém também um alto teor de umidade na sua composição, além de uma elevada taxa de respiração e produção de etileno pós-colheita e, conseqüentemente, essas características intrínsecas desse fruto tropical o torna um dos alimentos mais perecíveis e com prazo de validade muito limitado (Islam, Wahid e Dinh, 2018).

Esse cenário aliado ao descarte de resíduos subutilizados dessa fruta pelo homem maximiza um dos maiores desafios enfrentados no Brasil e no mundo, isto é, o desperdício de alimentos, e também justifica o emprego da secagem no processo de aproveitamento integral de partes não convencionais de alimentos

não utilizados pela indústria alimentícia, como cascas e sementes, porque, na maioria dos casos, a polpa é considerada como a principal parte de inúmeras frutas, especialmente, durante o consumo *in natura* (Nascimento *et al.*, 2016).

Diante do exposto, o presente estudo tem como objetivo a amostragem das informações experimentais obtidas com a secagem do caroço de abacate em temperaturas específicas (60°C e 70°C), que poderão ter um papel importante no desenvolvimento de produtos de boa qualidade decorrentes de resíduos de abacate e na otimização de secagens realizadas por outros pesquisadores nessa área. Além de ter a finalidade de identificar boas temperaturas que agilizem o processo de secagem, minimize os gastos da operação e no valor total da mercadoria produzida (Vilela e Artur, 2008).

Deste modo, uma descrição adequada dessa etapa faz-se necessário, pois fatores importantes relacionados ao processo de secagem, tais como energia empregada, tempo de secagem, difusividade efetiva de água, entre outros, dependem de uma modelagem matemática adequada que possibilite a análise desses fatores. Entre os modelos matemáticos mais utilizados encontram-se os difusivos, que têm sido amplamente aplicados para a descrição da secagem de diversos resíduos de frutos (Filho *et al.*, 2020), por exemplo, o caroço de abacate, que é a proposta defendida nesta pesquisa. No entanto, a maioria dos trabalhos consultados na literatura apresenta modelos simplificados para descrever esse processo (Filho *et al.*, 2020; Kara e Doymaz, 2015).

## **2 Metodologia**

### **2.1 Dados da pesquisa**

As práticas foram totalmente executadas entre os meses de novembro (22/11 a 30/11) e dezembro (06/12 a 14/12) de 2023. Os experimentos ocorreram no laboratório 07 do Bloco M, intitulado como Laboratório de Tecnologia de Alimentos (LTA), localizado no Centro de Educação e Saúde (CES) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campus Cuité-PB.

### **2.2 Aquisição das amostras**

Os abacates (*Persea americana Mill*) dos quais a matéria-prima (caroços) foi retirada, são da variedade "Margarida" (Figura 1). Ao todo foram adquiridas dezenove frutas no comércio local da cidade de Nova Floresta-PB, das quais

apenas nove sementes foram utilizadas, já que para cada experimento eram necessárias apenas três sementes. As frutas selecionadas apresentavam características semelhantes, como ausência de danos mecânicos na casca, grau de maturação, tamanho, coloração, formato e integridade fisiológica das sementes.



**Figura 1: Algumas das sementes utilizadas**

Fonte: Autoria própria, 2023.

Baseando-se em apontamentos de Beinroth (1995), a aderência do pedúnculo consiste num aspecto importante no índice de maturação do abacate: sua maior aderência caracteriza um fruto mais verde e quando esse se desprende com facilidade tem-se um abacate maduro. Das duas aderências apresentadas, a que foi empregada como critério de seleção dos abacates que foram utilizados na secagem, seria a retirada mais fácil do pedúnculo da fruta, indicando que esta estava madura.

Depois da obtenção das frutas, estas foram transportadas em sacos plásticos até o laboratório, no qual cada abacate foi colocado num prato de vidro previamente lavado para que, com o auxílio de um objeto cortante (faca higienizada), as frutas fossem divididas em duas partes e o caroço disposto em uma destas fosse retirado com o emprego de uma colher.

Logo após isso, as sementes foram colocadas em um recipiente contendo solução resultante da diluição de uma colher de hipoclorito de sódio em um litro de água. As sementes permaneceram mergulhadas nessa solução por cerca de 15 minutos que foram registrados em temporizador, em seguida, estas foram lavadas em água corrente juntamente com a ajuda de uma esponja para retirar qualquer sujeira e polpa encontrada na amostra.

Em seguida, as películas de cada semente foram retiradas, mas para facilitar essa operação essas estruturas de revestimento foram umedecidas com a ajuda de uma esponja, pois isso agilizou ainda mais o processo de remoção da película.

Por último, os caroços foram colocados em um escorredor de louça previamente higienizado por aproximadamente 10 minutos, para extrair a água contida na superfície da amostra decorrente da lavagem.

### **2.3 Caracterização do experimento e das amostras na secagem**

Após o processo de higienização das sementes, as repetições, como eram denominadas cada amostra, foram identificadas com números cardinais (1, 2 e 3) descritos em pequenas partes de fita adesiva Crepe, inclusive essas foram colocadas em um dos três cestos galvanizados utilizados na secagem. Assim, colocou-se em cada cesto de arame galvanizado de massa previamente determinada, apenas um caroço de abacate.

Em seguida, iniciou-se a secagem propriamente dita, na qual as amostras foram colocadas na prateleira de cima dentro da estufa. E a cada intervalo de tempo cronometrado eram retiradas da estufa para que sua massa e dimensões fossem determinadas, posteriormente a isso, eram novamente colocadas na estufa. O experimento se estendeu até que as amostras atingissem a massa constante. Após atingirem massa constante foram colocadas na estufa na temperatura de 105°C por 24 horas para determinação da matéria seca.

### **2.4 Equipamentos e instrumentos utilizados**

A massa das amostras foi determinada numa balança semi-analítica limpa, nivelada e zerada, da empresa italiana BEL Engineering, modelo S203 (3 casas decimais). Após a pesagem e determinação das medidas das sementes, essas seriam colocadas numa estufa com circulação de ar forçada, da marca 7lab, modelo SSDic de 150 litros e com tensão de 220V.

Já o encolhimento das sementes de abacate foi determinado em paquímetro digital com capacidade de 150 mm, modelo 100.174BL e da marca DIGIMESS. A análise ocorreu com a aferição de três marcações com formato de pontos que eram realizadas nos caroços, com o auxílio de marcador permanente na cor preta, que, por sua vez, essas permitiam identificar as seguintes medidas: altura, comprimento e largura. E antes da pesagem dos caroços para se determinar a massa seca das amostras durante as secagens, essas foram dispostas em um dessecador contendo como agente dessecante a sílica em gel, por cerca de 10 minutos.

## 2.5 Dados experimentais e modelagem matemática

Os dados experimentais obtidos para a cinética de secagem convectiva foram caracterizados na forma adimensional, por meio da equação matemática representada a seguir:

$$\bar{X}^* = \frac{\bar{X}(t) - X_{eq}}{X_i - X_{eq}} \quad (1)$$

Na Equação 1,  $X_{eq}$  corresponde ao teor de umidade de equilíbrio,  $\bar{X}(t)$  é o teor de umidade médio no tempo (s) e  $X_i$  é o teor de umidade no início do processo, isto é, no tempo de zero minutos.

Os modelos empíricos são caracterizados pela relação entre o teor de umidade médio e o tempo total de secagem. Apesar de descreverem a cinética desse processo, não indicam a distribuição de umidade no interior de produtos biológicos, como os modelos difusivos. Seis equações empíricas foram empregadas neste trabalho e estão apresentadas no Quadro 1, no qual a e b são parâmetros de ajuste, t é o tempo em minutos (s) e  $\bar{X}^*$  é o teor de umidade adimensional.

**Quadro 1: Equações empíricas**

| Modelo | Nome              | Equação empírica                | Referências              |
|--------|-------------------|---------------------------------|--------------------------|
| 1      | Lewis             | $\bar{X}^* = e^{-at}$           | Kaleta e Górnicki (2010) |
| 2      | Henderson e Pabis | $\bar{X}^* = ae^{-bt}$          | Diamante et al. (2010)   |
| 3      | Wang e Singh      | $\bar{X}^* = 1 + at + bt^2$     | Kaleta e Górnicki (2010) |
| 4      | Peleg             | $\bar{X}^* = 1 - t/(a+bt)$      | Mercali et al. (2010)    |
| 5      | Page              | $\bar{X}^* = e^{-at^b}$         | Diamante et al. (2010)   |
| 6      | Silva et al.      | $\bar{X}^* = e^{-at-b\sqrt{t}}$ | Silva et al. (2012b)     |

Fonte: Autoria própria, 2024.

Para análise dos ajustes (equações empíricas) aos dados experimentais foram utilizados dois indicadores estatísticos: o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o qui-quadrado ( $\chi^2$ ). De forma que, os valores considerados foram aqueles que apresentaram o menor  $\chi^2$  e o  $R^2$  que mais se aproximasse de 1.

Outro ponto importante corresponde à descrição da secagem das sementes utilizando-se a equação de difusão unidimensional, considerando uma geometria esférica. Em consonância com a equação citada também foram usadas duas soluções analíticas: a primeira, engloba a condição de contorno de primeiro tipo, já a segunda admite a condição de terceiro tipo. Assim, as

hipóteses descritas abaixo foram fundamentais durante aplicação de tais soluções aliadas ao estudo da cinética de secagem de caroços de abacate:

- I) O produto é homogêneo e isotrópico;
- II) A distribuição do teor de água, no início do processo, é uniforme;
- III) O único mecanismo de transporte de água dentro do produto é a difusão líquida;
- IV) O encolhimento é negligenciável;
- V) A difusividade efetiva de água e o coeficiente de transferência convectiva de massa permanecem constantes em todo o processo.

De forma que, a equação para o transporte difusivo de massa em coordenadas esféricas é dada por: (2)

$$\frac{\partial(\phi)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (Dr^2 \frac{\partial \phi}{\partial r}) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (D \sin \theta \frac{\partial \phi}{\partial \theta}) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} (D \frac{\partial \phi}{\partial \phi}) + s \phi$$

Na Equação 2, o símbolo  $\phi$  representa o teor de umidade em base seca (b.s.), D é a difusividade efetiva de massa e r consiste no raio da esfera (caroço de abacate).

Considerando a equação de difusão unidimensional em direção ao eixo r (raio) para coordenadas esféricas e que não tenha energia gerada (Lima *et al.*, 2018), a Equação 2 pode ser reescrita com o intuito de explicar a secagem de produtos:

$$\frac{\partial(\phi)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (Dr^2 \frac{\partial \phi}{\partial r}) \quad (3)$$

Tais equações mencionadas foram empregadas com o objetivo de obter os melhores resultados referentes aos parâmetros da cinética de secagem de sementes de abacate. Em relação à solução analítica foi considerado raio e difusividade constante durante otimização dos parâmetros termo-físicos no *software Analytical*.

Dessa forma, a solução analítica para condição de contorno do primeiro tipo para uma esfera de raio R é dada por:

$$\frac{\bar{X}^* - X_{eq}^*}{X_i^* - X_{eq}^*} = \frac{\infty}{n\pi^2} \sum \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \frac{\pi^2}{R^2} Dt\right) \quad (4)$$

Na Equação 4,  $\bar{X}^*$  representa o valor médio para o teor de umidade da amostra ( $X^*$ ),  $X_{eq}^*$  corresponde ao teor de umidade de equilíbrio,  $X_i^*$  é o teor de umidade inicial e D a difusividade.

Enquanto isso, a equação da solução analítica para condição de contorno do terceiro tipo está representada na Equação 5:

$$\bar{X}^*(t) = X_{eq}^* - (X_{eq}^* - \bar{X}_i^*) \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp\left(-\mu_n^2 \frac{D}{R^2} t\right) \quad (5)$$

Na equação acima,  $\bar{X}^*(t)$  corresponde ao teor de umidade médio no instante  $t$  (s),  $X_{eq}^*$  é o teor de umidade para  $t$  tendendo ao infinito ( $t \rightarrow \infty$ ) e  $\bar{X}_i^*$  equivale ao teor no tempo igual a 0 segundos,  $R$  (mm) é o raio da esfera e  $D$  ( $m^2 \cdot s^{-1}$ ) é a difusividade.

Na Equação 6, o termo  $B_n$  é obtido por:

$$B_n = \frac{6Bi^2}{\mu_n^2 (\mu_n^2 + Bi^2 - Bi)} \quad (6)$$

Já o número de Biot ( $Bi$ ) está representado abaixo, mas sua determinação é caracterizada pelos valores de  $R$  (raio), difusividade ( $D$ ) e coeficiente de transferência convectiva de massa ( $h$ ).

$$Bi = \frac{hR}{D} \quad (7)$$

## 2.6 Proposta de metodologia para estudos futuros: solução numérica

Foram considerados dois modelos diferentes para solução numérica, sendo estes aplicados no *software Spherical* e definidos no Quadro 2 a seguir.

**Quadro 2: Modelos abordadas na solução numérica**

| Modelos   | Descrição                              |
|-----------|--|
| <b>M1</b> | Raio e difusividade variáveis          |
| <b>M2</b> | Raio constante e difusividade variável |

Fonte: Autoria própria, 2024.

Os modelos M1 e M2 foram definidos por uma das 30 expressões para difusividade presentes na biblioteca do *software Spherical*, sendo esta abordada na Equação 8:

$$D(X^*) = de^{(cX^*)} \quad (8)$$

Na Equação 8, o termo  $D$  representa a difusividade efetiva de água em função do teor de umidade adimensional local presente nas sementes estudadas, já os parâmetros de ajuste são identificados pelas letras  $c$  e  $d$ .

### 3 Resultados e Discussão

A partir dos dados de secagem a 60°C e 70°C para sementes de abacate, foram obtidos os valores do teor de umidade adimensional de acordo com a Equação 1. Posteriormente, esses resultados foram empregados no *software Lab Fit* (Silva e Silva, 2009) com o objetivo de obter os parâmetros de ajuste aos dados experimentais, com base na utilização das equações empíricas apresentadas no Quadro 1.

Dessa forma, na Tabela 1 estão representados os ajustes dos dados experimentais para cada uma das equações empíricas utilizadas.

**Tabela 1: Descrição dos resultados para a cinética de secagem do caroço de abacate por modelos empíricos**

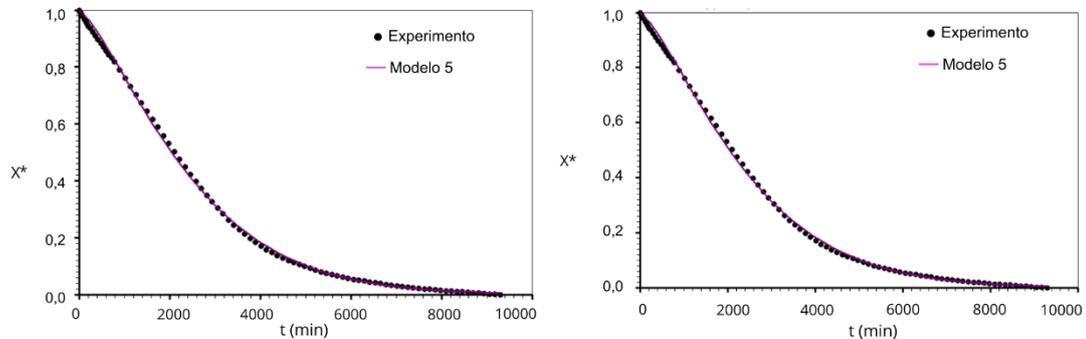
| T (°C) | Modelo | a                        | b                         | $\chi^2$                 | R <sup>2</sup> |
|--------|--------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------|
| 60     | 1      | 2,8601x10 <sup>-3</sup>  | -                         | 6,8939 x10 <sup>-2</sup> | 0.9962         |
|        | 2      | 1,0217                   | 2,9300 x10 <sup>-4</sup>  | 5,6701 x10 <sup>-2</sup> | 0.9957         |
|        | 3      | -2,2488x10 <sup>-4</sup> | 1,3710 x10 <sup>-8</sup>  | 8,2374 x10 <sup>-3</sup> | 0.9993         |
|        | 4      | 3,5036x10 <sup>3</sup>   | 6,3173 x10 <sup>-1</sup>  | 6,9610 x10 <sup>-2</sup> | 0.9947         |
|        | 5      | 7,1718x10 <sup>-5</sup>  | 1,1677                    | 1,2470 x10 <sup>-2</sup> | 0.9991         |
|        | 6      | 3,4198x10 <sup>-4</sup>  | -3,2855 x10 <sup>-4</sup> | 2,7309 x10 <sup>-2</sup> | 0.9980         |
| 70     | 1      | 3,8581x10 <sup>-4</sup>  | -                         | 1,8404 x10 <sup>-1</sup> | 0.9928         |
|        | 2      | 1,0373                   | 4,0084 x10 <sup>-4</sup>  | 1,5089 x10 <sup>-1</sup> | 0.9916         |
|        | 3      | -2,7318x10 <sup>-4</sup> | 1,8539 x10 <sup>-8</sup>  | 5,0463 x10 <sup>-2</sup> | 0.9967         |
|        | 4      | 2,5873x10 <sup>3</sup>   | 6,5914 x10 <sup>-1</sup>  | 1,7229 x10 <sup>-1</sup> | 0.9896         |
|        | 5      | 2,7090x10 <sup>-5</sup>  | 1,3317                    | 1,0093 x10 <sup>-2</sup> | 0.9995         |
|        | 6      | 5,1022x10 <sup>-4</sup>  | -6,4659 x10 <sup>-3</sup> | 6,8366 x10 <sup>-2</sup> | 0.9962         |

Fonte: Autoria própria, 2024.

Com base no coeficiente de determinação e no qui-quadrado, disponibilizados na Tabela 1, compreendeu-se que, o modelo que melhor descreveu a cinética de secagem a 60°C (R<sup>2</sup> = 0.9991 e  $\chi^2$  = 1,2470x10<sup>-2</sup>) e 70°C (R<sup>2</sup> = 0.9995 e  $\chi^2$  = 1,0093x10<sup>-2</sup>) foi o quinto modelo matemático, o de Page,

apesar de que, na menor temperatura, este modelo apresentou o segundo melhor ajuste, atrás apenas do modelo de Wang e Singh.

As Figuras 2a e 2b apresentam as curvas de ajuste do modelo matemático de Page para a secagem a 60°C e 70°C, respectivamente.



**Figura 2: Curvas de ajustes do modelo de Page para secagem do caroço de abacate: (a) secagem a 60°C; (b) secagem a 70°C**

Fonte: Autoria própria, 2023.

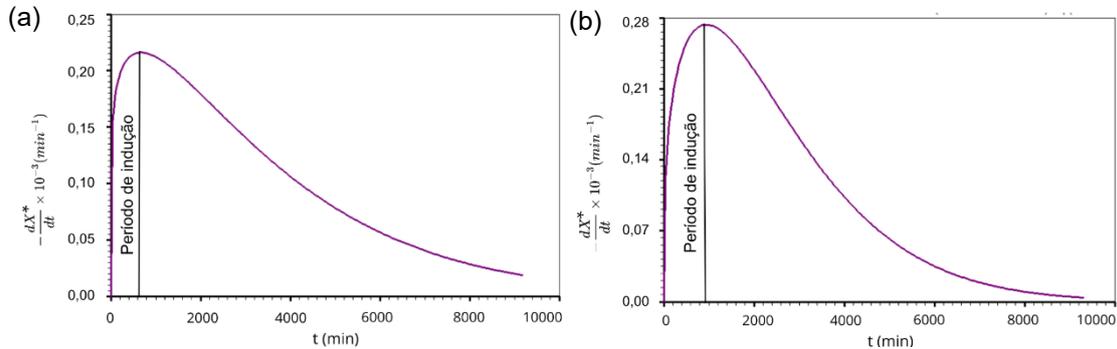
O modelo de ajuste mencionado anteriormente também foi evidente em Riguetto *et al.* (2019), que estudaram a cinética de secagem do caroço de abacate ralado nas temperaturas de 60°C, 70°C e 80°C, utilizando os modelos matemáticos de Henderson e Pabis, Midilli e Kucuk e Page. A partir dos parâmetros de ajuste, os autores identificaram que além do modelo de Page como o que melhor se ajustava aos dados experimentais, assim como neste trabalho, os modelos de Midilli e Kucuk também ganharam destaque.

Logo, apesar da matéria-prima ser o caroço de abacate em ambas as situações, contudo na pesquisa de Riguetto *et al.* (2019) esse produto foi ralado, então, a abordagem foi diferente da relatada nesta pesquisa, mas a equação que representou o melhor ajuste foi a mesma nos dois casos. E outro ponto importante é que, este trabalho utilizou uma variedade específica de abacate, que talvez pode ser ou não a mesma utilizada por Riguetto *et al.* (2019), já que os autores não especificaram o tipo de abacate empregado.

A partir da identificação do modelo que melhor descreveu a cinética de secagem do produto biológico estudado por meio do *software Lab Fit*, como foi evidenciado na Figura 2, seguiu-se com a determinação da taxa de secagem através da derivada do modelo de Page representada na Equação 9 abaixo:

$$\frac{d\bar{X}^*}{dt} = -abt^{(b-1)}e^{-at^b} \quad (9)$$

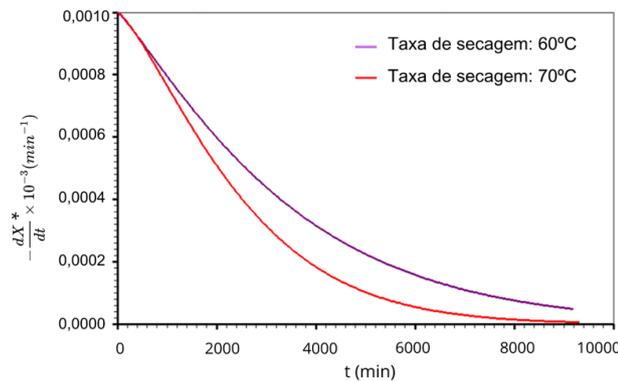
Dessa forma, a Figura 3 mostra as taxas de secagem obtidas separadamente para as duas temperaturas estudadas em relação ao modelo de Page.



**Figura 3: Curvas da taxa de secagem das amostras obtidas através do modelo de Page: (a) 60°C; (b) 70°C**

Fonte: Autoria própria, 2023.

Na Figura 4 essas taxas estão representadas em um mesmo gráfico também obtido pela derivada do modelo de Page, como as apresentadas na Figura 3.



**Figura 4: Taxas de secagem do caroço de abacate para 60°C e 70°C**

Fonte: Autoria própria, 2023.

Ao analisar os gráficos da taxa de secagem da Figura 3, notou-se que essas apresentaram um período inicial crescente nas duas temperaturas, representado por uma adequação das amostras às condições do processo de secagem, isto é, um período de indução. Em seguida, observou-se um período de taxa decrescente, o qual se manteve até que os caroços de abacate atingissem a umidade de equilíbrio. Contudo, na Figura 4 o período de indução não está muito evidente como na Figura 3, evidenciando apenas um período de taxa decrescente para ambas as temperaturas, já que o período observado foi

maior em comparação com o trabalho de Lima *et al.* (2022) sobre a secagem de cascas de maracujá.

Além disso, nos gráficos apresentados na Figura 3, o aumento da taxa crescente foi observado de forma acentuada na maior temperatura (70°C). O *software xyExtract* (Silva, 2022) foi empregado para determinar o intervalo de tempo em que iniciou o período de taxa decrescente, sendo este definido pelo valor máximo da taxa crescente. Esses dados estão representados na Tabela 2.

**Tabela 2: Valores equivalentes para o início da taxa decrescente**

| T (°C) | Início da taxa decrescente (min) | Valor máximo da taxa de secagem $\frac{dX^*}{dt}$ (min <sup>-1</sup> ) |
|--------|----------------------------------|--|
| 60     | 676                              | 2,17x10 <sup>-4</sup>  |
| 70     | 944                              | 2,73x10 <sup>-4</sup>  |

Fonte: Autoria própria, 2024.

Com base na Tabela 2, nota-se a influência significativa da temperatura no início da taxa decrescente e no seu valor máximo. Sendo assim, ganha destaque a temperatura de 70°C, pois as amostras apresentaram a maior taxa de evaporação do que a taxa de transporte interno de umidade.

Além disso, a Tabela 3 também apresenta a atuação significativa da temperatura, repercutindo no teor de umidade inicial em base seca ( $\bar{X}_i$  (b.s.)), do teor de umidade de equilíbrio em base seca ( $\bar{X}_{eq}$  (b.s.)), do diâmetro médio em milímetros tanto no início ( $D_0$ ) (0 minutos) como no final da secagem ( $D_f$ ) e do raio médio em milímetros do início do processo ( $R_0$ ) e no final ( $R_f$ ), assim como o tempo total do processo (t).

Nota-se que, o aumento da temperatura também influenciou os dados apresentados na Tabela 3, já que apesar das amostras submetidas a 70°C apresentarem um diâmetro e um raio maior do que as de 60°C, mas foram as que mostraram um encolhimento mais evidente. Desta forma, as sementes submetidas a 60°C encolheram aproximadamente 21%, enquanto a 70°C o encolhimento correspondeu a cerca de 29%, indicando a influência da temperatura na perda de umidade das amostras ao longo do tempo. Esses valores evidenciam que o encolhimento consiste em algo significativo para o

processo de secagem, indicando a importância de pesquisas posteriores que incorporem esse fenômeno à modelagem matemática.

**Tabela 3: Teor de umidade inicial e final, encolhimento das amostras e tempo total do processo**

| Temperatura (°C) | $\bar{X}_i$ (b.s) | $\bar{X}_{eq}$ (b.s.) | $D_0$ (mm) | $D_f$ (mm) | $R_0$ (mm) | $R_f$ (mm) | t (min) |
|------------------|-------------------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|---------|
| 60               | 1,104             | 0,072                 | 48,13      | 37,75      | 24,06      | 18,91      | 9180    |
| 70               | 1,239             | 0,047                 | 50,85      | 35,89      | 25,43      | 18,05      | 9300    |

Fonte: Autoria própria, 2024.

Inclusive essa observação também é perceptível quanto ao teor de umidade em base seca, porém o período de estabilização dessa foi maior para a temperatura de 70°C, a qual foi caracterizada por repetições com maiores valores de massa e dimensões.

Por sua vez, outra solução estudada nesta pesquisa seria a solução analítica para se obter o valor da difusividade (D), assim como indicadores estatísticos (qui-quadrado e coeficiente de determinação) e coeficiente convectivo (h), sendo estes obtidos a partir do *software Analitical*. Mas, este *software* não forneceu o número de Biot, logo este foi calculado utilizando a Equação 7 e empregando os valores obtidos no *software* mencionado.

Contudo, o *software* admitiu as duas condições de contorno trabalhadas nesta pesquisa e tais informações estão presentes na Tabela 4, considerando os dados dos experimentos contendo ou não o período de indução, respectivamente representados por CI e SI.

Com base nas informações contidas na tabela acima, observou-se que, a ausência ou presença do período de indução provocou um impacto significativo nos resultados obtidos. Os valores dos indicadores estatísticos,  $R^2$  e  $\chi^2$ , foram muito próximos entre si para os dados com período de indução que caracterizaram condição de contorno do primeiro tipo em ambas as temperaturas e, por sua vez, este cenário é diferente do contido na Tabela 1 caracterizada por modelo empírico.

**Tabela 4: Influência do período de indução em parâmetros e indicadores estatísticos obtidos nos processos de otimização das amostras a 60°C e 70°C**

| Condição de contorno | R  | T (°C) | D                       | h                      | Bi    | R <sup>2</sup> | χ <sup>2</sup>         |
|----------------------|----|--------|-------------------------|------------------------|-------|----------------|------------------------|
| 1º tipo              | Cl | 60     | 3,844×10 <sup>-10</sup> | -                      | -     | 0,922          | 0,307                  |
|                      |    | 70     | 4,295×10 <sup>-10</sup> | -                      | -     | 0,922          | 0,307                  |
|                      | Sl | 60     | 2,666×10 <sup>-10</sup> | -                      | -     | 0,882          | 0,507                  |
|                      |    | 70     | 3,452×10 <sup>-10</sup> | -                      | -     | 0,922          | 0,307                  |
| 3º tipo              | Cl | 60     | 1,169×10 <sup>-9</sup>  | 6,566×10 <sup>-8</sup> | 1,352 | 0,979          | 0,115                  |
|                      |    | 70     | 1,755×10 <sup>-9</sup>  | 8,953×10 <sup>-8</sup> | 1,297 | 0,992          | 4,117×10 <sup>-2</sup> |
|                      | Sl | 60     | 1,063×10 <sup>-9</sup>  | 6,252×10 <sup>-8</sup> | 1,348 | 0,979          | 1,152×10 <sup>-1</sup> |
|                      |    | 70     | 1,421×10 <sup>-9</sup>  | 8,009×10 <sup>-8</sup> | 1,285 | 0,992          | 4,117×10 <sup>-2</sup> |

Fonte: Autoria própria, 2024.

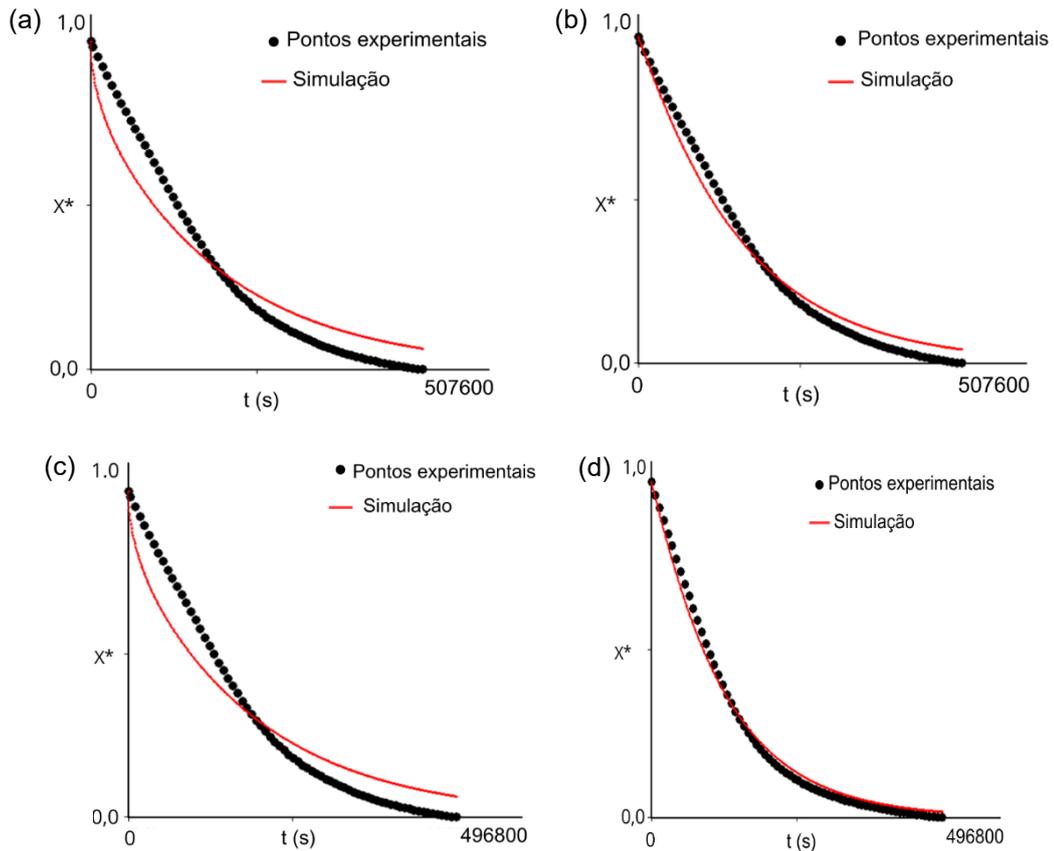
Também cabe salientar que, a partir das otimizações desenvolvidas no *software Analytical*, a condição de contorno do terceiro tipo ganhou destaque, apresentando os melhores valores para qui-quadrado e coeficiente de determinação para dados sem e com período de indução, principalmente, os que foram decorrentes da temperatura de 70°C.

Verificou-se que o aumento de temperatura gerou valores crescentes de D para as duas condições de contorno, observação esta mencionada por outros pesquisadores (Lima *et al.*, 2022; Medeiros, 2021). Este cenário também ocorre com os valores de coeficiente de transferência convectiva de massa (h), assim esses dois parâmetros aumentam em função do aumento da temperatura trabalhada na secagem.

Na condição de contorno do terceiro tipo, os valores assumidos por h foram maiores do que a difusividade, indicando que a resistência externa para a saída de água (D) é menor do que a resistência interna do produto (h), o que fisicamente tem sentido. E o emprego de dados experimentais com ou sem o

período de indução no *software Analitical*, gerou números de Biot maior para a temperatura de 60°C e, por sua vez, esta observação também foi notada na secagem de sementes de melão realizada por Medeiros (2021).

Como também, a partir dos dados presentes na Tabela 4, o *software Analitical* gerou gráficos de ajustes abordando a solução analítica para a equação de difusão, considerando as duas condições de contorno utilizadas na pesquisa, que, por sua vez, são expostas na Figura 5.



**Figura 5: Gráficos que contém otimizações de modelo difusivo para geometrias esféricas, aplicadas aos dados experimentais sem taxa crescente para condições de contorno específicas: (a) 60°C (primeiro tipo); (b) 60°C (terceiro tipo); (c) 70°C (primeiro tipo); (d) 70°C (terceiro tipo)**

Fonte: Autoria própria, 2024.

Na Figura 5, percebe-se que as otimizações desenvolvidas no *software* para condição do primeiro tipo não geraram curvas que se ajustaram aos pontos experimentais decorrentes de secagem a 60°C, diferentemente do observado para condição do terceiro tipo. É possível observar que uma coerência melhor entre os dados e os ajustes foram obtidos para condição de contorno do terceiro tipo, caracterizada por secagem a 70°C. Logo, ainda é visível uma discrepância

entre a simulação e os dados que caracterizaram a cinética de secagem em ambas as temperaturas em relação aos ajustes da condição de contorno do primeiro tipo.

A partir do que foi relatado no decorrer deste trabalho, nota-se que a descrição da cinética de secagem se baseou na aplicação de soluções empíricas e analíticas. Mas, como proposta para estudos posteriores foi utilizada a solução numérica para equação de difusão, de acordo com modelos (M) retratados na metodologia, M1 e M2. Tal solução considerou tanto o raio variável (M1) como constante (M2).

A Tabela 5 retrata os valores obtidos por meio de solução numérica para a temperatura de 70°C durante otimização em *software Spherical* (Silva, 2024), sendo considerado malhas com 1000 volumes de controle e 500 steps de tempo.

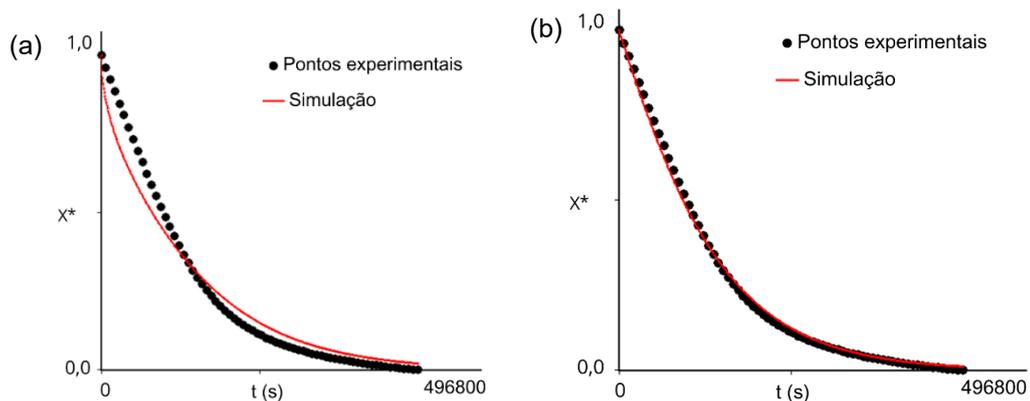
**Tabela 5: Otimização para solução numérica à 70°C, com raio variável e dados sem período de indução**

| Condição de contorno | M  | d                       | h                      | c                       | R <sup>2</sup> | χ <sup>2</sup>         |
|----------------------|----|-------------------------|------------------------|-------------------------|----------------|------------------------|
| 1º tipo              | M1 | 2,857×10 <sup>-10</sup> | -                      | 1,313×10 <sup>-10</sup> | 0,949          | 2,128×10 <sup>-1</sup> |
|                      | M2 | 3,451×10 <sup>-10</sup> | -                      | 1,587×10 <sup>-10</sup> | 0,922          | 0,307                  |
| 3º tipo              | M1 | 1,117×10 <sup>-9</sup>  | 7,613×10 <sup>-8</sup> | 9,570×10 <sup>-10</sup> | 0,997          | 1,523×10 <sup>-2</sup> |
|                      | M2 | 1,428×10 <sup>-9</sup>  | 7,996×10 <sup>-8</sup> | 1,093×10 <sup>-9</sup>  | 0,992          | 4,118×10 <sup>-2</sup> |

Fonte: Autoria própria, 2024.

Comparando os dados do modelo M2 apresentados nas Tabela 4 com os resultados contidos na Tabela 5, se percebe que os valores de R<sup>2</sup> e χ<sup>2</sup> para a condição de contorno do primeiro tipo foram iguais, apesar das soluções serem diferentes. Mas, a diferença é nítida entre a solução analítica e numérica, tomando como comparação o modelo M1 para a condição de contorno do terceiro tipo, que apresentou os melhores valores para os indicadores estatísticos estudados nesta pesquisa.

A Figura 6 retrata os gráficos obtidos pelo modelo M1 para processo de secagem de sementes de abacate a 70°C, abordando as condições de contorno do primeiro e terceiro tipos.



**Figura 6: Gráficos de ajuste para modelo M1: (a) condição de contorno do primeiro tipo; (b) condição de contorno do terceiro tipo**

Fonte: Autoria própria, 2024.

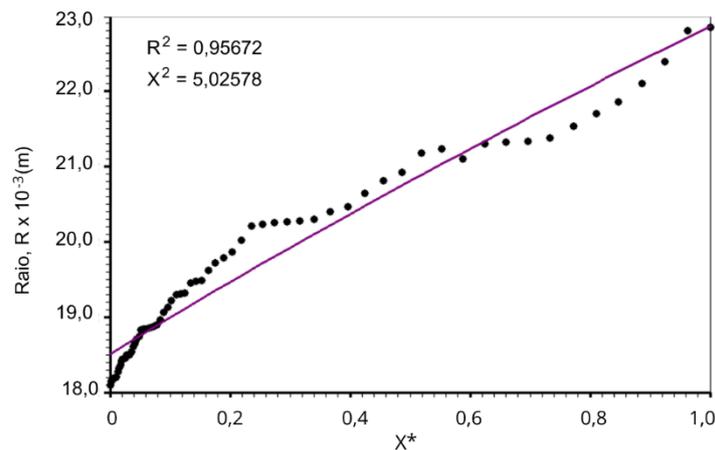
Por meio dos gráficos descritos acima sobre a cinética de secagem das amostras para maior temperatura estudada, se pode observar que as curvas se ajustaram bem aos dados experimentais, com destaque para a condição de contorno do terceiro tipo assim como foi notado na solução analítica presente na Figura 5.

Além disso, o encolhimento dos caroços de abacate em função da perda de umidade destas geraram funções no *software Lab Fit*. Apenas uma destas caracterizava o raio variável das amostras submetidas à 70°C (Equação 10) e que também foi empregada no *software Spherical* para determinar os parâmetros e indicadores presentes na Tabela 5.

$$R = \sqrt{a - (x - b)^2} \quad (10)$$

Na Equação 10, os indicadores estatísticos  $a$  e  $b$  foram dados pelo *software Lab Fit*, correspondendo respectivamente em,  $0,853 \times 10^4$  e  $0,905 \times 10^2$ . Já a Figura 7 contém o gráfico de ajuste desta equação, pois foi a que melhor descreveu o encolhimento das sementes expostas a maior temperatura trabalhada.

O gráfico da Figura 7 mostra o encolhimento das sementes submetidas a 70°C, em virtude da retirada de água destas por meio do processo de secagem. Assim, quanto maior for a temperatura trabalhada mais evidente seria a influência desta no encolhimento das amostras. Como também, nota-se que a representação gráfica acima é definida por uma reta pois as grandezas consideradas, como a variação do teor de umidade e o raio médio são diretamente proporcionais, por isso a relação entre elas é linear.



**Figura 7: Encolhimento dos caroços de abacate a 70°C**

Fonte: Autoria própria, 2024.

#### 4 Conclusão

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa, pode-se concluir que, a temperatura não teve influência no tempo total da secagem, mas sim no encolhimento das amostras. Logo, a secagem de sementes de abacate da variedade Margarida à 70°C encolheram aproximadamente 29%, valor este maior do que o apresentado a 60°C (21%). Este cenário reflete uma relação significativa entre a temperatura e o encolhimento do produto biológico estudado.

Em relação a modelagem matemática, o modelo empírico de Page foi considerado o melhor modelo para as duas temperaturas trabalhadas, já que apresentou os melhores valores para o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ). Mas este também gerou gráficos que mostraram os melhores ajustes das curvas da cinética de secagem aos dados experimentais, principalmente, para a temperatura de 70°C.

A descrição da cinética de secagem através de soluções analíticas para equação de difusão utilizou duas condições de contorno, do primeiro e terceiro tipo. De forma que, esta última condição obteve os melhores resultados para  $R^2$  e  $\chi^2$ , considerando dados sem período de indução. E esta condição também gerou as melhores curvas que se ajustaram aos pontos experimentais.

Além disso, os dados sem período de indução da secagem à 70°C descritos pela solução analítica para condições de contorno do terceiro tipo geraram valores para difusividade (D) e coeficiente convectivo (h) e estes apresentaram sentido do ponto de vista físico.

Outro ponto importante que foi debatido neste trabalho, corresponde ao estudo da solução numérica aplicada aos dados da maior temperatura, que, por sua vez, esta apresentou os melhores ajustes aos pontos experimentais do que os outros modelos trabalhados. Mas também, esta gerou valores para coeficiente de determinação e qui-quadrado aproximados e, em alguns casos, iguais aos resultados apresentados para a solução analítica aos dados sem período de indução para ambas as condições de contorno estudadas.

Portanto, pode-se concluir que, é extremamente importante o desenvolvimento de pesquisas futuras em relação a secagem do caroço de abacate quanto às diversas variedades desse fruto existentes no país, como também, na modelagem matemática. Tal indicação surge com o intuito norteador de minimizar os gastos de operação e contribuir com o aproveitamento integral do abacate, por meio da produção de alimentos valorizados no mercado.

## 5 Referências

- BEINROTH, E. W. *et al.* **Abacate para exportação: procedimento de colheita e pós-colheita.** Brasília: EMBRAPA, p. 10-11, 1995. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/183127/1/Frupex-Abacate-para-exportacao-Procedimentos-de-Colheita-e-pos-colheita-1995.pdf>. Acessado em: 24 nov. 2023.
- DABAS, D. *et al.* **In Vitro Antioxidant and Cancer Inhibitory Activity of a Colored Avocado Seed Extract.** International Journal of Food Science, [s.l.], p.1-7, 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2019/6509421>. Acessado em: 15 fev. 2024.
- FILHO, M. T. L. *et al.* **Drying kinetics of pineapple agro-industrial residues: a new approach.** Brazilian Journal of Development, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 3928–3949, 2020. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/6360>. Acessado em: 23 mar. 2024.
- ISLAM, M.; K. WAHID; DINH A. **Assessment of Ripening Degree of Avocado by Electrical Impedance Spectroscopy and Support Vector Machine.** Journal of Food Quality, [S. l.], p.1–9, 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2018/4706147>. Acessado em: 14 out. 2023.
- KARA, C.; DOYMAZ, I. **Effective moisture diffusivity determination and mathematical modelling of drying curves of apple pomace.** Heat and Mass Transfer, [S. l.], v. 51, p. 983–989, 2015. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00231-014-1470-6>. Acessado em: 24 jan. 2024
- LIMA, A. R. N. *et al.* **Evaluation of two different diffusive models to describe the drying of passion fruit peels with and without blanching.** Heat Mass Transfer, [S.l.] v.58, p.669–682, 2022. Disponível em:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s00231-021-03142-6>. Acessado em: 03 jun. 2024.

LIMA, I. F. De *et al.* **Equação de difusão em coordenadas esféricas aplicada em processos de secagem**. Campina Grande: Realize Editora, p.1-9, 2018. Disponível em: <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/43112>. Acessado em: 21 jun. 2024.

MEDEIROS, R. A. **Otimização e simulação do processo de secagem de sementes de melão (*Cucumis melo L.*) usando modelos matemáticos empíricos e difusivos**. 2021. Dissertação (Mestre em Ciências Naturais e Biotecnologia) - Ciências Naturais e Biotecnologia - Universidade Federal de Campina Grande. Cuité, p.1-98, 2021. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/18995>. Acessado em: 26 jul. 2024.

NASCIMENTO, M. R. F. *et al.* **Composição centesimal minerais de farinha do caroço de abacate (*Persea gratissima, Gaertner f.*)**. Gramado: SBCTA Regional, p.1-6, 2016. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1057908>. Acessado em: 15 dez. 2023.

RIGUETO, C. V. T. *et al.* **Avaliação da temperatura de secagem na elaboração da farinha do caroço de abacate (*Persea americana mill*)**. Avanços e Desafios da Nutrição 3. Ponta Grossa: Atena Editora, v.3, n.1, p. 93–101, 2019. Disponível em: <https://atenaeditora.com.br/catalogo/post/avaliacao-da-temperatura-de-secagem-na-elaboracao-da-farinha-do-caroco-de-abacate-persea-americana-mill>. Acessado em: 16 jun. 2024.

SILVA, A. F. **Spherical**. Versão 1., [S. I.], 2024. Acesso em: 29 jun. 2024.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S. **LAB Fit curve fitting software**. V. 7.2.46., [S. I.], 2009. Acesso em: 23 mar. 2024.

SILVA, W. P. **xyExtract Graph Digitalizador**. Versão. 5.1, [S. I.], 2022. Acessado em: 15 jun. 2024.

VILELA, C. A. A.; ARTUR, P. O. **Secagem do açafrão (*Curcuma longa L.*) em diferentes cortes geométricos**. Campinas: Ciência e Tecnologia de Alimentos, v. 28, n. 2, p. 387–394, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cta/a/fS8yq9CdXNbRrFkp6DfmN8D/>. Acessado em: 28 ago. 2024.

## 6 Agradecimentos

Agradeço o apoio do CNPq, a bolsa fornecida pelo Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC-UFCG), o acesso aos equipamentos do Laboratório de Tecnologia de Alimentos (LTA) da UFCG - campus Cuité. E meus sinceros agradecimentos a Jessica Samara Costa Dantas que me auxiliou na execução do experimento, o apoio da minha família e as orientações do professor Dr. Aluizio Freire da Silva Junior.