



**BHENAYA ALVES DE SOUSA FONSECA SANTOS**

**MODELAGEM DAS CINÉTICAS DE SECAGEM DAS  
AMÊNDOAS DE BABAÇU**

São Luís  
2022

**BHENAYA ALVES DE SOUSA FONSECA SANTOS**

**MODELAGEM DAS CINÉTICAS DE SECAGEM DAS  
AMÊNDOAS DE BABAÇU**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado de Curso da Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Harvey Alexander Villa Vélez

São Luís  
2022

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Santos, Bhenaya Alves de Sousa Fonseca.

Modelagem das cinéticas de secagem das amêndoas de  
babaçu / Bhenaya Alves de Sousa Fonseca Santos. - 2022.  
48 f.

Orientador(a): Harvey Alexander Villa Vélez.

Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do  
Maranhão, São Luís - MA, 2022.

1. Amêndoas de babaçu. 2. Modelos matemáticos. 3.  
Secagem convectiva. I. Vélez, Harvey Alexander Villa. II.  
Título.

**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. HARVEY ALEXANDER VILLA VÉLEZ  
Orientador – DEEQ/CCET/UFMA

Prof. Dra. DIANA MARIA CANO HIGUITA  
DEEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. JHONY TIAGO TELEKEN  
DEEQ/CCET/UFMA

**26 de julho de 2022**

**DADOS CURRICULARES****Bhenaya Alves de Sousa Fonseca Santos**

<b>NASCIMENTO</b>	28/02/1999 – SÃO LUIS / MA
<b>FILIAÇÃO</b>	Hilton Fonseca Santos Iraldiane Alves de Sousa Santos
<b>2016/2022</b>	Curso de Graduação Engenharia Química - Universidade Federal do Maranhão

*Dedico este trabalho aos meus pais e à minha  
irmã, que sempre me incentivaram, choraram e  
sorriram comigo.*

## AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, minha total gratidão ao meu Deus, por tamanha graça e sustento em todos os momentos. Todo louvor ao Senhor da minha vida e que eu exerça minha profissão para glória exclusivamente dEle.

Aos meus amados pais, que são minha base. Sou eternamente grata por todo o amor, todas as orações, todos os sacrifícios, incentivos, conselhos e por nunca me deixarem tirar os olhos de Cristo.

Ao meu maior presente, minha irmã, por ser meu principal incentivo a ser alguém melhor, a buscar o correto e ser alguém de quem ela se orgulhe.

A Joabe, pela paciência, pelo cuidado e pelo incentivo.

À minha prima, Acsa Lídia, pela companhia de vida e de jornada. Obrigada pelo apoio e pelos momentos.

Aos meus avós que sempre oram por mim, torcem pelo meu sucesso e sempre me ajudam como podem.

Aos meus tios, tias, primos e primas pelo amor, orações e pelas mensagens de ânimo.

Aos meus amigos, Isabelle e Martiniano, pela companhia de todos os dias e por me arrancar gargalhadas na rotina desgastante. À Nathália pela parceria durante o TCC e pelos momentos divertidos. Vocês foram essenciais para deixar a caminhada mais leve.

Aos meus amigos e irmãos em Cristo, que estiveram comigo em todas as fases da minha vida, nessa não foi diferente e eu sou grata pelo apoio e por acreditarem em mim.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Harvey Alexander, pela confiança, paciência e orientação nesse e em tantos outros trabalhos.

Enfim, a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

***“Não to mandei eu? Esforça-te, e tem bom ânimo; não temas, nem te espantes; porque o SENHOR teu Deus é contigo, por onde quer que andares...”***

***Josué 1:9***



SANTOS, B.A.S.F. **Modelagem das cinéticas de secagem de amêndoas do babaçu**. 2022. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2022.

## RESUMO

O babaçu possui uma importância socioeconômica que gira em torno, principalmente, de sua extração e comercialização. As amêndoas são a principal parte do fruto, rica em óleos, fibras e proteínas e, serve como base para uma vasta área de produtos industriais e artesanais. Para sua maior durabilidade de armazenamento, o processo de secagem é uma ótima alternativa para preservar suas qualidades nutricionais e físicas. Nessa perspectiva, o presente estudo teve o objetivo de ajustar diferentes modelos matemáticos e empíricos aos valores obtidos experimentalmente de secagem das amêndoas do babaçu e analisar quais modelos melhor se ajustam ao processo. A cinética de secagem das amêndoas foi realizada por convecção em uma estufa com circulação de ar a 2,5 m/s a temperaturas de 40, 50 e 60°C. Os dados obtidos experimentalmente foram ajustados aos modelos empíricos de Weibull, Peleg, Henderson-Pabis, Logarítmico, Wang Sing, Page, Midilli, Exponencial de Dois Termos e Aproximação por Difusão, que foram avaliados mediante o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o erro médio quadrático (MSE) através do software MatLab, utilizando análises de regressão não-linear, pelas funções `nlinfit` com o algoritmo de Gauss-Newton e a `nlparci` com ajuste de  $\alpha = 95\%$ . Os modelos de Page, Peleg e Exponencial de Dois Termos apresentaram os maiores valores de  $R^2$  e valores inferiores de MSE dentre os demais modelos testados. O modelo de Page foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais, mostrando maior confiabilidade em representar o processo de secagem da amêndoa do babaçu. Para cálculo do coeficiente difusivo obteve-se o valor de uma magnitude de  $\times 10^{-2}$  para placa infinita e  $\times 10^{-10}$  para as demais geometrias; e energia de ativação utilizou-se a equação de Arrhenius e obteve-se  $E_a = 19.593 \text{ J/mol}$  e  $D_0 = 1.102 \times 10^{-10}$ .

**Palavras-chave:** Amêndoas de babaçu. Secagem convectiva. Modelos matemáticos.

SANTOS, B.A.S.F. **Modeling of the drying kinetics of babassu almonds**. 2021. 48 f. Graduate Work (Graduate in Chemical Engineering) – Curso de Engenharia do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2022.

### ABSTRACT

Babassu has a socioeconomic importance that revolves mainly around its extraction and commercialization. The almonds are the main part of the fruit, rich in oils, fibers and proteins, and serves as the basis for a wide area of industrial and handicraft products. For its greater storage durability, the drying process is an excellent alternative to preserve its nutritional and physical qualities. In this perspective, the present study aimed to adjust different mathematical and empirical models to experimentally obtained values of babassu kernel drying and analyze which models best fit the process. The almond drying kinetics was performed by convection in an oven with air circulation at 2,5 m/s at temperatures of 40, 50 and 60°C. The experimental data were fitted to empirical models of Weibull, Peleg, Henderson-Pabis, Logarithmic, Wang Sing, Page, Midilli, Two-Term Exponential and Diffusion Approximation, which were evaluated by means of the coefficient of determination ( $R^2$ ) and the mean squared error (MSE) through the MatLab software, using non-linear regression analysis by the nlinfit functions with the Gauss-Newton algorithm and the nlparci with adjustment of  $\alpha = 95\%$ . The Page, Peleg, and Two-Term Exponential models had the highest  $R^2$  values and lowest MSE values among the other models tested. Page's model was the best fit to the experimental data, showing greater reliability in representing the drying process of babassu kernel. To calculate the diffusive coefficient we obtained the value of a magnitude of  $\times 10^{-2}$  for infinite plate and  $\times 10^{-10}$  for the other geometries; and activation energy we used the Arrhenius equation and obtained  $E_a = 19.593$  J/mol and  $D_0 = 1.102 \times 10^{-10}$ .

**Keywords:** Babassu kernels. Convective drying. Mathematical models.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Palmeira do babaçu .....	03
Figura 2 – Curva de secagem, variação do conteúdo de umidade em função do tempo .....	08
Figura 3 – Variação da velocidade de secagem da água retida em função do tempo .....	09
Figura 4 – Velocidade de secagem .....	09
Figura 5 – Fluxograma do preparo até a secagem das amêndoas do babaçu .....	15
Figura 6 – Pesagem das bandejas 1, 2 e 3 com amêndoas .....	16
Figura 7 – Representação da geometria do elipsoide para cálculo da difusividade .....	18
Figura 8 – Curvas de secagem, experimentais da amêndoa de babaçu nas temperaturas de 40°C (●), 50°C (▲) e 60°C (■). As linhas indicam os valores dos desvios padrões da quadruplicada.....	20
Figura 9 – Perfil do período de taxa de secagem da amêndoa de babaçu nas temperaturas de 40°C (●), 50°C (▲) e 60°C (■) .....	21
Figura 10 – Superfície de resposta dos valores experimentais (●) e simulados (malha) pelo modelo de Page e análise dos resíduos .....	24

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Dados obtidos nos ajustes de modelos matemáticos na modelagem de cinética de secagem a 40, 50 e 60°C.....	22
Tabela 2 – Resultados obtidos a partir da caracterização física das amêndoas do babaçu.....	24
Tabela 3 – Resultados do coeficiente de difusão para geometria esferoide, placa infinita, cilindro infinito e esfera.....	25

## SUMÁRIO

	FOLHA DE APROVAÇÃO.....	i
	DADOS CURRICULARES.....	ii
	DEDICATÓRIA.....	iii
	AGRADECIMENTOS.....	iv
	EPÍGRAFE.....	v
	RESUMO.....	vi
	ABSTRACT.....	vii
	LISTA DE FIGURAS.....	viii
	LISTA DE TABELAS.....	ix
	SUMÁRIO.....	x
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>01</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>02</b>
2.1	Objetivos gerais.....	02
2.2	Objetivos específicos.....	02
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>03</b>
3.1	O Babaçu .....	03
3.3.1	Epicarpo .....	03
3.3.2	Mesocarpo .....	04
3.3.3	Endocarpo .....	04
3.3.4	Amêndoa do babaçu .....	04
3.2	Morfologia da amêndoa do babaçu .....	04
3.2.1	Características Químicas .....	05
3.3	Mercado industrial da amêndoa do babaçu .....	05
3.4	Armazenamento das amêndoas .....	06
3.5	O processo de secagem .....	07
3.6	Cinéticas de secagem .....	08
3.7	Modelagem do processo de secagem .....	10
3.7.1	Período à taxa constante .....	10
3.7.2	Período à taxa decrescente .....	11
3.7.3	Fatores que afetam a difusividade .....	13
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>15</b>

4.1	Material.....	15
4.2	Local da pesquisa.....	15
4.3	Cinéticas de secagem .....	15
4.4	Modelagem das cinéticas de secagem .....	16
4.5	Determinação da difusividade e energia de ativação .....	17
4.6	Avaliação estatística .....	19
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>20</b>
5.1	Cinéticas de secagem .....	20
5.2	Modelagem matemática .....	22
5.3	Determinação da energia de ativação .....	24
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>27</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>28</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O coco babaçu (*Orbignya sp*) é um fruto de grande relevância socioeconômica, especialmente nos estados brasileiros da região nordeste, onde se destaca por grande extrativismo e serve como principal fonte de renda para milhares de famílias desde sua colheita até a extração de óleos, fabricação de produtos industriais e artesanais (QUEIROGA et al., 2015).

A divisão da composição física do babaçu se destaca na maneira em que são aproveitadas, como o epicarpo, o mesocarpo e o endocarpo na produção de energia para siderúrgicas e alimentação animal; as amêndoas, por outro lado, como principal parte do fruto, destina-se para a fabricação de óleos de cozinha, sabões, biodiesel e cosméticos (LORENZI et al., 2002; FAÇANHA; VIEIRA, 2011).

Assim como em todos os alimentos, a água presente nas amêndoas influencia diretamente na sua estabilidade química e microbiológica durante o período de armazenamento (TERRA; FREITAS; CICHOSKI, 2007). Por essa razão, Sousa et al. (2006) ratificam a importância da secagem visando a preparação do alimento para ser armazenado, visto que a operação unitária retira água do material por meio de transferência de calor entre o ar quente e a superfície exposta, permitindo que a qualidade do produto seja preservada por longos períodos de estocagem.

Muitos modelos matemáticos têm sido utilizados à fim de descrever a cinética de secagem em camada fina para produtos agrícolas, o modelo teórico e os empíricos, que consideram a resistência externa a umidade relativa do ar de secagem e à temperatura (MIDILLI et al., 2002). Haja vista o destaque do estudo teórico do processo de secagem em produtos agrícolas e a pouca variedade das informações teóricas a respeito dos fenômenos que ocorrem durante a secagem das amêndoas do babaçu, este trabalho se propôs a avaliar a cinética de secagem das amêndoas em camada fina nas temperaturas de 40, 50 e 60°C utilizando os modelos matemáticos empíricos de Weibull, Peleg, Henderson-Pabis, Logarítmico, Wang Sing, Page, Midilli, Exponencial de Dois Termos e Aproximação por Difusão para ajuste dos dados experimentais.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Modelar as cinéticas de secagem das amêndoas de coco babaçu em diferentes condições isotérmicas.

### **2.1 Objetivos específicos**

- Determinar as curvas de secagem das amêndoas de coco babaçu nas temperaturas de 40°, 50° e 60°C;
- Comparar a qualidade do ajuste de diferentes modelos de camada fina aos dados experimentais;
- Avaliar o efeito da geometria do modelo difusivo sobre os valores dos coeficientes efetivos de transferência de massa.;
- Determinar a energia de ativação do processo de secagem de amêndoas de coco babaçu.



### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 O BABAÇU

A palmeira do babaçu (*Attalea speciosa* Mart. Ex Spreng) é pertencente ao grupo das Arecaceae e se caracteriza por possuir um mono caule robusto, podendo chegar até 20 metros de altura, 25 a 44 centímetros de diâmetro, com 7 a 22 folhas medindo de 4 a 8 metros de comprimento (Figura 1) (Araújo, 2008).

Figura 1. Palmeira do coco babaçu.



Fonte: Araújo (2008).

De acordo com dados do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2012), o fruto apresenta: epicarpo (camada mais externa), mesocarpo (com 0,5 a 1,0 centímetro, rico em amido), endocarpo (de 2 a 3 centímetros) e as amêndoas (de 3 a 6 por fruto).

A cadeia de produção do babaçu tem como sua base o extrativismo primário, seguido da coleta dos cocos logo após a queda dos frutos. As coletas são realizadas, em sua grande maioria, por mulheres das comunidades tradicionais e pequenos agricultores.

##### 3.3.1 Epicarpo

O Epicarpo é a camada mais externa do babaçu e apresenta 12,6% do fruto, se caracterizando por ter maior rigidez e estrutura fibrosa. Pode ser utilizado na fabricação de

estofados de bancos de carro, vasos; também é uma ótima alternativa para substituição de embalagens feitas de isopor, porém, sua maior aplicação é na queima em fornos caseiros e comerciais, além de ser um excelente adubo orgânico, segundo o Manual Tecnológico para o Aproveitamento Integral do fruto e da folha do babaçu elaborado pelo Instituto Sociedade, População e Natureza (CARRAZA; SILVA; ÁVILA, 2012).

### **3.3.2 Mesocarpo**

O Mesocarpo é a camada abaixo do epicarpo e ocupa um total aproximado de 20,4% da estrutura do coco babaçu. Se destaca por ser rico em amido e sua aplicação gira em torno da alimentação humana e de uso industrial como aglomerante na fabricação de briquetes, também tem sido utilizado como medicamento por apresentar atividade anti-inflamatória, imunomoduladora, analgésica e antipirética (BATISTA et al., 2006).

### **3.3.3 Endocarpo**

O Endocarpo é a camada mais resistente, chegando a medir de 2 a 3 cm de espessura e ocupando, em média, 58,4% do babaçu. É um ótimo combustível substituto da lenha e pode ser aproveitado para uso em indústrias alimentícias, farmacêuticas, químicas e veterinárias (CARRAZA; SILVA; ÁVILA, 2012).

### **3.3.4 Amêndoa do coco babaçu**

As amêndoas são a parte principal do babaçu e de grande importância na sua cadeia extrativista, visto que delas são extraídos óleos, leite e azeite de babaçu. O fruto pode se apresentar em quantidades que variam de 03 até 06 amêndoas por unidade, ocupando cerca de 8,7% da estrutura do babaçu (FERREIRA, 2011). O óleo se destaca por ser um subproduto essencial na produção de óleo comestível, sabão e glicerina (ALBIERO et al., 2007). A torta gorda ou magra do babaçu é utilizada na produção de ração animal, mesmo apresentando uma qualidade inferior se comparada a outros produtos regionais como a soja, que apresenta óleos com valor nutricional mais elevado (PORTO, 2004).

## **3.2 MORFOLOGIA DA AMÊNDOA DO BABAÇU**

As amêndoas do babaçu apresentam uma cor branca de aspecto, parcialmente,

amarelado. As amêndoas possuem um formato oval chegando a pesar de 3,0 a 4,0 gramas e medem entre 2,5 a 6,0 centímetros de comprimento, por 1,0 a 2,0 centímetros de largura. É um fruto oleoso, chegando a apresentar um teor entre 60 e 68% de óleo em sua composição, assim como sais minerais, fibras, proteínas e carboidratos (DOURADO; BOCLIN, 2008).

Segundo estudos propostos por Lemos (2012), é possível encontrar teores altos de compostos fenólicos e atividade antioxidante nas amêndoas do babaçu. Mais de 60% da amêndoa é óleo e o restante é a torta, que é usada para fabricação de ração animal e adubo (MACHADO, 2006), podendo alcançar até 72% em condições mais favoráveis de crescimento da palmeira (SOLER, 2007).

### **3.2.1 Características Químicas**

Em geral, as amêndoas possuem uma composição baseada em um teor de água igual a 5,71%, 66,00% de óleo, 18,00% de carboidratos, 7,80% de materiais minerais, 7,25% de proteína (BELTRÃO; OLIVEIRA, 2007). A amêndoa do babaçu é rica em amido, enzimas, fibras e sais minerais. A massa seca ou farinha das amêndoas de babaçu tem propriedade anti-inflamatória, analgésica e de combate a tumores e úlceras (SILVA, 2011).

No que se refere à produção de combustíveis, o óleo de babaçu possui características excelentes para uma boa produção de biodiesel, por possuir uma composição, em sua maioria, láurica. Segundo Lima et al. (2007), a composição para ácidos graxos é de 44,0% de ácido láurico; 17,0% de ácido mirístico; 14,0% de ácido oleico; 8,0% de ácido palmítico; 6,0% de ácido caprílico; 5,0% de ácido cáprico; 4,5% de ácido esteárico e 2,0% de ácido linoléico.

## **3.3 MERCADO INDUSTRIAL DA AMÊNDOA DE BABAÇU**

O babaçu é uma espécie de grande importância social e econômica, especialmente no estado do Maranhão, em que sua exploração é realizada de forma extrativista e possibilita ocupação para as famílias da região. De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2012), a coleta dos cocos é realizada em sua maioria por povos e comunidades tradicionais e pequenos agricultores familiares.

Segundo dados do IBGE (2020), o Maranhão é o estado brasileiro que concentra quase toda produção do babaçu, sendo responsável por 93% da amêndoa de babaçu extraída em todo o Brasil e, tendo também, boa parte de sua economia oriunda da comercialização e extração das amêndoas chegando a produzir 47.640 toneladas no ano de 2020.

Apesar de sua enorme relevância para a economia local e nacional, o óleo extraído das amêndoas está perdendo espaço para a produção de óleo de palmiste (originalmente africana), principalmente na fabricação de sabões, e isto tem afetado muitos proprietários e quebradeiras de coco que, praticamente, sobrevivem dos lucros auferidos pela atividade de venda das amêndoas (ALBIERO et al., 2007).

O principal produto extraído do babaçu é o óleo oriundo da amêndoa com um mercado já estabelecido. A dimensão do mercado do coco babaçu depende da forma que o óleo oriundo das amêndoas é utilizado, seja na alimentação pelo consumo familiar do azeite de babaçu ou para nível de processos industriais (GOUVEIA, 2015).

A indústria do babaçu começou a criar força no Maranhão por volta de 1948, as amêndoas industrializadas no estado representavam 10,11% da produção total do país; em 1949 alcançaram um montante de 20,17% em meio a exportações da amêndoa e do óleo de babaçu, como foi registrado pelo Departamento de Estatística da Associação Comercial. Em 1951, existiam cerca de 58 usinas de óleo de babaçu em todo o Brasil, das quais 11 se localizavam no Maranhão. Dos anos 80 até os dias atuais, o processamento de amêndoas de babaçu também reduziu drasticamente (DOURADO; BOCLIN, 2008).

As atividades que envolvem a coleta do babaçu e a extração das amêndoas são, em sua grande maioria, feitas por mulheres das comunidades locais. Como comentado por Filho (2018), o Movimento Interestadual das Quebradeiras de Coco Babaçu (MIQCB) surgiu a partir de uma organização promovida pelas quebradeiras de coco, em forma de cooperativas, para alcançar representatividade na economia local, fazê-las conhecidas de seus direitos e defender a fonte de renda da região (MIQCB, 2020).

A realização de estudos específicos para os subprodutos, principalmente os de aplicação no ramo alimentício, podem abrir espaço para valorização e industrialização dos derivados do coco babaçu, gerando renda e desenvolvimento de tecnologia social (GOMES, 2017).

### 3.4 ARMAZENAMENTO DAS AMÊNDOAS

Devido ao processo de extração, as amêndoas sofrem arranhões ou até mesmo quebra de sua estrutura. Quando expostas ao ar úmido, as mesmas tendem a rancificar com o tempo, principalmente durante um longo período antes de serem utilizadas para extração do óleo (CARRAZA; SILVA; ÁVILA, 2012).

Quando retiradas do babaçu, as amêndoas, geralmente, são armazenadas em sacos plásticos, baldes ou garrafas PET. Essas são alternativas mais acessíveis mediante as condições

das quebradeiras e pequenos proprietários. O ideal é que o armazenamento seja feito em locais protegidos de umidade, luz solar, animais e produtos químicos que podem comprometer a integridade das amêndoas e assim, reduzir sua qualidade (CARRAZA; SILVA; ÁVILA, 2012).

### 3.5 O PROCESSO DE SECAGEM

A água é um dos componentes encontrados nos alimentos e a mesma causa uma estabilidade importante devido ao potencial que esta tem para contribuir nos processos de deterioração nas reações químicas, físicas e microbiológicas (BARBOSA-CÁNOVAS et al., 2007).

A deterioração dos alimentos pode acontecer de maneira bem rápida, graças as reações enzimáticas e químicas que ocorrem durante o armazenamento. É importante ressaltar que todos os alimentos contêm água mesmo que em porções menores, independentemente do método de industrialização no qual ele foi submetido. Portanto, é necessário saber qual o teor de água presente no alimento (umidade), pois ele é um fator importante no controle da taxa de deterioração (FELLOWS, 2006; INSTITUTO ADOLFO LUTZ 2008).

Visando a maior durabilidade dos alimentos, o processo de secagem vem como a maior alternativa para reduzir a quantidade de água presente nos ingredientes, principalmente de cunho agrícola, diminuir o peso, volume e atividade da água do alimento, promovendo assim, uma maior facilidade em armazenamentos por tempos mais prolongados, tendo em vista que a redução do teor de umidade evita a ação de agentes deteriorantes como enzimas e microrganismos (KUMAR; KARIM; JOARDDER, 2014).

O processo de secagem, que é realizado por convecção como um agente de transferência de calor cede calor, por meio de ar quente, à superfície do material que está sendo seco e ele se difunde dentro do sólido. (BRENNAN, 2006). Essa técnica se destaca em apresentar vantagens pela sua viabilidade econômica e acessibilidade, promoção de higiene, uniformidade e simplicidade (CALIN-SÁNCHEZ et al., 2020). A dessorção, fenômeno presente no processo de secagem em que a água aderida na superfície do material é removida por meio de aplicação de energia, é de extrema importância para a indústria à fim de evitar transformações indesejadas devido à perda de água (CAGLIARI et al., 2022).

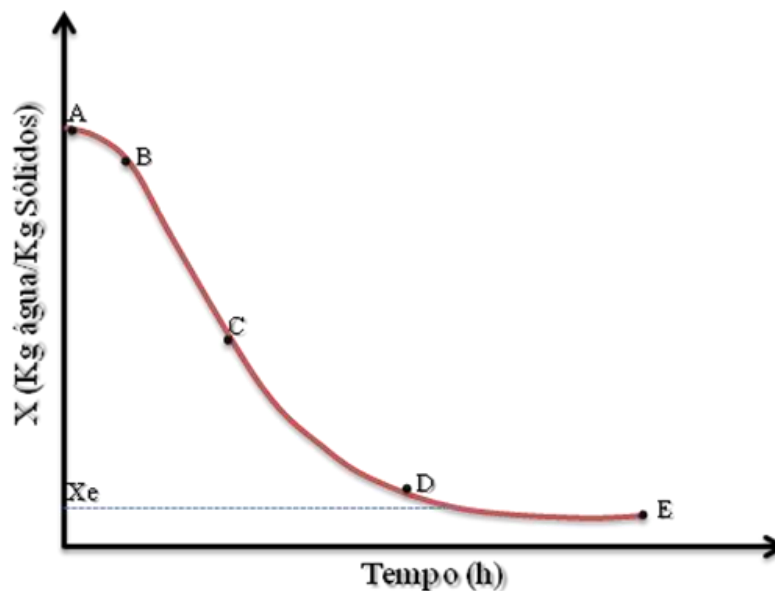
Em um processo de secagem por convecção forçada, conforme a umidade presente no meio evapora, o transporte da umidade do interior para a superfície se desenvolve por meio de um ou diversos mecanismos que podem variar durante a secagem, tendo em vista que estão em função da estrutura física, temperatura e o conteúdo de umidade do material. São esses os

mecanismos: Difusão líquida (o sólido se encontra a uma temperatura inferior ao ponto de ebulição do líquido), difusão de vapor (o líquido se vaporiza dentro do material) e diferenças de pressão hidrostática (por meio de tensão interna provocada pelo encolhimento do material) (KROKIDA, MARINOS-KOURIS, 2003).

### 3.6 CINÉTICAS DE SECAGEM

Nos processos de secagem com ar quente é possível observar dois períodos de secagem: o período inicial com velocidade constante, em que ocorre a maioria da evaporação da água pura; e outro com uma velocidade mais baixa, no instante em que o movimento da água para a superfície é controlado por forças ou resistências internas. A figura 2 mostra a variação do conteúdo de umidade em função do tempo, onde o seguimento AB representa o período de adaptação, onde a temperatura está aumentando para, enfim, dar início ao processo de evaporação de alta difusividade que é mostrado no segmento BC. O segmento DE demonstra o período de velocidade constante (RIZVI, 2005).

Figura 2. Curva de secagem, variação do conteúdo de umidade em função do tempo

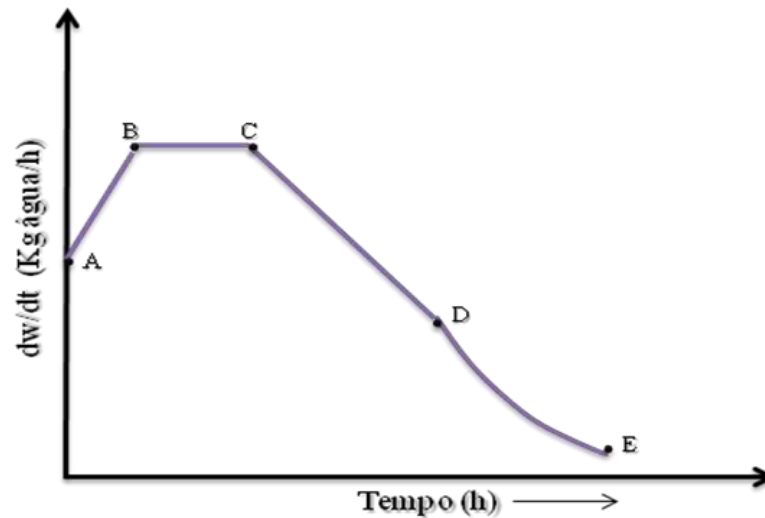


Fonte: RIZVI (2005).

Derivando a curva da figura anterior, obtém-se a velocidade de secagem em função do tempo (figura 3). Analisando graficamente a velocidade de secagem em função do conteúdo de umidade (figura 4), pode-se observar um período à taxa constante, onde a superfície de secagem

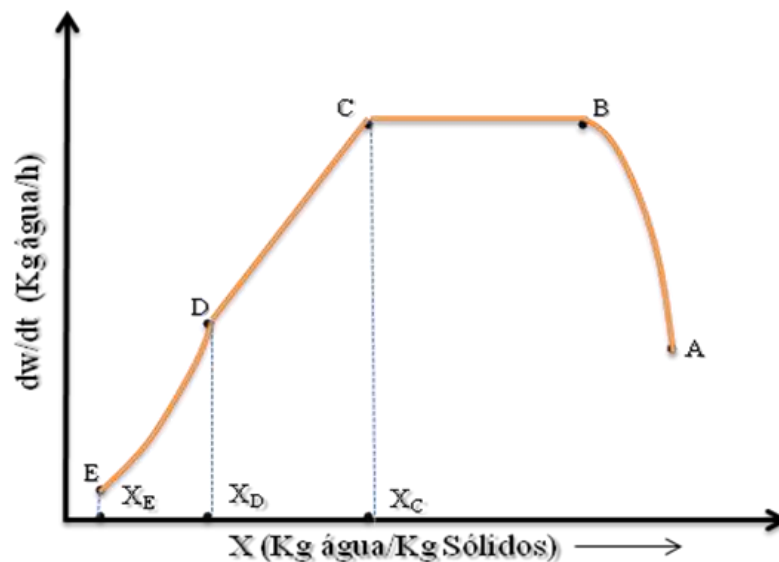
é saturada com água e a secagem ocorre na temperatura de bulbo úmido do ambiente (HALL, 2006).

Figura 3. Variação da velocidade de secagem da água retida em função do tempo



Fonte: HALL (2006).

Figura 4. Velocidade de secagem



Fonte: HALL (2006).

O fator determinante do período de velocidade constante (B a C) durante a secagem são os mecanismos de movimentação interna do líquido na estrutura do alimento. Neste período de taxa constante a energia térmica transferida para o alimento é convertida em calor latente de vaporização. Na figura 4, o ponto C, chamado de conteúdo de umidade crítica ( $X_C$ ), está relacionado com a espessura do material e com a velocidade que a secagem ocorre, indicando

a transição do conteúdo de umidade no final do período de velocidade constante. Neste ponto, o conteúdo de umidade do alimento não é suficiente para saturar totalmente sua superfície (HALL, 2006).

Entre os pontos C e D, a movimentação do líquido em direção à superfície é menor que a velocidade de evaporação sobre a mesma superfície, com o decorrer do tempo ocorre um esgotamento de líquido sobre a superfície. No entanto, é no ponto D que ocorre a difusão com maior intensidade de força, onde a evaporação da água dá-se no interior do alimento para a direção da superfície que está em contato com o ar quente de secagem.

O ponto E, chamado de conteúdo de umidade de equilíbrio (XE), é o limite do processo de secagem, já que toda a água ainda presente no produto encontra-se na forma ligada (HALL, 2006).

### 3.7 MODELAGEM DO PROCESSO DE SECAGEM

A cinética de secagem e a modelagem matemática oferecem possibilidade de simulações à fim de obter otimizações para o processo, assim como o dimensionamento e a determinação da aplicação comercial do sistema de secagem (PEREA-FLORES et al., 2012).

De acordo com Silva et al. (2017), a simulação matemática juntamente com o conhecimento da fisiologia e das composição química dos produtos são de grande utilidade para o desenvolvimento e otimização e melhorias nos equipamentos de secagem.

#### 3.7.1 Período à taxa constante

Matematicamente, o período de secagem com taxa constante pode ser determinado pela equação (1):

$$\frac{dX}{dt} = \frac{hA(T_{amb} - T_{bu})}{\lambda} \quad (1)$$

onde  $dX/dt$  é a taxa de secagem,  $A$  é a área da superfície exposta ( $m^2$ ),  $h$  é o coeficiente de transferência de calor ( $W \cdot (m^2)^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ ),  $\lambda$  é o calor de vaporização ( $J \cdot mol^{-1}$ ),  $T_{amb}$  é a temperatura ambiente ( $^\circ C$ ) e  $T_{bu}$  é a temperatura de bulbo úmido ( $^\circ C$ ) (HALL, 2006).

Devido à superfície do material estar úmida e a temperatura ser igual à temperatura de bulbo úmido do ar de secagem, despreza-se a transferência de calor por condução e radiação.



Frequentemente, a equação de transferência de calor fornece uma estimativa mais segura da taxa de secagem do que a equação de transferência de massa, todavia, correlações são propostas, segundo encontrado na literatura, para permitir que as constantes nestas relações sejam fixadas com segurança (TREYBALL, 1968). Essas constantes são função da espessura do filme de ar que envolve o produto na secagem e, desta maneira, são afetadas pela velocidade do ar e pelo seu ângulo de colisão com a superfície seca. Expresso em termos de fluxo de massa de ar ( $G$ ), o coeficiente de transferência de calor para escoamento de ar paralelo a superfície do produto é dado pela equação (2):

$$h = C_1(G)^{0,8} \quad (2)$$

Para escoamento de ar no ângulo direto da superfície de secagem o coeficiente de transferência de calor é dado por meio da equação (3):

$$h = C_2(G)^{0,4} \quad (3)$$

onde  $C_1$  e  $C_2$  são constantes.

As equações 1 e 2 indicam que a aceleração da taxa de secagem é causada pelo aumento do fluxo de massa de ar. De maneira adicional, uma velocidade mais alta tende a minimizar as diferenças de umidade presentes entre o interior e o exterior de um sistema de secagem e, assim, o teor de umidade do produto pode manter-se constante (FORSON et al., 2007).

### 3.7.2 Período à taxa decrescente

De acordo com Queiroz (1985) os dois métodos mais frequentemente utilizados na análise da secagem de produtos biológicos no período à taxa decrescente são: o empírico e o teórico. O método empírico consiste em formar grupos físicos adimensionais que podem ser facilmente investigados através de experimentos laboratoriais e fundamenta-se em condições externas, como temperatura, umidade e velocidade do ar de secagem. Todavia, não fornece indicações sobre o transporte de energia e de água no interior dos produtos. Os métodos teóricos utilizados para descrever o processo de secagem baseiam-se em leis físicas que tentam explicar o mecanismo de transferência de água (KAR et al., 2008).

#### 3.7.2.1 Modelos empíricos empregados para a análise no período de taxa decrescente

Os modelos empíricos de secagem em camada delgada seriam aqueles que concorreriam entre si para que houvesse boa relação entre a teoria e a facilidade de uso. A secagem em camada delgada trata do processo no qual o material a que será submetido à secagem está inteiramente exposto ao ar que se move através dele; utiliza-se a Lei de Newton para representar a taxa de variação da temperatura de um corpo envolto por um fluido à temperatura constante como mostra a equação (4) (HALL, 2006).

$$\frac{d\theta}{dt} = -\xi(\theta - \theta_e) \quad (4)$$

onde  $d\theta/dt$  é a constante de resfriamento ou aquecimento ( $K \cdot s^{-1}$ );  $\theta$  (K) é a temperatura do produto em qualquer instante de tempo e  $\theta_e$  (K) é a temperatura do meio que circunda o produto.

Esta equação é uma equação diferencial linear de primeira ordem, cuja solução pode ser obtida por meio da separação de variáveis e posterior integração, que resulta na equação exponencial mostrada a seguir:

$$\int_{\theta_e}^{\theta} \frac{d\theta}{(\theta - \theta_e)} = \int_{t_0}^t -\xi dt \quad (5)$$

$$\frac{\theta - \theta_e}{\theta_0 - \theta_e} = e^{-\xi t} \quad (6)$$

Atualmente, são empregados muitos modelos empíricos para as análises de curvas de secagem, os quais derivam do resultado anterior e que serão mostrados na seção de materiais e métodos (ROBERTS, KIDD, PADILLA-ZAKOUR, 2008; DE OLIVEIRA CARLESSO et al., 2005).

### 3.7.2.2 Modelos teóricos empregados para a análise no período de taxa decrescente

Os modelos que aplicam a teoria da difusão podem descrever de forma aceitável o perfil da distribuição de água no interior de determinado produto agrícola desde que seja possível correlacionar sua forma à geometria de um sólido perfeito para o caso de modelos resolvidos analiticamente, além da exigência do estabelecimento de uma relação funcional entre o

coeficiente de difusão, o teor de umidade e a temperatura (RATTI, 2009; CLEMENTE et al., 2007). Crank (1975) apresenta uma série de soluções analíticas a partir da segunda lei de Fick (equação 7), para determinar a difusividade efetiva para uma série de sólidos com formas geométricas regulares.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{eff} \frac{\partial X}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{eff} \frac{\partial Y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{eff} \frac{\partial Z}{\partial z} \right) \quad (7)$$

Assumindo a forma geométrica de placa plana infinita, onde a transferência interna de umidade durante a secagem é apenas em uma direção (7) se reduz a:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{eff} \frac{\partial X}{\partial y} \right) \quad (8)$$

Quando o coeficiente de difusão é considerado constante, o conteúdo de umidade inicial é distribuído uniformemente no interior do produto desprezando as resistências externas a transferência de massa. O teor de umidade na superfície da amostra permanece constante durante o processo e seu valor corresponde ao termo de umidade de equilíbrio do produto. Derivando a equação (8), tem-se:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} \quad (9)$$

Aplicando-se as seguintes condições de contorno:

$$X = X_i, \text{ em } t = 0 \quad 0 < y < L \quad (10a)$$

$$X = X_e, \text{ em } y = L \quad t > 0 \quad (10b)$$

$$\frac{\partial X}{\partial y} = 0, \text{ em } y = 0 \quad t > 0 \quad (10c)$$

A solução analítica da Lei de Fick para uma placa finita é dada na forma:

$$M = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[ \frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right] \quad (11)$$

onde  $D_{eff}$  é a difusividade efetiva ( $m^2 \cdot s^{-1}$ ),  $L$  é a espessura média do produto (m), e  $n$  é o número de repetições na solução analítica (SRIKIATDEN, ROBERTS, 2006; CRANK, 1975).

### 3.7.3 Fatores que afetam a difusividade

A difusividade tem uma grande dependência da temperatura e ainda mais do conteúdo de umidade. Em materiais porosos, a fração porosa afeta de maneira significativa a difusividade, e depende da sua estrutura e de sua distribuição. A dependência na temperatura da difusividade, geralmente, é descrita pela equação de Arrhenius, expressa por:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (12)$$

onde  $D_0$  é o fator de Arrhenius ( $m^2 \cdot s$ ), e  $E_a$  é a energia de ativação para difusão ( $J \cdot mol$ ). A dependência da difusividade do conteúdo de umidade pode ser adicionada na equação de Arrhenius considerando um fator empírico na energia de ativação, sendo função da umidade (HALL, 2006; SRIKIATDEN et al., 2006).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 MATERIAL

Foram utilizadas as amêndoas do fruto da palmeira do babaçu (*Attalea Speciosa*), in natura e adquiridos uma quantidade de aproximadamente 3 quilogramas do fruto, diretamente extraídos pelas quebradeiras de coco da Cidade de Itapecuru Mirim – MA.

### 4.2 LOCAL DA PESQUISA

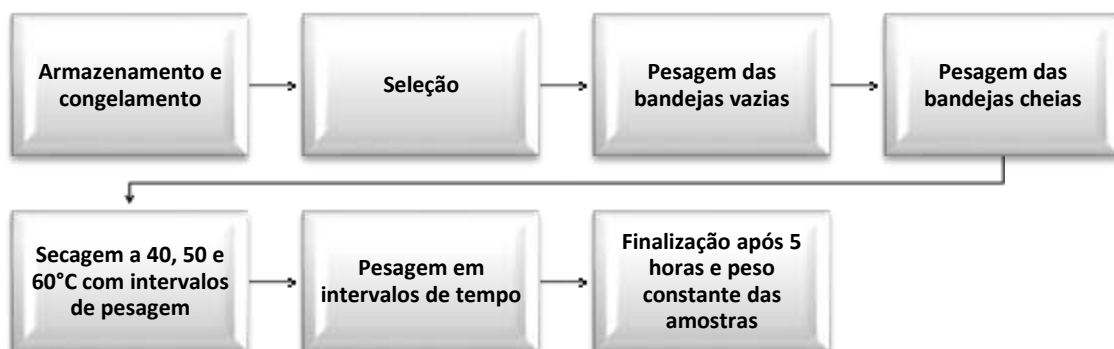
As amêndoas foram transportadas para o Laboratório de Engenharia de Petróleo da Universidade Federal do Maranhão onde foram armazenadas sob refrigeração, devidamente embaladas em sacos plásticos, até serem selecionadas mediante sua melhor aparência física e levadas para o processo de secagem em seu estado in natura.

### 4.3 CINÉTICAS DE SECAGEM

As temperaturas de secagem empregadas na pesquisa foram de 40, 50 e 60 °C, na velocidade de ar de secagem 2,5 m/s. O equipamento utilizado foi um secador de alimento (modelo MA105, Pardal, Brasil).

Na secagem, 4 bandejas, com dimensões de 100x15 milímetros, foram separadas, higienizadas, enumeradas e, ainda vazias, pesadas; os dados obtidos foram anotados e reservados para posteriores análises. De maneira sequente, cada bandeja recebeu 3 amostras de amêndoas, foram pesadas as bandejas cheias e deu-se início ao processo de secagem demonstrado mais claramente pelo fluxograma na figura 5.

Figura 5. Fluxograma do preparo até a secagem das amêndoas do babaçu



As bandejas foram colocadas no secador e foram tomados dados do peso das quatro bandejas por um tempo total de 5 horas, sendo em intervalos de 5 minutos nos instantes 0 a 40 minutos. Passados os momentos iniciais, as pesagens passaram a ser realizadas em intervalos de 20 minutos nos instantes de 40 a 120 minutos. Após isso, os intervalos de pesagem foram realizados em intervalos de 20 minutos de secagem dos instantes de 120 a 180 minutos, finalizando assim, 3 horas de secagem. Dando prosseguimento, os intervalos de pesagem passaram a ser de 30 minutos entre os instantes no tempo de 180 a 300 minutos, somando um total de 5 horas de procedimento de secagem.

Os resultados foram tabelados para as três temperaturas, sendo estes expressos em teor de água evaporada em base seca “b.s.” ( $X$ , kg/kg, b.s.). A umidade inicial das amostras foi obtida pelo método de secagem em estufa a 105°C (AOAC, 2007) onde duas amostras foram colocadas em 3 bandejas mostra a Figura 6.

**Figura 6.** Pesagem das bandejas 1, 2 e 3 com amêndoas.



Fonte: Próprio autor (2022).

#### 4.4 MODELAGEM DAS CINÉTICAS DE SECAGEM

As curvas de secagem das amêndoas de babaçu foram ajustadas aos modelos cinéticos de Weibull (Eq. 13), Peleg (Eq. 14), Henderson Pabis (Eq. 15), Logaritmico (Eq. 16), Wang & Sing (Eq. 17), Lewis (Eq. 18), Page (Eq. 19), Midilli (Eq. 20), Dois Termos (Eq. 21), Aproximação por difusão (Eq. 22) (HALL, 2006; KASHANINEJAD et al., 2007; AJALA; AJALA, 2014; BIALIK et al., 2017).

$$X = X_e + (X_0 - X_e) \exp\left(\frac{-t}{k_1}\right) \quad (13)$$

$$X = X_0 - \left( \frac{t}{k_1 + k_2 t} \right) \quad (14)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) \cdot k_1 \exp(-k_2 t) \quad (15)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) \cdot k_1 \exp(-k_2 t) + k_3 \quad (16)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) (k_1 t^2 + k_2 t + 1) \quad (17)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) \exp(-k_1 t) \quad (18)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) \exp[-k_1 (t^{k_2})] \quad (19)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) \exp[-k_1 (t^{k_2})] + k_3 t \quad (20)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) [k_1 \exp(-k_2 t) + k_3 \exp(-k_4 t)] \quad (21)$$

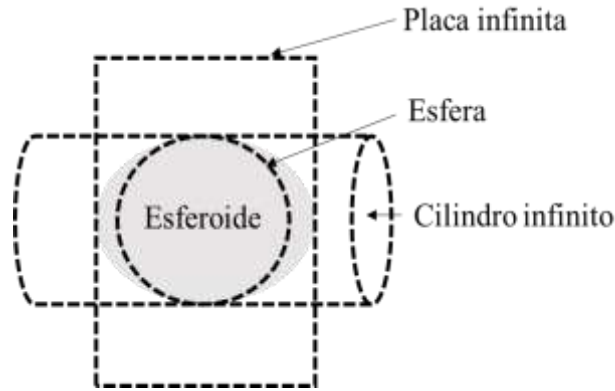
$$X = X_e + (X_0 - X_e) k_1 \exp(-k_2 t) + (1 - k_1) [\exp(-k_2 k_3 t)] \quad (22)$$

onde  $X$  (kg/kg, b.s.) é o conteúdo de água evaporada na amostra no tempo ( $t$ , s),  $X_0$  (kg/kg, b.s.) é o conteúdo inicial de água no material  $X_e$  (kg/kg, b.s.) é a umidade de equilíbrio,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  e  $k_4$  ( $s^{-1}$ , ---) são as constantes cinéticas dos modelos.

#### 4.5 DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE E ENERGIA DE ATIVAÇÃO

Para o cálculo do coeficiente de difusividade efetiva utilizou-se a segunda lei de Fick (CRANK, 1975). Para isto, foram consideradas diferentes geometrias, e após avaliadas as melhores foi realizado o produto das soluções numéricas (Eq. 26) para a geometria de esfera e placa infinita (ver Figura 7) conforme apresentado nas Eqs. (23), (24) e (25) respectivamente (HACIHAFIGOGLU et al., 2008).

**Figura 7.** Representação da geometria do elipsoide para cálculo da difusividade.



Fonte: HACIHAFIZOGLU et al. (2008).

$$Y_{(R,t)esfera} = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp\left(\frac{-D_{ef} n^2 \pi^2 t}{R^2}\right) \quad (23)$$

$$Y_{(R,t)cilindro\ infinito} = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(\lambda_n R) j_1(\lambda_n R)} \exp^{-D_{ef} \lambda_n^2 t} j_0(\lambda_n r) \quad (24)$$

$$Y_{(L,t)placa} = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(\frac{-D_{ef} (2n+1)^2 t}{L^2}\right) \quad (25)$$

$$Y_{(L,R,x,t)esferoide} = Y_{(R,t)esfera} \times Y_{(L,t)placa} \quad (26)$$

onde,  $D_{ef}$  é o coeficiente de difusão efetivo ( $m^2/s$ ),  $R$  (m) é o raio médio da amêndoa,  $L$  (m) é a espessura da amêndoa e,  $t$  é o tempo (s).

Por sua vez, a energia de ativação foi obtida por meio da linearização da relação tipo Arrhenius, que descreve a dependência da  $D_{ef}$  com a temperatura conforme mostra a (Eq. 27).

$$D_{ef} = D_0 \exp^{\frac{E_a}{RT}} \quad (27)$$

onde  $E_a$  energia de ativação para difusão (J/mol),  $T$  temperatura (K) e  $R$  constante dos gases ideais (J/Kmol).



#### 4.6 AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA

Os parâmetros dos modelos de ajuste das cinéticas de secagem foram estimados através das funções do programa Matlab® R2021b (The Mathworks Inc., Natick, MA, USA). Para as análises de regressão foram usadas as funções “nlinfit” e “nlparci” considerando a alternativa “robust” de análise. A função nlinfit utiliza o algoritmo Gauss-Newton com modificações de Levenberg-Marquardt para estimar iterativamente os valores da resposta e recalculá-lo com base nos mínimos quadrados para um modelo não linear, enquanto a função nlparci estima os intervalos de confiança dos parâmetros do ajuste ( $\alpha = 95\%$ ).

O coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{adj}$ ) (Eq. 28), o erro médio quadrático (MSE) (Eq. 29) foram usados para avaliar a eficiência dos procedimentos matemáticos (VILLA-VÉLEZ et al., 2012).

$$R^2_{adj} = 1 - \left( \frac{n-1}{n-n_p} \right) (1 - R^2) \quad (28)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_i - X_i^*| \quad (29)$$

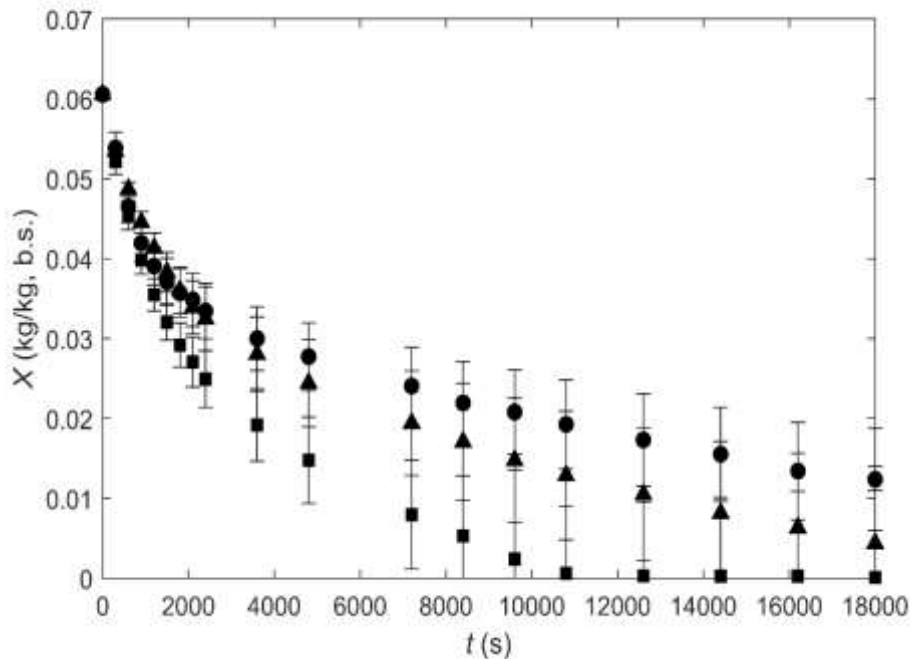
onde,  $X$  e  $X^*$  representam os valores experimentais e os valores calculados,  $n$  é o número de dados experimentais e  $n_p$  é o número de parâmetros do modelo.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CINÉTICAS DE SECAGEM

Foram realizadas as cinéticas de secagem das amêndoas de babaçu a três níveis de temperatura, sendo seus valores mostrados na Figura 8.

**Figura 8.** Curvas de secagem experimentais da amêndoa de babaçu nas temperaturas de 40°C (●), 50°C (▲) e 60°C (■). As linhas indicam os valores dos desvios padrões da quadruplicada.



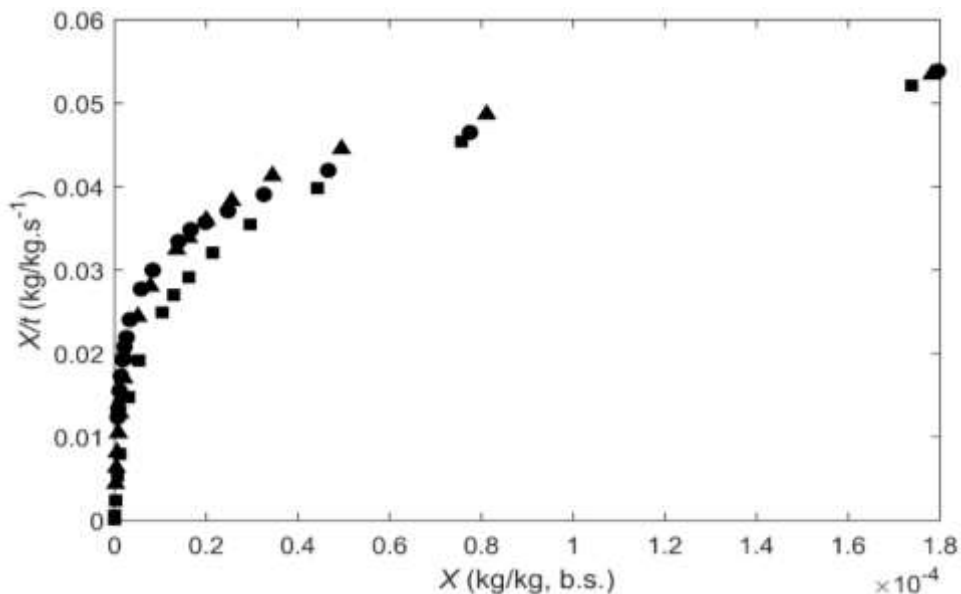
Fonte: Próprio Autor (2022).

Os resultados mostram valores do conteúdo de umidade na faixa de 0,061 kg/kg, b.s. até 0,012 kg/kg, b.s. para a temperatura de 40°C, de 0,061 kg/kg, b.s. para 0,004 kg/kg, b.s. na temperatura de 50°C e 0,061 kg/kg, b.s. até  $1,075 \times 10^{-4}$  kg/kg, b.s. para a temperatura de 60°C, sendo visto uma perda de água nas três temperaturas de 3,507%. O teor de água só apresentou variação significativa até 700 segundos, correspondendo em média a 12 minutos, de secagem para as três temperaturas, a causa da diminuição da secagem após esse período, pode ser atribuída ao pré-congelamento das amostras durante o tempo em que ficaram armazenadas. Pinedo (2003) ratifica que um congelamento lento gera mudanças estruturais no tecido e na membrana celular, pois o processo causa o rompimento das células e aumenta a porosidade do material, dessa maneira, possibilita uma melhor transferência de umidade no início do processo de secagem.

Observa-se também que a medida que aumenta a temperatura, mais pronunciadas são as curvas no gráfico, ou seja, a temperatura provoca um efeito de extrema relevância, visto que, com o seu aumento, o tempo de secagem vai apresentar um comportamento inverso. Esse fator é atribuído ao aumento da pressão de vapor dentro do produto, que resulta no aumento da taxa de transferência de massa para o ar de secagem. Esse comportamento também foi encontrado no trabalho feito por Silva (2016) que analisou a cinética de secagem de amostras de abóbora (*Cucurbita moschata*). Esse comportamento pode ser comprovado na temperatura de 60°C, que apresenta uma perda maior de água da amêndoa para o sistema e que demonstra atingir o equilíbrio de umidade após, aproximadamente, 233 minutos. Tempos próximos aos encontrados por Aral e Bese (2016) na secagem de frutos de espinheiro. Esse mesmo comportamento foi observado na literatura para outros frutos e alimentos (CAVALCANTE et al., 2020).

Além disso, a cinéticas de secagem obtidas mostram um período a taxa de decrescente (ver Figura 9), indicando que a maior quantidade de água foi retirada no início da secagem e que a água que não foi retirada do material é a água ligada nos interstícios da matriz do produto (Martins et al., 2014). A sua composição apresenta um teor de umidade igual a 5,71%, como encontrado por Lima (2021). Valor muito próximo ao encontrado por Sales et al., (2018), que chega a um percentual de 5,52. Justifica-se que o processo de desidratação tenha sido rápido, dentro do tempo de 5 horas conforme realizado experimentalmente.

**Figura 9.** Perfil do período de taxa de secagem da amêndoa de babaçu nas temperaturas de 40°C (●), 50°C (▲) e 60°C (■).



Fonte: Próprio Autor (2022).

## 5.2 MODELAGEM MATEMÁTICA

Os resultados obtidos nos ajustes dos modelos matemáticos empíricos fazendo o uso de dados experimentais, das cinéticas de secagem convectiva de amêndoas do babaçu, utilizando diferentes temperaturas do ar de secagem (40, 50 e 60°C) foram expressos na Tabela 1.

**Tabela 1.** Dados obtidos nos ajustes de modelos matemáticos na modelagem de cinética de secagem a 40, 50 e 60°C.

Modelos	Coeficiente	Temperatura		
		40°C	50°C	60°C
Weibull	$k_1$	6583,9	4916,1	2618,8
	$R^2_{adj}$	0,92	0,976	0,989
	$MSE$	0,007	0,005	0,002
Peleg	$k_1$	35729	45422	31205
	$k_2$	20,214	16,228	14,31
	$R^2_{adj}$	0,979	0,990	0,997
Henderson-Pabis	$MSE$	0,002	0,001	0,001
	$k_1$	0,782	0,853	0,928
	$k_2$	$9,292 \times 10^{-5}$	$1,49413 \times 10^{-4}$	$3,377 \times 10^{-4}$
Logaritmico	$R^2_{adj}$	0,881	0,963	0,990
	$MSE$	0,003	0,003	0,001
	$k_1$	0,634	0,78129	0,92252
Wang & Sing	$k_2$	$3,551 \times 10^{-4}$	$2,496 \times 10^{-4}$	$3,508 \times 10^{-4}$
	$k_3$	0,017	0,008	0,001
	$R^2_{adj}$	0,949	0,975	0,989
Lewis	$MSE$	0,002	0,002	0,001
	$k_1$	$5,299 \times 10^{-9}$	$5,429 \times 10^{-9}$	$7,84 \times 10^{-9}$
	$k_2$	$-1,318 \times 10^{-4}$	$-1,418 \times 10^{-4}$	$-1,871 \times 10^{-4}$
Page	$R^2_{adj}$	0,866	0,927	0,928
	$MSE$	0,007	0,006	0,008
	$k_1$	$1,519 \times 10^{-4}$	$2,031 \times 10^{-4}$	$3,820 \times 10^{-4}$
Page	$R^2_{adj}$	0,92	0,976	0,989
	$MSE$	0,007	0,005	0,002
	$k_1$	0,013	0,003	$1,68 \times 10^{-3}$
Page	$k_2$	0,487	0,653	0,808
	$R^2_{adj}$	0,989	0,996	0,996

	<i>MSE</i>	$1,008 \times 10^{-3}$	$8,813 \times 10^{-4}$	$9,257 \times 10^{-4}$
Midilli	$k_1$	91889	32,111	30,159
	$k_2$	-62008	-15,944	-16,351
	$k_3$	$-3,553 \times 10^{-6}$	$-4,096 \times 10^{-6}$	$-4,762 \times 10^{-6}$
	$R^2_{adj}$	0,878	0,888	0,888
	<i>MSE</i>	0,014	0,139	0,014
Exponencial de Dois Termos	$k_1$	0,256	0,179	0,109
	$k_2$	0,994	0,994	0,994
	$k_3$	0,736	0,813	0,883
	$k_4$	$8,332 \times 10^{-5}$	$1,377 \times 10^{-4}$	$3,111 \times 10^{-4}$
	$R^2_{adj}$	0,935	0,978	0,993
Aproximação por Difusão	<i>MSE</i>	$2,272 \times 10^{-3}$	$1,803 \times 10^{-3}$	$1,179 \times 10^{-3}$
	$k_1$	1,014	1,009	1,005
	$k_2$	$9,293 \times 10^{-5}$	$1,522 \times 10^{-4}$	$3,405 \times 10^{-4}$
	$k_3$	1,001	1,037	1,082
	$R^2_{adj}$	0,874	0,961	0,989
	<i>MSE</i>	$3,543 \times 10^{-4}$	$2,687 \times 10^{-3}$	$1,460 \times 10^{-3}$

Fonte: Próprio Autor (2022).

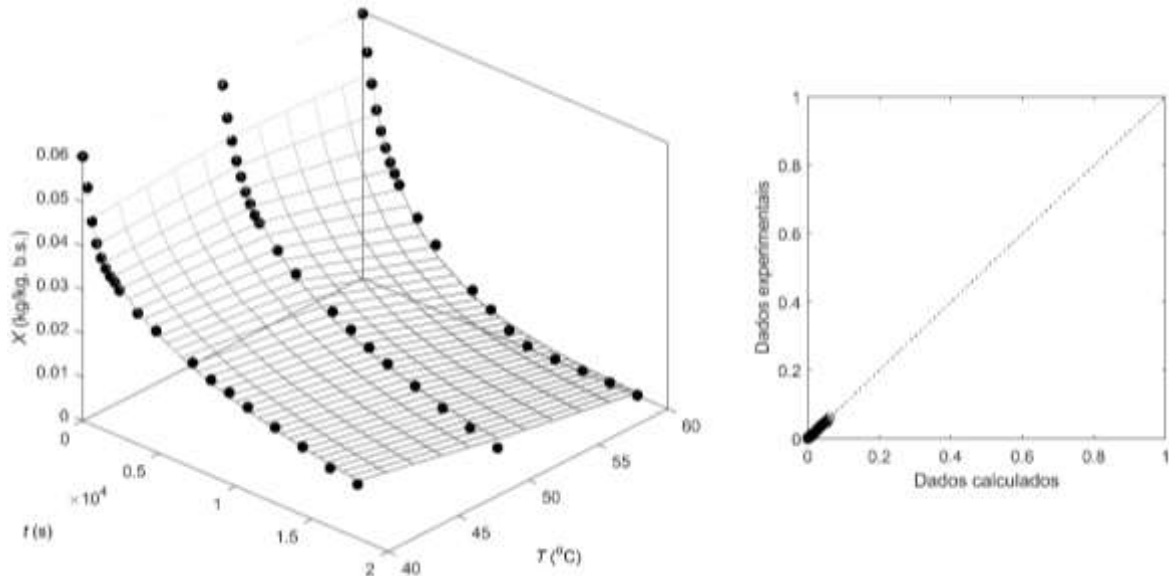
Analisando os parâmetros estatísticos das equações utilizadas, é possível observar que os modelos de Page, Peleg e Exponencial de Dois Termos apresentaram melhores ajustes aos dados experimentais que os demais modelos testados, podendo ser observado mediante os valores do coeficiente de determinação ( $R^2_{adj}$ ) que apresentaram valores iguais ou bem próximos de 0,99. Segundo Alves (2019), quanto maior for o coeficiente de determinação ( $R^2_{adj}$ ), ou seja, quanto mais próximo de 1, maior será a precisão e a confiabilidade do modelo matemático para a descrição da secagem. Quando os modelos apresentam  $R^2$  com valor superior a 91%, estes podem ser utilizados para prever com precisão o comportamento do produto com relação a perda de umidade durante o processo de secagem (ALMEIDA, 2009).

Apesar do coeficiente de determinação ( $R^2_{adj}$ ) ser importante, de acordo com Mohapatra e Rao (2005), não se estabelece um bom parâmetro para a representação da operação de secagem tendo-o por único critério. Por essa razão, é importante considerar o erro quadrático médio (MSE). Valores de MSE mais próximos de zero representam uma maior eficiência do modelo matemático testado para descrição da secagem convectiva.

A seleção do melhor modelo matemático tem a simples fundamentação no número de coeficientes. Portanto, mediante a realização desse estudo, dentre os três modelos que mais apresentaram precisão, o modelo de Page se destaca por seus parâmetros e coeficientes

estatísticos favoráveis, mas também por sua simplicidade e facilidade de aplicação (RESENDE et al., 2010). A Figura 10 mostra a representação comportamento do modelo de Page com os dados experimentais obtidos no trabalho.

**Figura 10.** Superfície de resposta dos valores experimentais (●) e simulados (malha) pelo modelo de Page e análise dos resíduos.



Fonte: Próprio Autor (2022).

Lescano (2009) ressalta que a equação de Page tem mostrado melhores ajustes quando aplicados em produtos alimentícios. Esse modelo também se mostrou eficiente em trabalhos para secagem de cascas de vegetais em diversas temperaturas e preparos pré-secagem. Telis et al. (2006) constata em seu estudo que o modelo de Page também se mostrou bem ajustado aos dados de secagem da uva Rubi, assim como Araújo et al. (2016) afirma que o modelo se ajustou de maneira positiva na secagem de acerola.

### 5.3 DETERMINAÇÃO DA ENERGIA DE ATIVAÇÃO

As dimensões das amêndoas de babaçu utilizadas para os cálculos e difusividade foram baseados em valores obtidos em estudo prévio realizado por Lima (2021) na produção de farinha extraída do coco babaçu como mostra na Tabela 2.

**Tabela 2.** Resultados obtidos a partir da caracterização física das amêndoas do babaçu.

Amostra	VOLUME (cm <sup>3</sup> )	Circularidade (%)	Esfericidade (%)	$\rho_{\text{real}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{\text{aparente}}$ (g/cm <sup>3</sup> )
Amêndoas Frescas	5,671 ±0,715	43,20±0,776	64,77±0,211	1,084±0,179	0,548±0,091

Fonte: Lima (2021).

Foi determinado o coeficiente de difusão empregando o produto da solução numérica de três geometrias, como descrito no item 4.5 sendo os resultados mostrados na Tabela 3.

**Tabela 3.** Resultados do coeficiente de difusão para geometria esferoide, placa infinita, cilindro infinito e esfera.

Geometria	Coefficiente	40 °C	50 °C	60 °C
Placa infinita	$D_{ef}$	$7,731 \times 10^{-2}$	$6,089 \times 10^{-2}$	$9,719 \times 10^{-2}$
	$R^2_{adj}$	0,960	0,984	0,993
Cilindro infinito	$D_{ef}$	$7,192 \times 10^{-10}$	$5,778 \times 10^{-10}$	$7,264 \times 10^{-10}$
	$R^2_{adj}$	0,697	0,709	0,894
Esfera	$D_{ef}$	$7,602 \times 10^{-10}$	$5,067 \times 10^{-10}$	$8,169 \times 10^{-10}$
	$R^2_{adj}$	0,884	0,917	0,984
Esferoide finito	$D_{ef}$	$7,510 \times 10^{-10}$	$4,994 \times 10^{-10}$	$8,052 \times 10^{-10}$
	$R^2_{adj}$	0,889	0,923	0,985

Fonte: Próprio Autor (2022).

Como observado na Tabela 3, os valores da difusividade têm uma magnitude de  $\times 10^{-2}$  para placa infinita e  $\times 10^{-10}$  para as demais geometrias. Verifica-se que para a geometria de placa infinita, o corte em formatos de lâminas apresenta uma maior difusividade efetiva, isso possivelmente está associado ao fato de que a área de troca térmica é menor, portanto, a área exposta ao ar quente é inferior, isso infere que a difusividade deva ser mais elevada à fim de induzir a evaporação da água presente no alimento. A relação exercida entre área/volume é predominante no processo de avaliação de difusividade, quanto maior for essa relação, mais rápido o sólido perde umidade (LIMA, 2017). Esse efeito, para o formato de cilindro finito, ocorre de maneira mais fácil devido ao aumento da área de transferência. Segundo Souza et al. (2020) a área superficial e a corrente de ar quente, são fatores que determinam a velocidade do processo de secagem. Os valores encontrados para as geometrias de cilindro infinito, esfera e esferoide são valores encontrados e que são característicos de produtos gramináceos como grãos de feijão-caupi. (MORAIS et al., 2013).

Além disso, não foi observado um efeito da temperatura sobre o coeficiente difusivo na temperatura de 50°C, sendo que a temperatura de 40 °C o valor do  $D_{ef}$  incrementou comparado com a temperatura de 60°C, aconteceu um incremento deste. Isto pode ser devido ao método experimental de pesagem em intervalos de tempo, permitindo que o ar quente da estufa se dissipasse, como também devido ao próprio material, sendo que a amêndoa de babaçu tem uma película (epicarpo) a qual tem características semipermeáveis (GUIMARÃES et al., 2009), o que em algumas amostras não permitia uma taxa difusiva maior quando a temperatura de secagem incrementava.

Uma vez encontrado o valor do coeficiente difusivo, a energia de ativação foi calculada através da linearização da equação de Arrhenius (Eq. 27), sendo seu valor de  $E_a = 19.593 \text{ J/mol}$  e  $D_0 = 1.102 \times 10^{-10}$  ( $R^2_{adj} = 0,054$ ). O valor de  $E_a$  define a energia mínima para que aconteça a evaporação da água na amêndoa, sendo este valor similar a produtos como a soja apresentando uma  $E_a = 16.600 \text{ J/mol}$  (GELY; GINER, 2007) e de grão de mamona encontrado por Gonelli et al. (2008) igual a  $15.250 \text{ J/mol}$ .



## 6 CONCLUSÃO

As curvas de secagem da amêndoa do coco babaçu apresentaram resultados compatíveis com a temperatura e taxa de secagem: quanto maior a temperatura, mais rápida a amostra submetida a secagem atinge o equilíbrio. Os modelos empíricos de Page, Peleg e Exponencial de Dois termos apresentaram resultados satisfatórios de secagem, sendo a equação de Page aquela que apresentou os melhores resultados. No modelo de difusão líquida da forma geométrica de esferoide não foi observado um efeito da temperatura sobre o coeficiente difusivo, sendo que a temperatura de 50°C apresentou uma diminuição do valor que não era esperado, devido a película que envolve a amêndoa. Para futuros trabalhos é recomendado: realizar a secagem com outras temperaturas e fazer a despeliculação da amêndoa, à fim de obter melhores valores de difusividade.

## REFERÊNCIAS

AJALA, A. S.; AJALA, F. A. A. **Study on Drying Kinetics of Shrimps**. International Journal of Innovation and Applied Studies, v. 9, n. 4, p. 1778-1785, 2014.

ALBIERO, D.; MACIEL, A. J. DA SILVA; LOPES, A. C.; MELLO, C. A.; GAMERO, C. A. **Proposta de uma máquina para colheita mecanizada de babaçu (*Orbignya phalerata* Mart.) para a agricultura familiar**. Acta Amazonica., Manaus, v. 37, n. 3, p. 337-346, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0044-59672007000300004>>. Acesso em: 27 mai. 2016.

ALVES, Jordana dos Santos. **Modelagem matemática de secagem da casca de abóbora moranga (*Cucurbita maxima*)**. 2019. 29 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Alimentos), IFECT, 2019.

AOAC. **Official methods of analysis** Gaithersburg: AOAC International 2007.

ARAL, S.; BEŞE, A. V. **Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* spp.): Effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity**. Food Chemistry, v. 210(1), p. 577-584, 2016.

ARAÚJO, C. S.; MACEDO, L. L.; VIMERCATI, W. C.; OLIVEIRA, A. N.; SARAIVA, S. H. **Cinética de secagem de acerola (*malpighia emarginata* dc) pelo processo foam-mat**. Revista Univap. p. 4. 2016.

ARAÚJO, E. C. Estado da arte e potencial do babaçu para a agroenergia. In Embrapa Meio-Norte-Artigo em **anais de congresso (ALICE)**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANTAS OLEAGINOSAS, ÓLEOS, GORDURAS E BIODIESEL, 5.; CLÍNICA TECNOLÓGICA EM BIODIESEL, 2., 2008, Lavras. Biodiesel: tecnologia limpa. Anais... Lavras: UFLA, 2008.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; FONTANA JR, A.J; SCHMIDT, S. J.; LABUZA, T. P. **Water activity in foods: fundamentals and applications**. Ames: Blackwell Publishing Profesional, 2007. 100 p.

BATISTA, C. P.; TORRES, O. J. M.; MATIAS, J. E. F.; MOREIRA, A. T. R.; COLMAN, D.; DE LIMA, J. H. F.; MACRI, M. M.; RAUEN JR. R. J.; FERREIRA, L. M.; DE FREITAS, A. C. T. **Efeito do extrato aquoso de *orbignya phalerata* (babaçu) na cicatrização do estômago em ratos: estudo morfológico e tensiométrico**. Acta Cirúrgica Brasileira [online]. 2006, v. 21, suppl 3. Acesso em: 14 jul 2022], pp. 26-32. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0102-86502006000900005>>.

BELTRÃO, N. E. DE M.; DA OLIVEIRA, M. I. P. **Oleaginosas Potenciais do Nordets para a Produção de Biodiesel**. 1º ed. 2007. p. 32 – EMBRAPA. Campina Grande, PB, 2007.

BIALIK, M.; GONDEK, E.; WIKTOR, A.; LATOCHA, P.; WITROWA-RAJACHERT. Mathematical modeling of *Actinidia rguta* (kiwiberry) drying kinetics. **Agricultural Engineering**, v. 21, n. 4, p. 5-13, 2017.

BRANDÃO, J.; LACA-BUENDIA, J.P.; MACEDO, J.F. **Árvores nativas e exóticas do estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: EPAMIG, 2002. 528 p.

BRENNAN, J. G. **Food processing handbook**. Weinheim: Wiley-VCH, 2006. 119

CAGLIARI, A.; MARTINY, T. R.; NASCIMENTO, R.; MORAIS, M. M.; ROSA, G. S. **Effects of diferente drying conditions on bioactive potential of Brazilian olive leaf**. Brazilian Journal of Food Tchnology, Campinas. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1981-6723.14721>>. Acesso em: 29 mai. 2022.

CALÍN-SÁNCHEZ, Á., LIPAN, L., CANO-LAMADRID, M., KHARAGHANI, A., MASZTALERZ, K., CARBONELL-BARRACHINA, Á. A., FIGIEL, A. (2020). **Comparison of traditional and novel drying techniques and its effect on quality of fruits, vegetables and aromatic herbs**. Foods. 2020. 9(9), 1261. PMid:32916839. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/foods9091261>>. Acesso em 29 mai. 2022.

CARNEIRO, B. L. A.; ARÉVALO-PINEDO, A.; SCARTAZZINI, L.; ZUNINGA, A. D. G.; PINEDO, R. A. **Estudo da estabilidade do extrato hidrossolúvel "leite" de babaçu (*Orbygnia speciosa*) pasteurizado e armazenado sob refrigeração**. Revista Brasileira de Fruticultura [online]. 2014, v. 36, n. 1 p. 232-236. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0100-2945-334/13>>. Acesso em: 12 Jul. 2022.

CARRAZZA, L. R.; SILVA, M. L.; ÁVILA, J. C. C. **Manual Tecnológico de Aproveitamento Integral do Fruto do Babaçu**. Brasília – DF. Instituto Sociedade, População e Natureza (ISPN). Brasil, 2012.

CAVALCANTE, A. M. M.; ALMEIDA, R. D.; MELO, A. M.; MORAIS, B. A.; SILVA, I. R.; RIBEIRO, N. L.; ALEXANDRE, H. V.; SILVA, O. S. **Modelos de predição da cinética de secagem dos grãos da algaroba**. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 6, n. 3, p. 11192-11209 mar. 2020. ISSN 2525- 8761.

CLEMENTE, G. BON, J.; GARCÍA-PÉREZ, J. V.; MULET, A. **Natural convection drying at low temperatures at previously frozen salted meat**. Drying Technology, New York, v. 25, n. 11, p. 1885-1891, 2007.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. London: Claredon Press Oxford, 1975. 75 p.

DE OLIEVIRA CARLESSO, V.; BERBERT, P. A.; DA SILVA, R. F.; VIANNA, A. P.; DETMANN, E.; DIONELLO, R. G. **Secagem de sementes de maracujá em camada delgada**. Revista Brasileira de Fruticultura [Online]. 2005, vol. 27, n. 3, p. 444-448. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-29452005000300025>>. Acesso em: 01 Jun. 2022.

DOURADO, J. R.; BOCLIN, R.G. **A indústria do Maranhão: um novo ciclo**. Brasília: IEL, 2008. Disponível em:<[https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer\\_public/7d/35/7d35b539-822c-461d-b5ca-f0a1b14996a1/20121101181107766750e.pdf](https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/7d/35/7d35b539-822c-461d-b5ca-f0a1b14996a1/20121101181107766750e.pdf)>. Acesso em 27 mai. 2022.

FAÇANHA, M.S.L.; VIEIRA, A.H. **Produção e biometria de frutos de babaçu (*Attalea speciosa* Mart. ex Spreng.)**. In: Encontro de Iniciação à Pesquisa da Embrapa Rondônia, 2., 2011, Porto Velho. Anais... Porto Velho: Embrapa Rondônia, 2011. 70p. (Embrapa Rondônia. Documentos, 146). p.32.

FELLOWS P. J. **Tecnologia do Processamento de Alimentos: Princípios e prática**. Tradução: Florencia Cladera Oliveira et al – 2º edição – Porto Alegre: Artmed, 2006.

FERREIRA, A. M. N. **O total aproveitamento do coco babaçu (*Orbignya oleifera*)**. 2011. f 27. p 11. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de Brasília, Faculdade de Licenciatura em Biologia. Brasília, 2011.

FILHO, E. C, et al. Economia Solidária: A Realidade das quebradeiras de coco babaçu no interior do Brasil. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 11, n.4, p. 1239-1257, 2018.

FORSON, F. K.; NAZHA, M. M. A.; AKUFFO, F. O.; RAJAKARUNA, H. **Desing of mixed-mode natural convection solar crop dryers: application of principles and rules of thumb**. *Renewable Energy*, Oxford, v. 32, n. 14, p. 2306-2319, 2007.

GELY, M. C.; SANTALLA, E. M. **Moisture diffusivity in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) seeds: Effect of air temperature and initial moisture content of seeds**. *Journal of Food Engineering*, v. 78, p. 1029-1033, 2007.

GOMES, M.S. **Potencial tecnológico da farinha da amêndoa do coco babaçu (*Orbignya Sp*) e sua secagem convectiva em leito fixo**. 2017. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências de Alimentos) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas. São José do Rio Preto, 2017.

GONELI, A. L. D.; CORREA, P.; BOTELHO, F. M.; DE OLIVEIRA, G. H. H. **Propriedades físicas dos frutos de mamona durante a secagem**. *Revista Brasileira de Armazenamento*, Viçosa, v. 33, n. 2, p. 148-155, 2008.

GUIMARÃES, A. R. C.; SOUZA, V. A. B. de; COSTA, M. do P. S. D.; ARAÚJO, E. S. de.; SOUSA, J. P. B.; GOMES, S. O.; SITTOLIN, I.; ARAÚJO, E. C. E. **Características físicas de frutos e amêndoas de diferentes acessos de babaçu (*Orbignya phalerata* Mart.)**. In: Embrapa Meio-Norte-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MELHORAMENTO DE PLANTAS, 5., 2009, Guarapari. O melhoramento e os novos cenários da agricultura: **anais**. Vitória: Incaper, 2009., 2009.

GOUVEIA, V. M. 2015. **O mercado de amêndoas de babaçu no estado do Maranhão**. Tese de Doutorado em Ciências Florestais, Publicação PPGEFL.TD-056/2015. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 127 p.

HALL, C. W. **Drying and storage of agricultural crops**. Westport: AVI Publishing Company, 1980. 100 p.

HACIHAFIZOGLU, O.; CIHAN, A.; KAHVECI, K.; LIMA, A. G. B. A liquid diffusion model for thin-layer drying of rough rice. **European Food Research Technology**, v. 226, p. 787-793, 2008.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura**. Fonte: Brasil, 2020.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ – **Métodos Físico-Químicos para análises de alimentos**. Coordenadores Odair Zenebon, Neus Sadocco Pascuet e Paulo Tiglea – São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008 p. 1020.

KAR, S.; CHEN, X. D.; ADHIKARI, B.; LIN, S.X.Q. **The impact of various drying kinetics models on the prediction of sample temperature-time and moisture content-time profiles during moisture removal from stratum corneum**. Chemical Engineering Research and Desing, London, v. 86, p. 1-17, 2008.

KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L. G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v. 78, n. 1, p. 98-108, 2007.

KROKIDA, M. K.; MARINOS-KOURIS, D. Rehydration kinetics of dehydrated products. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 57, p. 1-7, 2003.

KUMAR, C.; KARIM, M. A.; JOARDDER, M. U. H. **Intermittent drying of food products: a critical review**. Journal of Food Engineering, 121: 48-57, 2014.

LEMOS, M. R. B. **Caracterização e estabilidade dos compostos bioativos em amêndoas de baru (*Dipteryx alata* Vog.), submetidas a processo de torrefação**. 2012. 145 f., il. Tese (Doutorado em Ciências da Saúde) — Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

LESCANO, C. A. A. **Análise da secagem de resíduo de leite de soja “okara” em secadores de leite de jorro e de cilindro rotativo assistido a microondas**. 2009. 163f. Tese de Doutorado - UNICAMP/FEQ, Campinas, 2009.

LIMA, C.B. **Produção de farinha como alternativa para o processamento de amêndoas do coco babaçu**. 2021. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2021.

LIMA, J.R.O.; SILVA, R. B. S.; SILVA, C. C. M.; SANTOS, L. S. S.; SANTOS JUNIOR, J. R.; MOURA, E. M.; MOURA, C. V. R. **Produção de biodiesel a partir de potenciais oleaginosas do Nordeste**. 2007. Disponível em: <<http://sec.s bq.org.br/cdrom/30ra/resumos/T1238-1.pdf>> 2007a. Acesso em 28 mai. 2020.

LIMA, W. M. P. B. DE., **Transferência de calor e massa em sólidos porosos com geometria complexa via análise concentrada: Modelagem e simulação**. Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, 2017. 105 p. Dissertação (Mestrado).

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas do Brasil**. 3.ed. Nova Odessa, Plantarum, v.1, 2002. 352 p.

MACHADO, G. C.; CHAVES, J. B. P.; ANTONIASSI, R. **Composição em ácidos graxos e caracterização física e química de óleos hidrogenados de coco babaçu**. Revista Ceres, Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, v.53, n.308, p. 463-468, jul./ ago. 2006.

MARTINS, J. J. A., MARQUES, J. I., SANTOS, D. C., & ROCHA, A. P. T. **Modelagem matemática da secagem de cascas de mulungu**. Bioscience Journal, v. 30(6), p. 1652- 1660, 2014.

MIDILLI, A., KUCUK, H., YAPAR, Z. **A new model for single-layer drying**. Drying Technology, v. 20, p. 1503-1513, 2002.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Babaçu: *Attalea spp.* MART**. Série: Boas Práticas de manejo para o extrativismo sustentável orgânico). Brasília: MAPA/ACS, 24 p. 2012. Disponível em: <[https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/organicos/arquivos-publicacoes-organicos/boas\\_praticas\\_de\\_manejo\\_para\\_o\\_extrativismo\\_sustentavel\\_organico\\_do\\_babacu.pdf](https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/organicos/arquivos-publicacoes-organicos/boas_praticas_de_manejo_para_o_extrativismo_sustentavel_organico_do_babacu.pdf)>. Acesso em 28 mai. 2022.

MIQCB. Site Institucional. Disponível em: < <https://www.miqcb.org/>>. Acesso em: 28 mai. 2022.

MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. **A thin layer drying model of parboiled wheat**. Journal of Food Engineering, v. 66, n. 4, p. 513-518, 2005.

MORAIS, S. J. S.; DEVILLA, I. A.; FERREIRA, D. A.; TEIXEIRA, I. R. **Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.)**. Revista Ciência Agronômica, v. 44, n. 3, p. 455-463, jul-set, 2013 Centro de Ciências Agrárias - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.

PEREA-FLORES, M. J.; GARIBAY-FEBLES, V.; CHANONA-PÉZEZ, J.; CALDERÓN-DOMINGUEZ, G. **Mathematical modelling of castor oil seeds (*Ricinus communis*) drying kinetics in fluidized bed at high temperatures**. Industrial Crops and Products, 38: 64-71, 2012.

PINEDO, A. A. **Secagem a vácuo de cenoura (*Daucus carota*) e abóbora (*Cucurbita máxima*): Estudo das características do processo**. 2003. 173 f. Tese (doutorado) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

PORTO, M.J. **Estudo Preliminar de Dispositivo de Quebra e Caracterização dos Parâmetros Físicos do Coco Babaçu**. 2004. 75 f. Dissertação (Mestrado Profissional) Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, 2004.

QUEIROGA, V. P., GIRÃO, E. G.; ARAÚJO, I. M. S.; GONDIM, T. M. S., FREIRE, R. M. M.; VERAS, L. G. C. **Composição centesimal de amêndoas de coco babaçu em quatro tempos de armazenamento**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.17, n.2, p.207-213, 2015.

QUEIROZ, D. M.; PEREIRA, J. A.; MELO, E. C. **Modelos matemáticos de simulação de secagem de grãos**. Viçosa: Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, 1985. 59 p.

- RATTI, C. **Advances in food dehydration**. New York: Taylor & Francis Group, 2009. 50 p.
- RESENDE, O.; FERREIRA, L. U.; ALMEIDA, D. P. **Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão Adzuki (*Vigna angularis*)**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v. 12, n. 2, p.171-178, 2010.
- RIZVI, S. S. H. **Thermodynamic properties of foods in dehydration**. Engineering properties of foods. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2005. 340 p.
- ROBERTS, J. S.; KIDD, D. R.; PADILLA-ZAKOUR, O. **Drying kinetics of grape seeds**. Journal of Food Engineering, Essex, v. 89, p. 460-465, 2008.
- SALES, A. R., et al. Avaliação da qualidade da amêndoa do coco de babaçu provenientes de Anapurus-MA. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, Pombal, PB, v. 12, n.3, p.01, 2018.
- SILVA, B. S. **Estudo cinético de secagem de abóbora (*cucurbita moschata*) in natura e submetida ao congelamento**. 2016. 55 f. Tese (doutorado) – Universidade Federal da Paraíba, Paraíba
- SILVA, G. N.; EVARISTO, A. B.; GROSSI, J. A. S.; CAMPOS, L. S.; CARVALHO, M. S.; PIMENTEL, L. D. **Secagem em frutos de macaúba e sua influência na qualidade do óleo**. Semina: Ciências Agrárias, 38: 3019-3030, 2017.
- SILVA, R. C. **Plantas da Amazônia na saúde bucal**. 2ª ed. Rio Branco, AC: Ed. do autor, 2011.
- SOLER, M.P; VITALI, A.A.; MUTO, E.F. **Tecnologia de quebra do coco babaçu (*Orbignya speciosa*)**. Ciência e Tecnologia de Alimentos, v.27, n.4, p.717-722, 2007.
- SOUSA, M. B.; PEDROZA, J.P.; BELTRÃO, N.E. M.; SEVERINO, L.S.; DANTAS, F.P. **Cinética de secagem do farelo de mamona**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v.8, n.2, p.139-146, 2006.
- SOUZA, T. L.; EVANGELISTA, M. E. M.; FERNANDES, M. M. S.; SANTOS, K. P.; RODRIGUES, J. J. **Processo de secagem solar e transferência de massa em amostras de mandioca**. Brazilian Journal of Development. Curitiba, v. 6, n. 11, p. 86647-86657. Nov. 2020.
- SRIKIATDEN, J.; ROBERTS, J. S. **Measuring moisture diffusivity of potato and carrot (core and cortex) during convective hot air and isothermal drying**. Journal of Food Engineering, Essex, v. 74, p. 143-152, 2006.
- TELIS, V.R.N.; LOURENÇO, V.A.; GABAS, A.L.; TELIS-ROMERO, J. **Taxas de secagem de uva rubi submetida a pré-tratamentos químicos para a produção de passas**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.41, n.3, p.503-509, 2006.
- TERRA, N. N.; FREITAS, R. J. S.; CICHOSKI, A. J. **Atividade de água, pH, umidade e desenvolvimento de *Staphylococcus xylosus* durante o processamento e armazenamento da paleta suína curada, maturada e fermentada**. Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas, p. 756-760, out.-dez. 2007.

TREYBALL, R. E. **Operações de Transferência de Massa**. 2ª ed. Editora McGraw-Hill. 1968.

VILLA-VÉLEZ, H. A.; VÁQUIRO, H. A.; BON, J.; TELIS-ROMERO, J. **Modelling Thermodynamic Properties of Banana Waste by Analytical Derivation of Desorption Isotherms**. International Journal of Food Engineering, v. 8, n. 1, p. 1-21, 2012