



**KARINY AZEVEDO DA SILVA**

**ESTUDO DA CINÉTICA DE SECAGEM DA AMÊNDOA DA  
MACAÚBA (*Acromia aculeata*)**

**KARINY AZEVEDO DA SILVA**

**ESTUDO DA CINÉTICA DE SECAGEM DA AMÊNDOA DA  
MACAÚBA (*Acromia aculeata*)**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de 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.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Audirene Amorim Santana

São Luís  
2018

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

Azevedo da Silva, Kariny.

ESTUDO DA CINÉTICA DE SECAGEM DA AMÊNDOA DA MACAÚBA  
Acromia aculeata / Kariny Azevedo da Silva. - 2018.  
45 f.

Orientador(a): Audirene Amorim Santana.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Química,  
Universidade Federal do Maranhão, UFMA, 2018.

1. CINÉTICA. 2. MACAÚBA. 3. SECAGEM. I. Amorim  
Santana, Audirene. II. Título.

# **ESTUDO DA CINÉTICA DE SECAGEM DA AMÊNDOA DA MACAÚBA (*Acromia aculeata*)**

**KARINY AZEVEDO DA SILVA**

Aprovado em: **12/07/2018**

**Orientador:**

---

Prof. Dr. Audirene Amorim Santana  
Universidade Federal do Maranhão. São Luís, MA

**Examinadores:**

---

Prof. Me. Louryval Coelho Paixão  
Universidade Federal do Maranhão. São Luís, MA

---

Prof. Dr. Victor Elias Mouchrek Filho  
Universidade Federal do Maranhão. São Luís, MA

## **DADOS CURRICULARES**

**Nome completo do autor**

**NASCIMENTO** 12/10/1993 – GOIÂNIA / MA

**FILIAÇÃO** Hélio da Silva Rocha  
Maria de Fátima Azevedo Coelho

**2011/2018** Curso de Graduação  
Engenharia Química - Universidade Federal do Maranhão

Dedico este trabalho à minha querida mãe, que sempre esteve ao meu lado me mostrando como ser a melhor mãe do mundo.

## **AGRADECIMENTOS**

Antes de tudo, o que seria de mim se não fosse Ele, então agradeço a Deus por tudo que tem me dado e me ensinado.

Aos professores que fizeram parte da minha graduação e fizeram a diferença nos seus devidos papéis.

A minha orientadora, Prof. Audirene Amorim Santana, pelo incentivo, orientação e auxílio.

Aos meus amigos José, Sara, Alan, Ana Beatriz, Gabriel, que estiveram presentes nos momentos alegres e tristes, sendo fonte contínua de apoio e incentivo.

Um especial ao Layrton que me ajudou muito na realização deste trabalho, obrigada pelas horas de dedicação e paciência.

“Inteligência é a habilidade de se adaptar às mudanças”

*Stephen Hawking*

SILVA, Kariny Azevedo. **Estudo da Cinética de Secagem da Amêndoa Macaúba (*Acromia Aculeata*)**. 2018. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

## RESUMO

A macaúba (*Acrocomia aculeata*) é uma palmeira arborescente perene, frutífera, nativa de florestas tropicais, tipicamente brasileira e com ampla distribuição geográfica. O fruto é composto uma amêndoa oleaginosa envolvida por um endocarpo rígido e fortemente aderida à polpa (mesocarpo). Devido ao alto teor de óleo na amêndoa da macaúba o interesse de exploração desse fruto tem aumentado e junto com ele a necessidade do estudo de suas propriedades para o aprimoramento de técnicas de produção, colheita, armazenamento, dentre outros. Para um processo mais eficiente de armazenamento e conservação, torna-se necessário a aplicação de processos que irão garantir a qualidade da amêndoa, dentre eles está a secagem. Esta consiste na retirada de água do material ou alimento de estudo para diminuição da atividade de água que influencia diretamente na proliferação de microrganismos em alimentos. No presente trabalho foi realizado o estudo da secagem da amêndoa da macaúba utilizando um secador de bandejas convectivo nas temperaturas de 40°C, 50 °C, 60 °C e 70 °C com velocidade do ar de secagem de 1,1 m/s. A geometria das amostras foi considerada constantes se aproximando de uma esfera. Os dados experimentais da secagem da amêndoa foram ajustados para cinco equações (teórica, semiempíricas e empíricas), Modelo de Midilli, Page, Henderson-Pabis, Lewis e Weibull, frequentemente utilizadas para representação da secagem de produtos agrícolas. Quando conjugados os modelos matemáticos para o estudo da cinética de secagem aquele que apresentou um melhor ajuste dos dados resultando em um coeficiente de regressão ( $R^2$ ) superior a 0,96 foi o modelo de Midilli et al. para todas as temperaturas estudadas.

Palavras chave: Secagem, Macaúba, Convecção.

SILVA, K. A. **Study of Drying Kinetics of the Macaúba Almond (*Acromia Aculeata*)**. 2018. 46 f. Graduate Work (Graduate in Chemical Engineering) – Curso de Engenharia do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

#### **ABSTRACT**

The macaúba (*Acrocomia aculeata*) is a perennial, fruity, arboreal palm native to tropical forests, typically Brazilian and with a wide geographic distribution. The fruit is composed of an oleaginous almond surrounded by a rigid endocarp and strongly adhered to the pulp (mesocarp). Due to the high oil content in the macaúba almond the interest in the exploitation of this fruit has increased and along with it the need to study its properties for the improvement of techniques of production, harvesting, storage, among others. For a more efficient process of storage and conservation, it is necessary to apply processes that will guarantee the quality of the almond, among them is the drying. This consists of withdrawing water from the study material or food to decrease the water activity that directly influences the proliferation of microorganisms in food. In the present work the macaúba almond drying was studied using a dryer of convective trays at temperatures of 40°C, 50°C, 60°C and 70°C with drying air velocity of 1.1 m / s. The geometry of the samples was considered constant approaching a sphere. The experimental data on the drying of the almond were adjusted to five equations (theoretical, semiempirical and empirical), Midilli Model, Page, Henderson-Pabis, Lewis and Weibull, often used to represent the drying of agricultural products. When the mathematic models were conjugated for the study of drying kinetics, the one that presented a better adjustment of the data resulting in a coefficient of regression ( $R^2$ ) superior to 0,96 was the model of Midilli et al. for all temperatures studied.

Keywords: Drying, Macaúba, Convection.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Palmeiras de macaúba.....	16
Figura 2 - Composição do fruto da macaúba.....	18
Figura 3 - Representação da movimentação da água durante a secagem.....	21
Figura 4 - Curvas teóricas de secagem.....	22
Figura 5 - Esquema de um secador por convecção.....	27
Figura 6 - Amêndoa da Macaúba em uma bandeja de alumínio.....	30
Figura 7 - Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem da amêndoa às temperaturas de 40°C a 70°C de acordo com o modelo de Weibull.....	37
Figura 8 - Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem da amêndoa às temperaturas de 40°C a 70°C de acordo com o modelo de Lewis.....	38
Figura 9 - Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem da amêndoa às temperaturas de 40°C a 70°C de acordo com o modelo de Page.....	38
Figura 10 - Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem da amêndoa às temperaturas de 40°C a 70°C de acordo com o modelo de Henderson - Pabis.....	39
Figura 11 - Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem da amêndoa às temperaturas de 40°C a 70°C de acordo com o modelo de Midilli et al.....	39

## SUMÁRIO

FOLHA DE APROVAÇÃO.....	III
DADOS CURRICULARES.....	V
DEDICATÓRIA.....	VI
AGRADECIMENTOS.....	VII
EPÍGRAFE.....	VIII
RESUMO.....	IX
ABSTRACT.....	X
LISTA DE TABELAS.....	XI
SUMÁRIO.....	XII
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>15</b>
2.1 Objetivo geral .....	15
2.1 Objetivos específicos.....	15
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
3.1 Palmeira.....	16
3.2 O fruto.....	17
3.3 Secagem.....	18
3.3.1 Teor de água nos alimentos .....	19
3.3.2 Curvas de secagem .....	20
3.3.3 Modelagem do processo de secagem.....	22
3.3.3.1 Modelagem do período a taxa constante .....	23
3.3.3.2 Modelagem do período a taxa decrescente.....	24
3.3.3.3 Modelos empíricos empregados para análise no período de taxa decrescente.....	24
3.3.5 Técnicas de secagem .....	26
3.3.5.1 Secagem convectiva .....	27
3.3.6 Vantagens da secagem.....	28
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>29</b>
4.1 Local da Pesquisa .....	29
4.2 Coleta, Amostragem e Higienização dos Frutos .....	29
4.3 Descascamento, Retirada da Amêndoa e Armazenamento .....	29
4.4 Processo de Secagem.....	30
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>34</b>

5.1 Cinética de secagem .....	34
5.2 Modelagem da cinética de secagem .....	34
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>40</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>41</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A macaúba é uma palmeira de ampla distribuição, que se estende do México a Argentina; embora sua ocorrência seja mais abundante nas Antilhas, Costa Rica, Paraguai e Brasil (RETTORE; MARTINS, 1993). No Brasil, ocorre desde os estados de São Paulo e Rio de Janeiro, passando por Minas Gerais, toda região Centro-Oeste, pelo Nordeste e Norte do Brasil, sendo também encontrada na região sul (AQUINO *et al.*, 2008).

Na década de 80 que a pesquisa com a macaúba ganhou mais destaque, com a implementação do Pro-óleo, programa que previa a produção de óleos vegetais em larga escala para substituir o óleo diesel no Brasil. Nesse período, Hebert Martins, pesquisador da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC, liderou o mais significativo estudo de produção e qualidade do coco macaúba no Estado de Minas Gerais. Na ocasião, foi identificado um potencial de produção de 90 mil toneladas de fruto em macaubais nativos em três regiões, sendo 20 mil em Belo Horizonte, 60 mil em Abaeté e 10 mil em Brasília de Minas. Levantamento realizado em macaubais nativos, em solos de média fertilidade, encontrou uma produção 70 a 80 kg de frutos/árvore/ano, o que permitiu estimar que em plantios racionais com 216 plantas/ha podia-se esperar uma produtividade entre 3175 e 4968 kg/ha/ano de óleo, considerando-se um rendimento de 21% na extração. Ressaltando que esta produtividade poderia aumentar muito por meio de manejo adequado, redução do espaçamento e programas de melhoramento da espécie (Brasil, 1985).

Antes da produção de qualquer produto a partir de um alimento como a macaúba, os processos da retirada até a chegada do produto à fábrica têm que ser otimizados ao máximo para se obter bons resultados. Colheita, armazenamento e transporte são algumas das principais etapas de pré-produção que precisam ser executadas com cuidados específicos. Para que o armazenamento de um produto alimentício não cause nenhum dano às suas propriedades naturais, é utilizada a técnica de secagem.

A secagem é um processo de remoção de umidade de um produto, através da evaporação da água livre contida no mesmo, podendo ser essa remoção por uma fonte de aquecimento (McCORMICK *et al.*, 1983). Nos processos que envolvem a utilização de ar quente, ocorre transferência de calor do ar para o produto, uma vez que existe um gradiente de temperatura. Ao mesmo tempo, há transferência de massa para o ar na forma de vapor de água (PIAIA, 2009). Esse fenômeno é regido pela 2ª Lei de Fick em regime não estacionário, ao passo que a Lei de Fourier está relacionada à transferência de calor. Há também modelos, do tipo empíricos, que podem ser usados para prever o comportamento da perda de

umidade em função do tempo, como o de Peleg, Page, Lewis etc.

É importante ressaltar também que a realização de novas pesquisas em busca da viabilidade e qualidade da secagem de amêndoas de macaúba pode contribuir para o desenvolvimento de produtos industrializados de maior valor agregado (por exemplo, o biodiesel de óleo de macaúba). Assim, é importante estudar algumas variáveis que incidem sobre o processo, a fim de determinar o melhor método de secagem e também a modelagem matemática. A partir disto, pode-se determinar as condições ótimas de operação que possa permitir avaliar a eficiência da produção e a obtenção de um produto de qualidade.

Assim, visando aprimorar o conhecimento sobre este produto de origem vegetal, este trabalho estuda o processo de secagem da amêndoa de macaúba para obter os parâmetros dos modelos cinéticos de secagem deste produto.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Estudar e modelar as cinéticas de secagem da amêndoa da macaúba (*Acromia aculeata*) através de modelos empíricos.

### **2.1 Objetivos específicos**

- Estudar a cinética de secagem da amêndoa de macaúba nas temperaturas de 40°C, 50°C, 60°C e 70°C.
- Selecionar qual temperatura e tempo de aplicação de secagem convectiva que exerce efeito significativo sobre a secagem de amêndoa de macaúba, tais como: teor de água, atividade de água, tempo de secagem, taxa de secagem e difusividade efetiva da água;
- Aplicar modelos empíricos de secagem na simulação das cinéticas de secagem da amêndoa de macaúba.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A preocupação com o meio ambiente e obtenção de energias renováveis aumenta a cada dia e por conta disso a pesquisa para que essas fontes alternativas sejam exploradas corretamente e cada vez em maior escala do que em relação a exploração de combustíveis fósseis e não renováveis tem ganhado cada vez mais importância. Entre as muitas espécies de plantas existentes no Brasil entra-se a macaúba que possui um grande valor exploratório.

#### 3.1 Palmeira

A macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lood. ex Mart.) é uma palmeira arborescente (Figura 1), perene, frutífera, nativa de florestas tropicais, tipicamente brasileira e com ampla distribuição geográfica. No Brasil ocorre nos estados do Ceará, Minas Gerais, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, São Paulo e por toda região Sul. São palmeiras monóicas que apesar de autocompatíveis realizam fecundação cruzada entre indivíduos diferentes, revelando sistema reprodutivo misto (SCARIOT et al., 1995).

**Figura 1** - Palmeiras de macaúba



Fonte: REPRODUÇÃO INTERNET (Wikipédia).

Por ser de tão grande dispersão geográfica no Brasil, esse coco acabou sendo conhecido por diferentes nomes regionalizados, sendo que algumas variações podem ter surgido devido à questão do sotaque da língua como, macaúba, macaíba, macajuba e macaiúva. Além desses nomes, o fruto da *Acrocomia aculeata* também é conhecido como bocaiúva, bacaiuveira, bacaiúva, coco-babão, coco-baboso, coco-de-catarro, coco-de-espinho,

coco-de-espinha, coco-xodó, imbocaia, macaibeira, macaiá, mocajá, macauveira, macujá, macujazeiro, marcová, mucajá e umbocaiúva (ARISTONE, 2006; BRASIL, 2002).

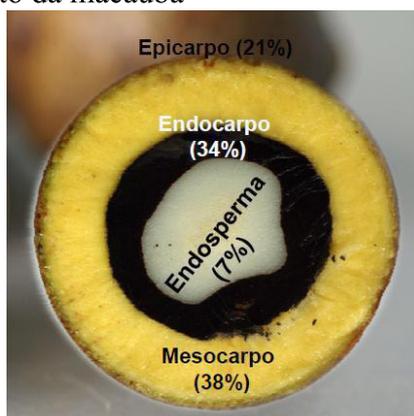
De acordo com Lorenzi e Negrelle (2006) a palmeira macaúba (*Acrocomia aculeata*) nativa das florestas tropicais atinge de 10 a 15 m de altura e 20 a 30 cm de diâmetro. A região dos nós é coberta de espinhos escuros, pontiagudos com cerca de 10 cm de comprimento. As folhas verdes, ordenadas em diferentes planos dando um aspecto plumoso à copa, são pinadas com comprimento variando de 4 a 5 m, apresentando aproximadamente 130 folíolos de cada lado e espinhos na região central, apresentam ainda cachos de frutos de tom marrom-amarelado.

### 3.2 O fruto

O fruto da macaúba é esférico ou ligeiramente achatado, liso e de coloração marrom-amarelada quando maduro, medindo entre 3,5 – 5,0 cm de diâmetro. Contêm uma amêndoa oleaginosa envolvida por um endocarpo rígido e fortemente aderida à polpa (mesocarpo) (COSTA, 2009). Essa amêndoa é oleaginosa e comestível, apresentando em seu interior de um a três embriões viáveis (MIRISOLA FILHO, 2009). A polpa é amarela ou esbranquiçada, rica em óleo, fibra e mucilagem, sendo também comestível. Além disso, possui uma semente envolvida por endocarpo duro e escuro com aproximadamente 3 mm de espessura e um epicarpo que quando maduro é rompido facilmente (COSTA, 2009).

O rendimento de frutos por planta é influenciado pela idade da palmeira, tratamentos culturais, condições climáticas, ataques de insetos e microrganismos, etc. Além da produção variar de palmeira para palmeira, também varia de ano para ano. Geralmente ocorre uma boa produção no primeiro ano, uma produção regular no segundo ano e uma reduzida produção no terceiro ano, retornando com uma produção abundante no ano seguinte (SILVA, 2007).

Embora haja uma variação considerável para as várias regiões de ocorrência, a composição média do fruto da macaúba, em peso, pode ser expressa, percentualmente, na base seca: epicarpo 21%, mesocarpo 38%, endocarpo 34% e amêndoa 7% (Figura 2) (CARVALHO, et al., 2011).

**Figura 2** - Composição do fruto da macaúba

Fonte: CARVALHO et al. (2011).

A Macaúba apresenta uma grande variedade de aplicação desde a polpa até amêndoa, é indicada como uma das principais matérias primas na indústria de biodiesel, por sua alta produtividade, alta combustão e por ser pouco poluente (TELES, 2009). As tortas produzidas a partir do processamento da polpa podem ser aproveitadas na nutrição animal e/ou como adubo (CICONINI, 2012). Outro importante subproduto é o endocarpo, que pode ser utilizado como carvão por apresentar elevado poder calorífico (BOAS et al., 2010). Além de o fruto poder ser consumido *in natura*, pode-se extrair o óleo nele contido, sendo o teor de óleo mais expressivo na polpa e amêndoa (Tabela 1).

**Tabela 1** - Teor de óleo da macaúba por fruto na base seca

Componente	Teor de óleo em % (Tipo A*)
Casca (epicarpo)	6,5
Polpa (mesocarpo)	59,8
Castanha(endocarpo)	-
Amêndoa	55,6

Fonte: CETEC (1983) citado por AMARAL (2007) (\* Tipo A=Macaúba oriunda de Jaboticatubas, MG).

### 3.3 Secagem

A redução das perdas pós colheita de frutas e hortaliças é uma preocupação para os pequenos, médios e grandes agroindustriais. Esses vegetais, assim como carnes, podem ser desidratados ao sol ou por meio de sistemas artificiais para diminuição do conteúdo de água, fator primordial na conservação de alimentos. A secagem apresenta vantagens por aumentar a

vida útil do produto, se econômica na produção caseira ou semi-industrial, ter baixo custo de armazenagem e facilitar o transporte (CELESTINO, 2010).

A secagem pode ser definida como um processo simultâneo de transferência de energia e massa entre o produto e o ar de secagem, que consiste na remoção do excesso de água contida no material por meio de evaporação, geralmente causada por convecção forçada de ar aquecido (MUJUMDAR, 2006; BROOKER et al., 1974)

A secagem de produtos agrícolas é importante pelo fato de que todo o processo metabólico enzimático ou por micro-organismos depende de água, sendo assim quando há redução da taxa hídrica das sementes há redução de processos químicos deteriorantes, como também diminui a proliferação de micro-organismos. Porém o manejo incorreto dos teores de água inicial e final das sementes, da temperatura, da umidade relativa, fluxo de ar, da taxa de secagem e do período de exposição ao ar aquecido podem causar sérios danos à qualidade da semente (MENDES, 2011).

### **3.3.1 Teor de água nos alimentos**

A água é o maior constituinte da maioria dos alimentos, sua existência desempenha um importante papel influenciando na estrutura, na aparência, no sabor e na sua suscetibilidade à degradação por meio de microrganismos.

A água é uma molécula tetraédrica e com peso molecular relativamente baixo, é considerada um ótimo solvente, devido ao seu reduzido volume que viabiliza a penetração das estruturas cristalinas em moléculas maiores como os hidrocoloides, alto momento dipolar e elevada constante dielétrica que facilita a participação desses componentes em ligações dipolo-dipolo, covalentes e íons-dipolo (BOBBIO e BOBBIO, 2001).

A quantidade de água nos alimentos pode ser expressa de duas formas, base seca e base úmida; a determinação desse fator é de grande importância para se definir a estabilidade, qualidade e composição dos alimentos, o qual pode afetar no processo de estocagem, de embalagem e no processamento dos alimentos. A água que se encontra no alimento pode estar de duas formas, água livre, água absorvida ou água de ligada. Ao se realizar a análise de umidade, somente a água livre será medida, por isso é preciso sempre informar qual o método utilizado, incluindo as condições, tempo e temperatura, para ter certeza do que foi analisado (FELLOWS, 2016; CECCHI, 2007).

Segundo Labuza (1970) a água está presente no alimento de três formas que são:

- Água-livre - está presente nos espaços intragranulares e entre os poros do material, essa é eliminada com facilidade e atua no meio de dispersão e nutriente para crescimento de microrganismos ou reações químico-enzimáticas.
- Água adsorvida – uma parte da água está adsorvida como uma camada muito fina nas superfícies internas e externas dos coloides macromoleculares (amidos, pectinas, celuloses e proteínas) por meio de forças de Van der Waals e formação de ligação de hidrogênio.
- Água ligada – está combinada quimicamente com outras substâncias. Este tipo de água não é utilizado como solvente, não permite o desenvolvimento de microrganismos.

Há dois modos de expressar a umidade contida em um alimento: base úmida ( $X$ , b.u.), a qual é dada pela razão entre o peso de água presente na amostra ( $P_a$ ) e o peso total ( $P_t$ ), como mostra a Equação 1.

$$X (b.u) = \frac{P_a}{P_t} \quad (1)$$

E base seca que é determinada pela razão entre o peso de água ( $P_a$ ) e o peso de massa seca ( $P_{ms}$ ), como apresentado na Equação 2.

$$X (b.s) = \frac{P_a}{P_{ms}} \quad (2)$$

Esses parâmetros são recorrentes no processo de secagem, o qual é comumente utilizado na indústria de alimentos para aumentar o tempo de vida útil do produto.

### 3.3.2 Curvas de secagem

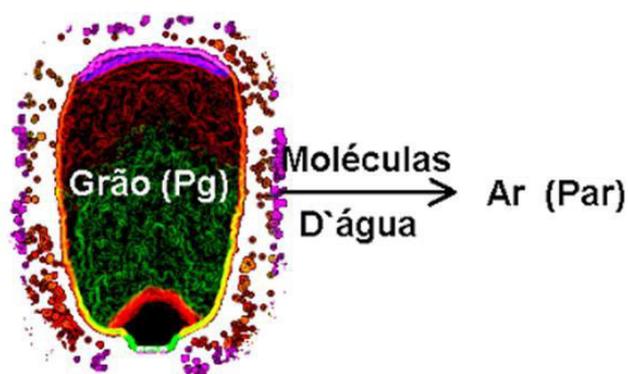
O estudo da cinética de secagem, ou seja, a rapidez com que o alimento perde umidade tem como objetivo o conhecimento do comportamento do material estudado ao longo do processo e a predição do tempo de secagem (CARVALHO, 2014). Geralmente, no processo de secagem os dados experimentais obtidos são representados através de curvas relacionando o teor de umidade com o tempo (GURGEL, 2014).

De acordo com Park et al. (2007), durante a secagem a retirada da umidade é obtida pela movimentação da água decorrente de uma diferença de pressão de vapor de água entre a

superfície do produto a ser secado e o ar que o envolve (Figura 3). A condição para que um produto seja submetido ao processo de secagem é que a pressão de vapor sobre a superfície do produto ( $P_g$ ) seja maior do que a pressão do vapor d'água no ar de secagem ( $P_{ar}$ ). Visto isso, as seguintes observações são pertinentes:

- Se  $P_g > P_{ar}$ : ocorrerá secagem do produto;
- Se  $P_g < P_{ar}$ : ocorrerá umedecimento do produto;
- Se  $P_g = P_{ar}$ : ocorre o equilíbrio higroscópico.

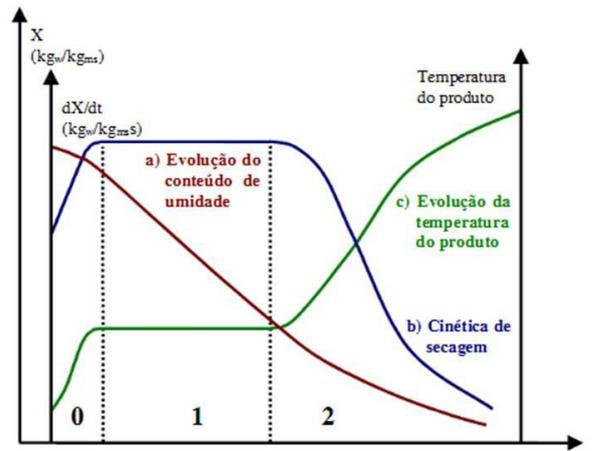
**Figura 3** - Representação da movimentação da água durante a secagem.



Fonte: Park et al. (2007).

O processo de secagem, fundamentado na transferência de calor e de massa, pode ser dividido em três períodos ao longo do tempo, conforme apresentado na Figura 4. A curva (a) representa a diminuição do teor em água do produto durante a secagem. A curva (b) representa a variação da velocidade (taxa) de secagem do produto. A curva (c) apresenta a variação da temperatura do produto durante a secagem.

**Figura 4** - Curvas teóricas de secagem.



Fonte: PARK et al. (2001).

### 3.3.3 Modelagem do processo de secagem

Diversas pesquisas veem sendo realizadas na área de secagem com o intuito de descrever a transferência de umidade do interior do sólido até a superfície e o mecanismo de transferência (interno ou externo) que controla o processo. Porém, na literatura são poucos os trabalhos que estudaram a modelagem visando o controle do processo, o que em geral limita tais pesquisas ao campo acadêmico e científico, não havendo aproximação com a aplicação industrial. Em processos de secagem, o conhecimento e controle de variáveis como a temperatura, a umidade relativa, a velocidade do ar e o conteúdo de umidade do sólido, são indispensáveis para garantir a qualidade do produto, além de ganhos em economia de energia (SILVA et al., 2004).

O processo de secagem de um produto, sob condições constantes de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, pode ser dividido em um período de velocidade constante e outro de velocidade decrescente. Durante o período de velocidade constante a temperatura do produto se mantém igual à do ar de secagem saturado e as transferências de calor e massa se compensam, ou seja, o ar recupera, sob a forma de vapor, o que perdeu sob a forma de calor. No período de velocidade decrescente de secagem, a taxa de transporte interno de água é menor do que a taxa de evaporação; desta forma a transferência de calor do ar para o produto não é compensada pela transferência do vapor de água e, conseqüentemente, a temperatura do grão aumenta, tendendo a atingir a temperatura do ar de secagem (Brooker et al., 1992).

### 3.3.3.1 Modelagem do período a taxa constante

Neste período, a velocidade de secagem é independente da umidade do sólido, pois este está tão úmido que a película fina de líquido, que cobre toda a sua superfície, se comporta como se o sólido não existisse. Por este motivo, os coeficientes de transferência de massa e de calor não variam com a perda de umidade do sólido e são aproximadamente constantes (AZEVEDO e ALVES, 2013).

Matematicamente, o período com taxa constante pode ser determinado pela Equação 3.

$$\frac{dX}{dt} = \frac{hA(T_{amb} - T_{bu})}{\lambda} \quad (3)$$

onde  $dX/dt$  é a taxa de secagem,  $A$  é a área da superfície exposta ( $m^2$ ),  $h$  é o coeficiente de transferência de massa ( $W \cdot (m^2)^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ ),  $\lambda$  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).

Normalmente a equação de transferência de calor dá uma estimativa mais segura da taxa de secagem do que a equação de transferência de massa, porém, correlações são propostas na literatura para permitir que as constantes nestas relações sejam fixadas com segurança (TREYBALL, 1980). Estas 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 o seu ângulo de colisão sobre a superfície seca. Expresso em termos de fluxo de massa de ar ( $G$ ), o coeficiente de transferência para fluxo de ar paralelo a superfície do produto é dado pela Equação 4.

$$h = C_1(G)^{0,8} \quad (4)$$

Para o fluxo de ar no ângulo direto da superfície de secagem o coeficiente de transferência de calor é dado pela Equação 5.

$$h = C_2(G)^{0,4} \quad (5)$$

onde  $C_1$  e  $C_2$  são constantes.

As Equações 4 e 5 indicam que o aumento do fluxo de massa de ar acelera a taxa de secagem. Adicionalmente, uma velocidade mais alta minimiza as diferenças de umidade entre

o interior e o exterior de um sistema de secagem e desta forma o teor de umidade do produto pode-se manter constante (FORSON et. al., 2007).

### 3.3.3.2 Modelagem do período a taxa decrescente

Durante o período de velocidade de secagem decrescente, superfície do sólido vai ficando cada vez mais seca e quente, sendo a secagem efetuada a partir de pontos dispersos na superfície onde a água ou o vapor vão chegando com velocidades variáveis (AZEVEDO e ALVES, 2013).

De acordo com Queiroz (1985) são dois os métodos comumente usados para analisar a secagem de produtos biológicos no período a taxa decrescente: o empírico e o teórico. O método empírico consiste em formar grupos físicos adimensionais que podem ser facilmente investigados por experimentos de laboratório e baseia-se nas condições externas, como temperatura, umidade e velocidade do ar de secagem. Entretanto, não fornece indicação sobre o transporte de energia e de água no interior dos produtos. Os métodos teóricos usados para descrever o processo de secagem são baseados em leis físicas que tentam explicar o mecanismo de transferência de água (KAR et al., 2009).

### 3.3.3.3 Modelos empíricos empregados para análise no período de taxa decrescente

Os modelos empíricos de secagem em camada delgada seriam aqueles que concorreriam para que houvesse harmonia entre a teoria e a facilidade de uso. A secagem em camada delgada refere-se ao processo no qual o material a ser seco 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 circundado por um fluido à temperatura constante, como mostra a Equação 6 (HALL, 2006).

$$\frac{d\theta}{dt} = -\xi(\theta - \theta_e) \quad (6)$$

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

A Equação 6 é uma equação diferencial linear de primeira ordem, cuja solução pode ser obtida por separação de variáveis e posterior integração conforme a Equação 7, resultando na equação exponencial mostrada na Equação 8.

$$\int_{\theta_e}^{\theta} \frac{d\theta}{(\theta - \theta_e)} = \int_{t_0}^t -\xi dt \quad (7)$$

$$\frac{\theta - \theta_e}{\theta_0 - \theta_e} = e^{-\xi t} \quad (8)$$

Atualmente, são empregados muitos modelos empíricos para as análises de curvas de secagem, os quais derivam do resultado anterior. Silva et al. (2013) citam a descrição básica de alguns modelos semi-empíricos empregados, como o modelo de Weibull, Peleg, Henderson-Pabis, Lewis, Aproximação por difusão, etc.

Para a secagem de produtos higroscópicos, vários modelos foram propostos, na literatura, para analisar a secagem, os quais são classificados em: teóricos, semiteóricos e empíricos (MARTINAZZO et al., 2007). Entre os modelos semiteóricos, o modelo de Dois Termos, o de Henderson e Pabis, o de Page e o de Page Modificado e Midilli têm sido amplamente utilizados em processos de secagem de produtos alimentícios (SIQUEIRA et al., 2013). Dentre os modelos teóricos, inclui-se o modelo difusivo, no qual inclui-se a equação de balanço de massa de água no interior do produto proposta pela lei de Fick, que expressa o fluxo de massa por unidade de área como sendo proporcional ao gradiente de concentração de água. Esta tem sido amplamente utilizada para descrever processos de secagem durante o período de taxa decrescente para a maioria dos materiais biológicos e tem apresentado bons resultados tanto para produtos de origem vegetal quanto para os de origem animal (SRIKIATDEN e ROBERTS, 2006; HASSINI et al., 2007; OLIVEIRA, 2009; CELMA et al., 2009; PUENTE-DÍAZ et al., 2013; ARAUJO, 2000).

Os parâmetros dos modelos de secagem em camada fina são calculados em função das variáveis que influenciam a taxa de secagem. Em geral, a temperatura é uma variável sempre presente nos modelos que descrevem o processo de secagem (DUNG et al., 1980; BALA e WOODS, 1992). Outra variável normalmente associada aos parâmetros de secagem é o teor de umidade inicial do produto (WHITE et al., 1981; SOARES, 1986)

### 3.3.4 Umidade de equilíbrio

Segundo Azevedo e Alves (2013), a umidade de equilíbrio é atingida quando a pressão de vapor do sólido iguala-se à pressão de vapor do ar ou, é a umidade residual de um material

seco, quando a taxa de secagem é igual a zero em condições específicas do meio de secagem (BECKER e SALLANS, 1956).

Os valores de umidade de equilíbrio previstos pela sorção de umidade estática e dinâmica nem sempre concordam em toda a faixa de umidade relativa do ar de secagem (BECKER; SALLANS, 1956). Talvez isso possa ser explicado pela condição da umidade residual poder estar adsorvida sob a forma de filme sobre a superfície e/ou pequenos capilares a pressão reduzida em diferentes conformações.

A determinação do ponto final de secagem depende do conhecimento da atividade de água máxima admissível no alimento e da isoterma de desorção e adsorção. O entendimento dessas condições permite otimizar o processo de secagem, inclusive determinar a umidade máxima admissível para o ar de secagem.

### **3.3.5 Técnicas de secagem**

Por ser uma técnica essencial na indústria de alimentos, a secagem pode ser realizada das mais diversas formas, como por exemplo, a secagem de grãos ao sol. A operação de secagem é dividida em duas, secagem natural e artificial (forçada), com o uso de equipamentos específicos para esta operação.

A secagem natural pode ser aplicada em regiões com temperatura média de 35°C a 40°C, com boa taxa de radiação solar, baixa umidade relativa do ar e baixo índice de poluição. Este tipo de secagem possui um custo muito baixo necessitando apenas do uso de bandejas para a desidratação e redes protetoras contra insetos. Alimentos de alta perecibilidade, como frutas, hortaliças, ervas e carnes, devem ter essa proteção, mas, no caso de café e milho para ração animal, a secagem pode ser feita com grãos espalhados no chão, estando esses apenas sobre uma cobertura plástica (EMBRAPA, 2010; CELESTINO, 2010)

A secagem artificial é um processo de remoção de umidade, que implica no uso de equipamentos e condicionamento do ar de secagem pelo controle da temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem. Na secagem artificial, as condições do ar de secagem, não dependem das condições climáticas, o que favorece a obtenção de um produto de qualidade superior, e um menor tempo de processamento (CORNEJO, 2003). Na maioria dos processos industriais a secagem é realizada com uma velocidade de 0,5 /s a 3 m/s e baixa umidade, em recipientes metálicos cujas paredes podem emitir radiação para o sólido e secar. A secagem artificial pode ser realizada em diferentes tipos de secadores, a escolha deles

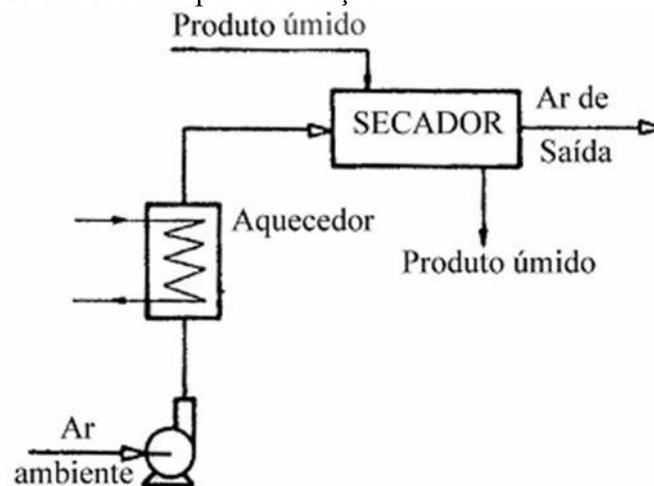
depende do material que se está secando, da energia a ser empregada para o processo e resultado que se deseja obter (CELESTINO, 2010, AZEVEDO; ALVES, 2013).

### 3.3.5.1 Secagem convectiva

A convecção forçada de ar aquecido é o processo de secagem mais utilizado na conservação de alimentos (Figura 5). Consiste na redução do teor de água do produto por meio da passagem forçada de ar aquecido, com baixa umidade relativa, através do produto. A redução do teor de água provoca diminuição da massa, do volume, do crescimento de fungos e da atividade enzimática e microbiana (VILLA-CORRALES et al., 2010).

Durante operações de secagem convectiva, a transferência de calor ocorre devido à movimentação de um fluido aquecido. O movimento do fluido, no caso da secagem o ar, provoca a transferência de energia do ar quente para regiões frias (WILHEM et al., 2005). Assim, o calor é transferido do ar para a superfície do alimento, sendo utilizado na forma de calor sensível para elevação da temperatura e na forma de calor latente para evaporação da água, ou transferência de massa (ANWAR e TIWARI, 2001). Convecção natural ocorre quando o movimento do ar aquecido se move devido a diferenças de densidade no ar. Convecção forçada ocorre quando o ar é movido por outros métodos, como por exemplo, bomba ou ventilador.

**Figura 5** - Esquema de um secador por convecção.



Fonte: PARK et al. (2007).

### 3.3.6 Vantagens da secagem

Determinadas propriedades nutritivas do alimento podem ser perdidas principalmente as vitaminas, em processos com tratamento térmico, e, com a secagem, não é diferente; apesar disso, segundo a Embrapa (2010), vantagens podem ser atribuídas à desidratação:

- Aumento da vida útil do produto.
- O alimento desidratado é nutritivo; apesar das possíveis perdas de alguns nutrientes, o valor alimentício do produto concentra-se por causa da perda de água.
- Facilidade no transporte e comercialização, pois o alimento seco é leve, compacto e suas qualidades permanecem inalteradas por longos períodos.
- O processo de secagem é econômico. Os secadores semi-industriais têm baixo custo; a mão-de-obra não necessita ser especializada; e os produtos desidratados têm baixo custo de armazenagem.
- Redução nas perdas pós colheita.

## **4. MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 Local da Pesquisa**

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Produtos e Processos em Biorrecursos do Curso de Engenharia Química situado na Universidade Federal no Maranhão (UFMA), na cidade de São Luís do Maranhão.

### **4.2 Coleta, Amostragem e Higienização dos Frutos**

As amostras de amêndoas de macaúba (*Acrocomia aculeata*) foram coletas nas dependências do Campus da Universidade (Cidade Universitária Dom Delgado). Os frutos foram coletados no chão, nas imediações da palmeira. As amostras após coletadas permaneceram armazenadas em local fresco e com ventilação até o momento da seleção, limpeza e higienização. A seleção dos frutos consistiu na eliminação dos que aparentemente estavam estragados.

### **4.3 Descascamento, Retirada da Amêndoa e Armazenamento**

O descascamento procedeu-se manualmente com a retirada da casca do fruto, deixando a polpa. A retirada da amêndoa foi realizada com a quebra do tegumento (castanha), que é grossa e resistente. Para alguns frutos houve o desprendimento da mesma no momento da quebra. As amostras foram selecionadas, as que mais se aproximavam de uma esfera foram escolhidas para a realização dos experimentos, como mostra a Figura 6. Após a coleta e obtenção da amêndoa, estas foram armazenadas em um refrigerador até o momento dos procedimentos de secagem.

**Figura 6** - Amêndoa da Macaúba em uma bandeja de alumínio.



Fonte: Próprio autor

#### 4.4 Processo de Secagem

O teor de água inicial foi determinado pelo método padrão gravimétrico de estufa a 40°C, 50°C, 60°C e 70°C ± 3°C, por um período de 24 h, utilizando duas amostras da amêndoa para cada temperatura dispostas em bandejas metálicas conforme descrito pelas Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 2009). As pesagens das amostras foram realizadas por meio de uma balança analítica (Shimatzu, Brasil) com precisão de 0,0001 g. A porcentagem de teor de água foi calculada em base úmida aplicando-se a Equação 9, sendo o resultado final expresso pela média aritmética das sub amostras.

$$\text{Teor de água (\%)} = \frac{100(M-m)}{M-t} \quad (9)$$

Em que:

$M$  = massa inicial em g (massa do recipiente mais a massa das amêndoas úmidas);

$m$  = massa final em g (massa do recipiente mais a massa da amêndoa seca);

$t$  = tara em g (massa da bandeja metálica).

As amostras foram secas em camada fina em um secador de bandejas, que foi ajustado para operar nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C e velocidade do ar de secagem a 1,1 m/s. A temperatura e a umidade relativa do ar ambiente foram medidas durante o período de cada secagem por meio de termo-higrômetro digital. O experimento foi realizado em duplicata, com secagem simultânea, sendo as pesagens dos grãos realizadas em balança semi

analítica (Shimatzu, Brasil) com precisão de 0,001 g até se obter peso constante, que equivale a determinar o teor de água de equilíbrio para as específicas condições termodinâmicas do ar de secagem.

Para cada temperatura a amostra era retirada da estufa para pesagem com intervalos específicos. Inicialmente com intervalos de 5 minutos até completar 30 minutos de secagem, em seguida o intervalo foi de 10 minutos entre as pesagens até chegar a 110 minutos e finalmente com intervalos de 20 minutos até que a massa das amostras parasse de sofrer variação significativa.

As curvas de secagem foram obtidas pela conversão dos dados referentes à perda de água no parâmetro adimensional razão de teor de água ( $RX$ ). Para determinação da razão de teor de água das amêndoas nas diferentes condições de secagem foi utilizada a Equação 10:

$$RX = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (10)$$

Em que:

$RX$  = razão de teor de água (adimensional);

$X_e$  = teor de água de equilíbrio (base seca);

$X$  = teor de água (base seca);

$X_0$  = teor de água inicial (base seca).

Os dados experimentais da secagem da amêndoa da macaúba foram ajustados para cinco equações (teórica, semi empíricas e empíricas), frequentemente utilizadas para representação da secagem de produtos agrícolas e que estão apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2 - Modelos Cinéticos de secagem utilizados**

<b>Nome do Modelo</b>	<b>Modelo</b>	<b>Referências</b>	<b>Número</b>
Weibull	$X = X_e + (X_0 - X_e) \exp - \left( \frac{t}{\beta} \right)^K$	Corzo et al. (2009)	11
Midilli	$X = X_e + (X_0 - X_e) a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	Midilli et al. (2002)	12
Henderson-Pabis	$X = X_e + (X_0 - X_e) a \cdot \exp(-k \cdot t)$	Henderson e Pabis (1961)	13
Lewis	$X = X_e + (X_0 - X_e) e^{-kt}$	Lui et al. (1997)	14
Page	$X = X_e + (X_0 - X_e) \exp(-k \cdot t^n)$	Page (1949)	15

Em que:

t = tempo de secagem, (s);

k, k1 e k2= constantes de secagem – *não apresenta unidade (adimensional)*;

a,  $\beta$ , n = coeficientes dos modelos.

A determinação do coeficiente efetivo de difusão foi realizado usando o Solver do Excel, com base no ajuste matemático da solução analítica da segunda Lei de Fick para esferas, desconsiderando as variações de volume das amêndoas.

As equações dos modelos acima foram dispostas em planilhas do Excel, permitindo que fosse calculado a umidade teórica em função do tempo. Para o ajuste dos parâmetros dos modelos, os dados teóricos foram comparados com os pontos experimentais, obtendo assim um erro. O somatório dos erros em cada ponto avaliado foi inserido como função objetivo no Solver para determinação de um melhor ajuste.

Como critério de seleção, para o modelo que melhor representou o processo de secagem utilizou-se o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o erro médio relativo (MRE), sendo calculado por meio da Equação 16:

$$MRE = \frac{100}{N} \sum \frac{|RX_{exp} - RX_{modelo}|}{RX_{exp}} \quad (16)$$

Em que:

$RX_{exp}$  = razão de água obtida experimentalmente;

$RX_{modelo}$  = razão de água predita pelo modelo matemático;

$N$  = número de dados experimentais.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Cinética de secagem

A temperatura e a umidade relativa médias do ar ambiente durante o processo de secagem foram, respectivamente, de 25,9°C e 72%. A média do teor de água inicial calculado em 24 h para as temperaturas estudadas foi em torno de 27%.

A influência da temperatura é bastante significativa, pois à medida que esta é aumentada o tempo de secagem é reduzido (Figuras 7 a 11). A estabilidade do produto é atingida de acordo com teor de água de equilíbrio. Em ambas as figuras, pôde-se observar que o incremento de temperatura favoreceu o aumento da taxa de secagem, resultando na diminuição do tempo da cinética. Tonon et al. (2009), afirmaram que com o aumento da temperatura do meio do processo, ocorre maior diferença de temperaturas entre a amostra e o ar de secagem, ocasionando maior transferência de calor e massa. Diversos autores têm demonstrado o mesmo comportamento em produtos alimentícios (MELO et al., 2015; SANTOS et al., 2010; DJAENI et al., 2013).

Em relação ao tamanho do material percebeu-se um leve encolhimento e escurecimento no decorrer do processo de secagem.

### 5.2 Modelagem da cinética de secagem

Na Tabela 3, encontram-se os valores estatísticos dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e do erro médio relativo (MRE) para os modelos ajustados à cinética de secagem da amêndoa em diferentes temperaturas, além dos parâmetros que estão presentes em cada um dos modelos calculados.

De acordo com Goneli et al. (2009), a constante  $k$  representa o efeito das condições externas de secagem, e tende a aumentar com a elevação da temperatura do ar de secagem. Como pode ser visualizado na Tabela 3, este efeito foi observado, porém na temperatura de 70°C não foi possível observar esta tendência para o modelo de Weibull (aumento de  $k$  com o aumento da temperatura).

Com relação ao coeficiente ( $n$ ) do modelo de Page e Midilli et al. não se observou uma tendência definida dos seus valores em relação à temperatura de secagem, porém os valores permaneceram em torno de 1, com pouca margem de diferença. Normalmente, com a elevação da temperatura do ar de secagem, menor é o valor de  $n$ , uma vez que há maior

diferença entre a pressão de vapor do alimento, promovendo maior remoção de água; isto pode ser observado no modelo de Midilli.

Em todos os tratamentos, os modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais apresentaram coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superiores a 99,5%. Segundo Martinazzo et al. (2007), os valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) quanto, mais próximo de 1, denotam um bom ajuste dos modelos para representação do fenômeno de secagem. E, neste trabalho foram obtidos valores bem satisfatórios de  $R^2$  para todos os modelos estudados (Tabela 3). Quanto ao MRE, este parâmetro representa a proximidade entre os valores experimentais e os calculados, ou seja, o erro na estimação. Para a adequabilidade do modelo na descrição da secagem, o MRE deve apresentar os menores valores percentuais, inferiores a 15%. O modelo de Midilli et al. Foi o que apresentou MRE inferior a 15% para todas as temperaturas estudadas.

Tomando como base o modelo de Midilli et al. (2002), é possível observar que o coeficiente de secagem  $k$  aumenta com o aumento da temperatura; já a constante  $b$  e a constante  $n$  diminuiu com o aumento da temperatura e a constante  $a$  não demonstrou muita diferença em função da temperatura de secagem. Martinazzo et al. (2007) encontraram, como melhor modelo para a secagem de folhas de capim limão, o de Midilli et al. (2002), em que o coeficiente de secagem  $k$  e a constante  $n$  aumentaram com o aumento da temperatura, confirmando os dados obtidos neste trabalho. Resultado semelhante foi constatado por Radünz et al. (2010), que secaram folhas de sálvia com temperatura entre 40 e 90 °C e concluíram que os modelos de Handerson e Pabis e Midilli et al. (2002), foram os que representaram a melhor cinética de secagem para as folhas de sálvia.

**Tabela 3** - Coeficientes dos cinco modelos analisados, coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e erro médio relativo (MRE), da secagem da amêndoa da macaúba, para as diferentes temperaturas.

Temperatura	MODELO DE WEIBULL			
	k	MRE	$R^2$	
40°C	6989,2	16,44	0,995	
50°C	5719,1	11,03	0,996	
60°C	4856,7	11,11	0,997	
70°C	4560,0	14,55	0,987	

Temperatura	MODELO DE HENDERSON			
	a	k	MRE	$R^2$
40°C	1,016	0,000146	15,4	0,995
50°C	0,963	0,000165	11,6	0,997
60°C	0,978	0,000199	11,48	0,998
70°C	0,9102	0,000191	13,68	0,989

Temperatura	MODELO DE LEWIS			
	k	MRE	$R^2$	
40°C	0,000143	16,44	0,995	
50°C	0,000175	11,03	0,997	
60°C	0,000205	11,11	0,998	
70°C	0,000219	14,54	0,987	

Temperatura	MODELO DE PAGE			
	k	n	MRE	$R^2$
40°C	6,23E-05	1,095	11,23	0,996
50°C	0,000325	0,927	13,82	0,996
60°C	0,000291	0,958	12,86	0,997
70°C	0,0011868	0,799	21,84	0,992

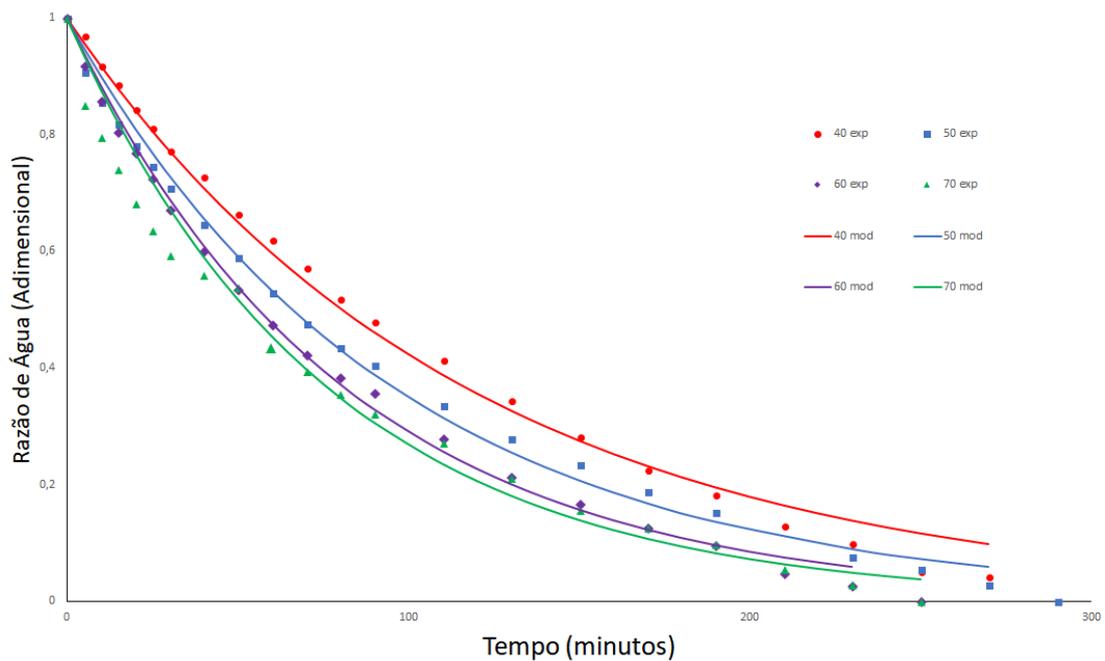
Temperatura	MODELO DE MIDILLI et al.					$R^2$
	a	k	n	b	MRE	
40°C	1,005	0,000215	0,931	-8,43E-06	3,21	0,999
50°C	0,992	0,000667	0,826	-6,36E-06	1,47	0,999
60°C	1	0,000603	0,859	-6,21E-06	2,25	0,999
70°C	0,9963	0,003203	0,6598	-9,43E-06	2,79	0,998

Fonte: Próprio autor

O tempo necessário para a amêndoa da macaúba, atingir o peso constante (equilíbrio higroscópico), foi de 4,83; 4,5; 4,16 e 4,16 horas, para as temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, respectivamente.

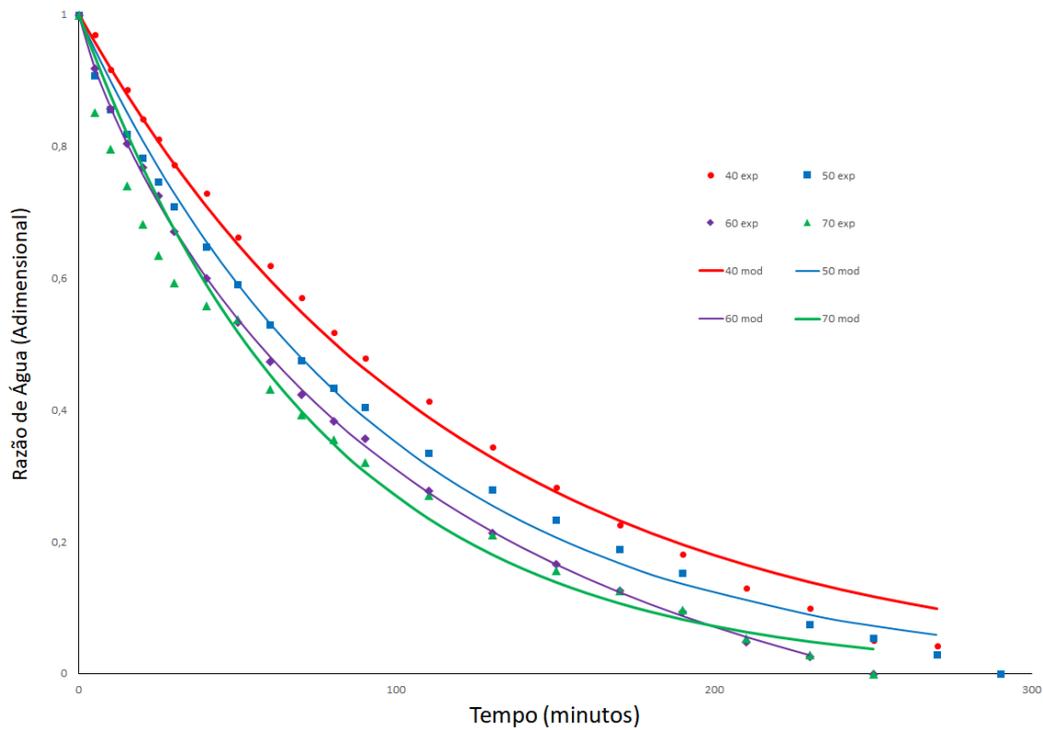
Para os modelos citados, são mostrados nas Figuras 7 a 11, as respectivas curvas de secagem, que demonstram a variação do conteúdo de umidade, em base seca, em função do tempo. As curvas decrescentes indicam um bom ajuste aos valores calculados experimentalmente, enquanto que os as linhas na reta representam os valores teóricos através de cada modelo. Pode-se observar que os ajustes foram bem mais precisos para o modelo de Midilli et al., o que corrobora com os valores satisfatórios de  $R^2$  e MRE. Tal fato, indica que os parâmetros deste modelo são adequados para descrever as curvas de secagem da amêndoa de macaúba.

**Figura 7** - Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem da amêndoa às temperaturas de 40°C a 70°C de acordo com o modelo de Weibull.



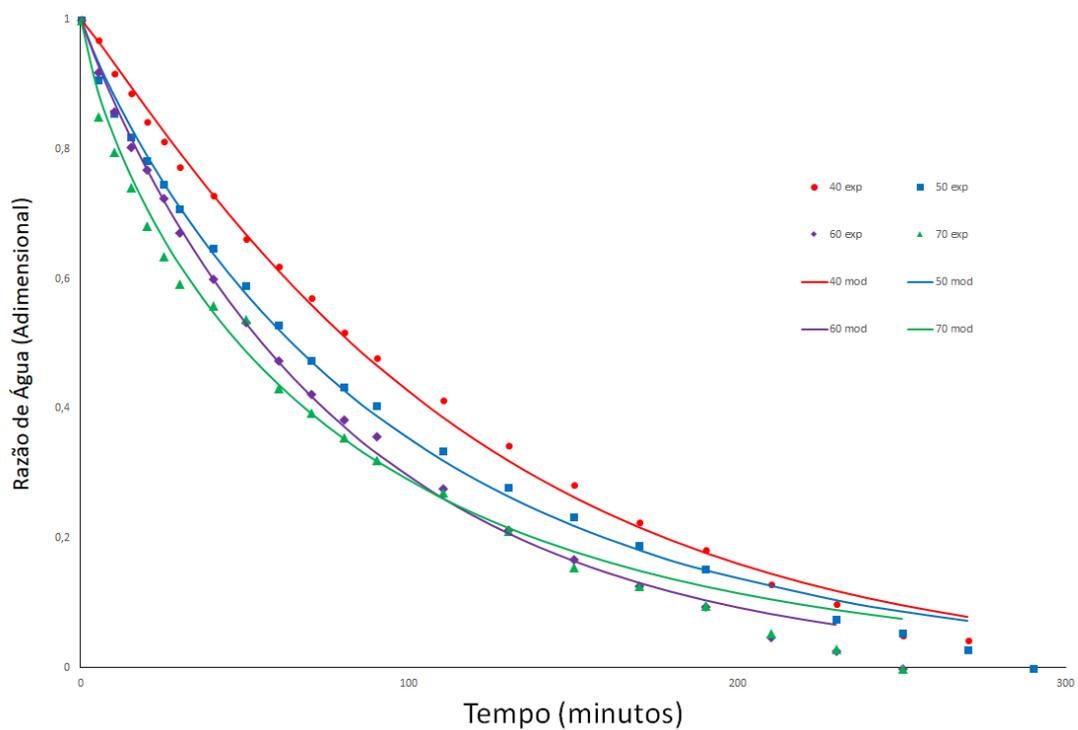
Fonte: Próprio Autor

**Figura 8** - Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem da amêndoa às temperaturas de 40°C a 70°C de acordo com o modelo de Lewis.



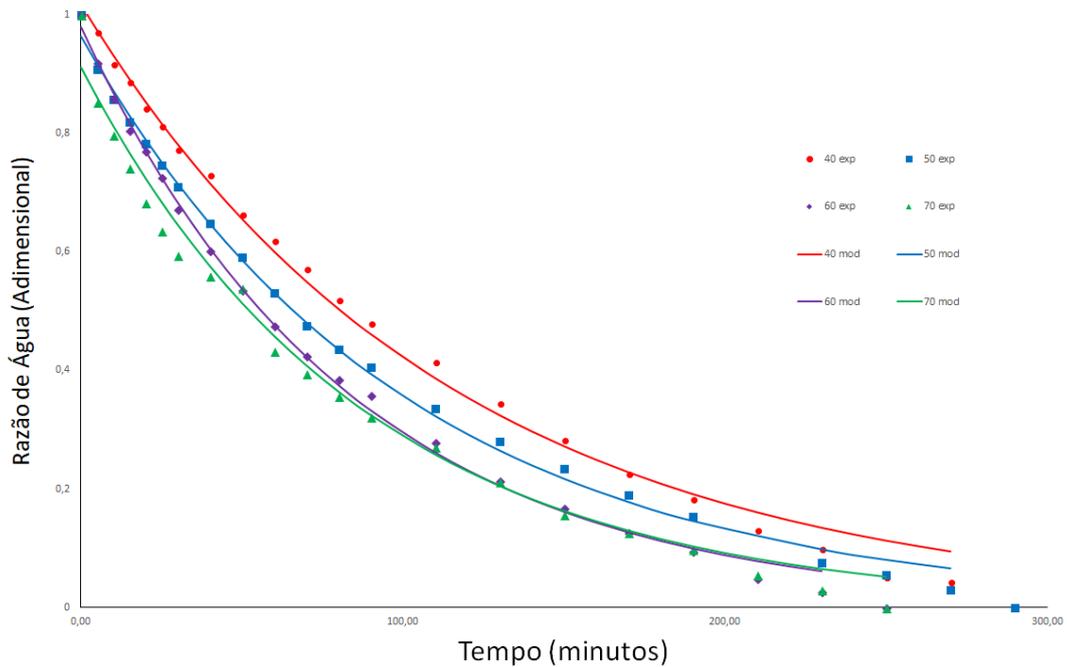
Fonte: Próprio Autor

**Figura 9** - Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem da amêndoa às temperaturas de 40°C a 70°C de acordo com o modelo de Page.



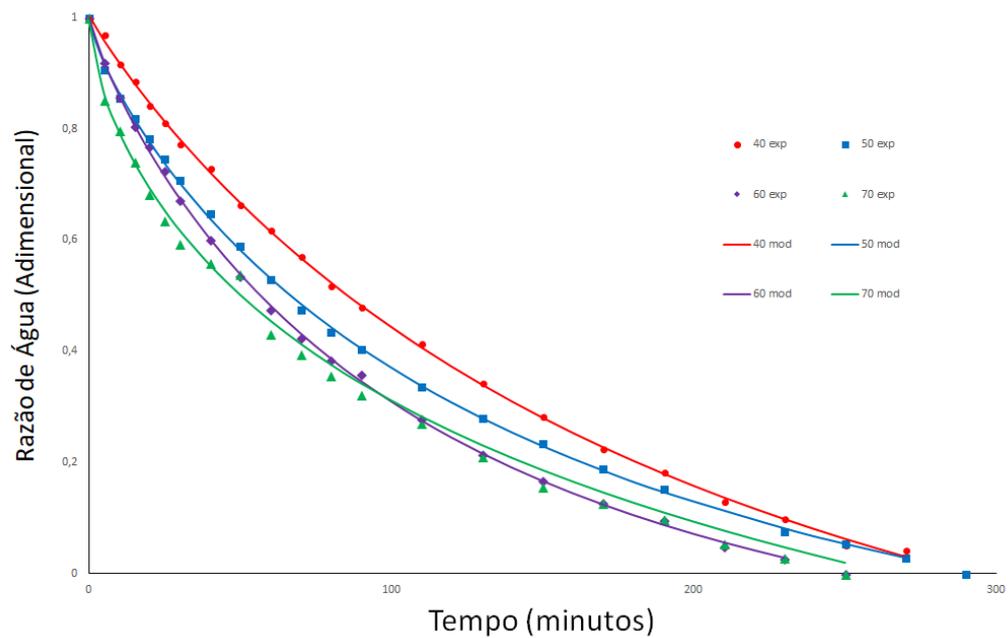
Fonte: Próprio Autor

**Figura 10** - Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem da amêndoa às temperaturas de 40°C a 70°C de acordo com o modelo de Henderson - Pabis.



Fonte: Próprio Autor

**Figura 11** - Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem da amêndoa às temperaturas de 40°C a 70°C de acordo com o modelo de Midilli et al.



Fonte: Próprio Autor

## 6. CONCLUSÃO

Nas condições em que foi desenvolvido o presente trabalho, foi possível observar que o valor médio de teor de água foi de 27% para as temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C.

Dentre os modelos empíricos de Weibull, Midilli, Lewis, Henderson-Pabis e Page, conclui-se que o modelo de Midilli et al. apresentou melhor ajuste aos dados experimentais, sendo recomendado na representação de processos de secagem da amêndoa da macaúba sob as condições estudadas.

No presente experimento, a temperatura que melhor se ajustou à secagem da amêndoa de macaúba foi a de 60°C, levando em consideração os valores de  $R^2$ .

## REFERÊNCIAS

- AMARAL, F. P. **Estudo das características físico-químicas dos óleos da amêndoa e polpa da macaúba [*Acrocomia aculeata* (jacq.) Lodd. ex mart]**. 2007. 52f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Área de Concentração em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp, Botucatu, 2007.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS – ASAE. **Moisture Relationship of Grains**. St. Joseph, 1991 b, p.363-7. (ASAE Data, D245.4).
- AQUINO, M.; et al. Distribuição geográfica das espécies *Acromia aculeata* (Jacq.) Lood ex. Mart. *R Caryocar brasiliense* Cambess no bioma Cerrado. In: Simpósio nacional Cerrado: desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais, 9, Brasília, 2008.
- ARAUJO, E. A. F. *Estudo da Cinética de Secagem de Fatias de Banana Nanica (*Musa acuminiata* var. *Cavendish*) Osmoticamente Desidratados*. 2000. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil. 2000.
- ARISTONE, F (Ed.). **Como fazer farinha de bocaiúva: guia completo e livro de receitas**. Manual didático. 2006.
- AZEVEDO, E. G., ALVES, A. M., Engenharia de Processos de Separação, Lisboa: IST Press, 2ª edição, 2013.
- BOAS, M. A. V.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M. M. L.; MARTINS, M. A. **Efeito da temperatura de carbonização e dos resíduos de macaúba na produção de carvão vegetal**. In: Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais. Piracicaba. v.38, n. 87, p. 481-490. set. 2010.
- BOBBIO P. A.; BOBBIO F. O. Química do Processamento de Alimentos – 2º edição – São Paulo: Varela, 1992.
- BOBBIO, F. O.; BOBBIO, P. A. Introdução à química de alimentos. São Paulo: Varela, 2001. 223p
- BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Cadeia produtiva de frutas**. Brasília: IICA/MAPA/SPA, 2007.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2009. 398 p.

BROOKER, D. B.; BAKKER-AREMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying cereal grains**. Connecticut: AVI, 1974.

BRUNAUER, S., EMMET, T.H., TELLER, F. Adsorption of gases in multimolecular layers. **J. Am. Chem. Soc.**, Easton, PA: Mack Printing Company, v. 60, n. 2, p. 309-319, 1938.

CARVALHO, K. J.; SOUZA, A. L.; MACHADO, C. C.; **Ecologia, manejo, silvicultura e tecnologia da macaúba**. Convênio de Cooperação Técnica SECTES/FAPEMIG. Pólo de Excelência em Florestas. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa – MG. 2011.

CECCHI H. M. Fundamentos teóricos e Práticos em Análise de Alimentos – 2º edição – Unicamp, 2003.

CELESTINO, S. M. C.. **Princípios de secagem de alimentos**. Embrapa Cerrados. Planaltina – DF. 2010.

CELMA, A. R.; LÓPEZ-RODRÍGUEZ, F.; BLÁZQUEZ, F. C. Experimental modeling of infrared drying of industrial grape by-products. *Food Bioprod. Process.*, v.87, p.247-253, 2009.

CHINNAN, M.S., BEAUCHAT, L.R. Sorption isotherms of whole cowpeas and flours. **Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie**, London: Academic Press Ltd., v. 18, p. 83- 88, 1985.

CHUNG, D.S., PFOST, H.B. **Transactions of the ASAE**, St Joseph: Amer. Soc. Agricultural Engineers, v.10, p.594, 1967.

CICONINI, G. **Caracterização de frutos e óleo de polpa de macaúba dos biomas Cerrado e Pantanal do estado de Mato Grosso do Sul, Brasil**. Dissertação de mestrado. Universidade Católica Dom Bosco. Campo Grande. p.149, 2012.

CORZO, O.; BRACHO, N, Aplicación del modelo de Weibull normalizado en la deshidratación osmótica de láminas de sardina, *Revista Científica FCV-LUZ*, **23**, 400-407 (2009)

COSTA, C. F. **Solos e outros fatores ambientais associados à diversidade fenotípica de macaubais no estado de São Paulo**. 2009. 54f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical Área de Concentração em Gestão dos Recursos Agroambientais) – Instituto Agronômico, Campinas, 2009.

DAMODARAN S, PARKIN K.L., FENNEMA O.R. Fennema's Food Chemistry CRC Press, 4Ed, 2008.

FELDER, R. M.; ROUSSEAU, R. W. *Princípios Elementares dos Processos Químicos*, 3ª ed. Editora LTC, 2005.

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

Forson FK, Nazha MAA, Akuffo FO, Rajakaruna H (2007). Design of mixed-mode natural convection solar crop dryers: Application of principles and rules of thumb. *Renew. Energy*, 32: 2306-2319.

FOUST, A. *Princípios das Operações Unitárias*, 2ª ed. Editora LTC, 1982.

GEANKOPLIS, C. J.. *Transport Processes and Separation Processes Principles*. 4ª ed. Editora Prentice Hall, 2003.

GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; AFONSO JÚNIOR, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H. Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, n. 11, p. 64-73, 2009.

HASSINI, L.; AZZOUZ, S.; PECZALSKI, R.; BELGHITH, A. Estimation of potato moisture diffusivity from convective drying kinetics with correction for shrinkage. *J. Food Eng.*, v.79, p.47-56, 2007.

JOWITT, R., et al. **Physical properties methods of foods**. 2nd ed. London: Applied Science Publishers, 564 p, 1987.

Kar, S., Chen, X.D., Adhikari, B.P. and Lin, S.X.Q., 2009. The Impact os various drying kinetics models on the prediction os sample temperature-time and moisture content-time profiles during moisture removal from stratum corneum. *Chemical Engeneering Research and Design* 87.

LIM, S. et al. Supercritical fluid reative extraction of *Jatropha curcas* L. seeds whith metanol: A novel biodiesel production method. *Bioresource Tecnologia*, Vol. 101, 2010.

LORENZI, G. M. A. C.; NEGRELLE, R. R. B. ***Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lood. ex. Mart.: aspectos ecológicos, usos e potencialidades**. In: *Visão Acadêmica*. Paraná: Curitiba, v.7, n.1, 2006.

LUI, Q; BAKKER-ARKEMA, . Stochasticmodelling of grain drying. Part 2: Model development, *J. Agricult.Eng.*, **66**,275-280 (1997)

MARTINAZZO, A. P. et al. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.*, v. 11, n. 3, p. 301-306, 2007.

MCCORMICK, P.Y.; PORTER, H.F.; LUCAS,R.L.;WELLS,D.F. Solids drying

- fundamentals. In: PERRY, R.H. and CHILTON, C.H. *Chemical engineer's handbook*. McGraw Hill BookCompany, 1983.
- MENDES, R. R.. **Avaliação da qualidade do óleo das sementes de crambe submetidas a diferentes temperaturas de secagem**. Dissertação (Mestrado) apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – IFGoiano, Mestrado em Ciências Agrárias. Rio Verde, 2011.
- MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A new model for single-layer drying. **Drying Technology**, Philadelphia, v. 20, n. 7, p. 1503- 1513, 2002.
- MIRISOLA FILHO, L. A. **Cultivo e Processamento do coco macaúba para produção de biodiesel**. Viçosa: Centro de Produções Técnicas, 2009.
- MOHSENIN, N.N. Physical properties of plants and animals materials. 2. ed. Amsterdam: Gordon and Breach Publishers, 1986, 841 p.
- MORAIS, S. J. S. Cinética de secagem de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). 2010. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Goiás, Anápolis. 2010.
- MUJUMDAR, A. S. Handbook of Industrial drying: principles, classification and selection of dryers. Singapore: Taylor & Francis Group, LLC, 2006.
- OLIVEIRA, F. I. P. *Influência do pré-tratamento ultrassom e desidratação osmótica na secagem, cor, textura e enzimas do mamão formosa*. 2014. 120 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2014.
- OSWIN, C. R. *The kinetics of Package Life III: The Isotherm*. Journal of Chem. Indust., 65, 419-421, 1946. In KAYMAK-ERTEKIN, F.; SULTANOGLU, M. *Moisture Sorption Isotherm Characteristics of Peppers*. Journal of Food Engineering, v. 47, p. 225-231, 2001.
- PAGE, G.E, Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers, *Tese Mestrado*, (1949)
- PUENTE-DÍAZ, L.; AH-HEN, K.; VEGA-GÁLVEZ, A.; LEMUS-MONDACA, R.; DI SCALA, K. Combined infrared-convective drying of murta (*Ugni molinae* Turcz) berries: Kinetic modeling and quality assessment. *Drying Technol.*, v.31, p.329-338, 2013
- RADÜNZ, L. L.; MOSSI, A. J.; ZAKRZEWSKI, C. A.; AMARAL, A. S.; GRASSMANN, L. Análise da cinética de secagem de folhas de sálvia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.979–986, 2010.
- RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H.; DATTA, A. K. **Engineering properties of foods**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 761 p, 2005.

- RETTORE, R. P.; MARTINS, H. Produção de combustíveis líquidos a partir de óleos vegetais: estudo das oleaginosas nativas de Minas Gerais. Projeto CETEC – CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. Belo Horizonte – MG, 1983
- SCARIOT, A.; LLERAS, E.; HAY, J. D. Flowering and fruiting phenologies of the palm *Acrocomia aculeata*: patterns and consequences. *Biotropica*, Washington, v.27, n. 2, p. 168-173, 1995.
- SILVA, J. C. **Macaúba: fonte de matéria prima para os setores alimentício, energético e industrial**. Viçosa, MG, 2007.
- SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Mathematical modelling of the drying of jatropha fruit: an empirical comparison. *Rev. Ciênc. Agron.*, v. 44, n. 2, p. 278-285, 2013.
- SRIKIATDEN, J.; ROBERTS, J. S. Measuring moisture diffusivity of potato and carrot (core and cortex) during convective hot air and isothermal drying. *J. Food Eng.*, v.74, p.143-152, 2006.
- TELES, Héria de Freitas. **Caracterização de ambientes com ocorrência natural de *Acrocomia aculeata* e suas populações nas regiões centro e sul do estado de Goiás**. Mestrado em Agronomia. Universidade Federal de Goiás. In: Repositório da Universidade Federal de Goiás. Goiás: Goiânia. 2009.
- TEXEIRA NETO, R. O., QUAST, D. G. Isotermas de adsorção de umidade em alimentos. Campinas: ITAL, v. 8, p. 141-197, 1993.
- VIEIRA, R. K, Estudo do Cascadeamento de sólidos em Tambor Rotativo. Dissertação (Mestrado) – UFSCar, PPG/EQ, 1996.