

**BACHARELADO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DE SECAGEM DA CASCA DE  
ABÓBORA MORANGA (*Cucurbita maxima.*)**

**JORDANA DOS SANTOS ALVES**

Rio Verde - GO

2019

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE  
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DE SECAGEM DA CASCA  
DE ABÓBORA MORANGA (*Cucurbita maxima.*)**

**JORDANA DOS SANTOS ALVES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Alimentos.

Orientador: Dr. Rogério Favareto

Rio Verde - GO

Julho, 2019

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP  
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
**Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano**

A474m      Alves, Jordana dos Santos  
              MODELAGEM MATEMÁTICA DE SECAGEM DA CASCA DE  
              ABÓBORA MORANGA (Cucurbita maxima.) / Jordana dos  
              Santos Alves; orientador Rogério Favareto . -- Rio  
              Verde, 2019.  
              25 p.

              Monografia (Graduação em BACHARELADO EM ENGENHARIA  
              DE ALIMENTOS) -- Instituto Federal Goiano, Campus  
              Rio Verde, 2019.

              1. Cinética de secagem. 2. Umidade . 3. Regressão  
              não linear.      . I. Favareto , Rogério , orient. II.  
              Título.

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES  
TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

**Identificação da Produção Técnico-Científica**

|                                     |  |                          |                                |
|-------------------------------------|--|--------------------------|--------------------------------|
| <input type="checkbox"/>            | Tese   | <input type="checkbox"/> | Artigo Científico              |
| <input type="checkbox"/>            | Dissertação                                    | <input type="checkbox"/> | Capítulo de Livro              |
| <input type="checkbox"/>            | Monografia – Especialização                    | <input type="checkbox"/> | Livro                          |
| <input checked="" type="checkbox"/> | TCC - Graduação                                | <input type="checkbox"/> | Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/>            | Produto Técnico e Educacional - Tipo:<br>_____ |                          |                                |

Nome Completo do Autor: Jordana dos Santos Alves

Matrícula: 2013102200340021

Título do Trabalho: MODELAGEM MATEMÁTICA DE SECAGEM DA CASCA DE ABÓBORA MORANGA (*Cucurbita maxima*.)

**Restrições de Acesso ao Documento**

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique: \_\_\_\_\_

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 22/07/2019

O documento está sujeito a registro de patente?  Sim  Não

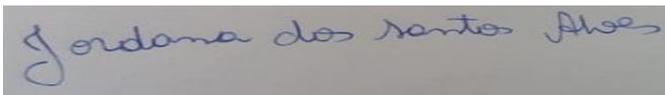
O documento pode vir a ser publicado como livro?  Sim  Não

**DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA**

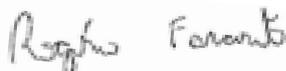
O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde, 22/07/2019.



Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais



Ciente e de acordo:

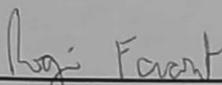
Assinatura do(a) orientador(a)

## ATA DE DEFESA DO TRABALHO DE CURSO (TC)

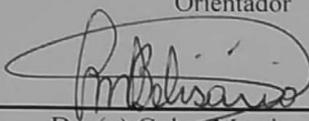
| ANO  | SEMESTRE |
|------|----------|
| 2019 | 1º       |

No segundo dia do mês de julho de 2019, às 19:00 horas, reuniu-se a banca examinadora composta pelos docentes Dr. Rogério Favareto, Dr. Celso Martins Belisário e o Eng. Alimentos Bruno Alves de Moura, para examinar o Trabalho de Curso (TC) intitulado Modelagem matemática de secagem da casca de abóbora moranga (*Cucurbita máxima*.) da acadêmica **Jordana dos Santos Alves**, Matrícula nº 2013102200340021 do Curso de Bacharelado em Engenharia de Alimentos do IF Goiano - Campus Rio Verde. Após a apresentação oral do TC, houve arguição da candidata pelos membros da banca examinadora. Após tal etapa, a banca examinadora decidiu pela **Aprovação** da acadêmica. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata, que segue datada e assinada pelos examinadores.

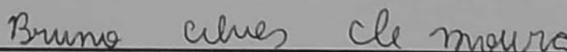
Rio Verde, 02 de Julho de 2019



Dr. (a) Rogério Favareto  
IF Goiano - Rio Verde  
Orientador



Dr. (a) Celso Martins Belisário  
IF Goiano - Rio Verde  
Membro Interno



Eng. Alimentos (a) Bruno Alves de Moura  
IF Goiano - Rio Verde  
Membro Interno/Externo

### Observação:

( ) O(a) acadêmico(a) não compareceu à defesa do TC.



*Dedico esse trabalho a minha família, que compactou com a minha formação. Aos meus amigos, que foram imprescindíveis em minha vida, me apoiando ao longo dessa caminhada.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter sido meu esteio nessa jornada e aprender que posso ser forte independente da minha dificuldade. Em minha trajetória percebi que só acreditando em mim mesma, pude manter o foco e não perder o ânimo até a conquista de meus objetivos.

A minha avó, Luzia Maria Alves, que junto com minha tia, Carlita Alves, concederam-me uma criação digna e me ofertaram a oportunidade de poder evoluir em minha vida acadêmica.

Ao meu já falecido tio, Sebastião Alves e minha madrinha Neide Ferreira Neves, mostraram-me que ter um bom caráter e trabalhar duro, enobrece o homem.

Aos meus amigos de infância, em especial a Jordana Ferreira Neves, Luzinayane da Silva Santos, Esther de Oliveira Alves e Sabrina Ferreira Ataídes, por terem me apoiado e aconselhado a todo momento, por ter sido meu alicerce, chorando com minhas tristezas e estando felizes com minhas vitórias.

Aos meus colegas que fiz durante a graduação, em especial Eliana Rosália Pauli, vocês que permitiram com que meus anos de faculdade tenham sido uma experiência única em minha vida, nunca me esquecerei de nenhum de vocês.

Ao meu orientador Dr. Rogério Favareto, que sempre me auxiliou quando solicitado, agregando novas ideias, sua paciência e calma me ajudaram a enfrentar os obstáculos impostos.

Ao professor Dr. Celso Martins Belisário e ao meu amigo Bruno Alves de Moura, pela disposição em me esclarecer dúvidas, o auxílio de vocês foi vital e corroborou consideravelmente para este trabalho.

Ao Instituto Federal Goiano Câmpus Rio Verde, por ter me propiciar a oportunidade de ingresso em um ensino superior

## LISTA DE TABELAS, QUADROS E FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Cidade de Rio Verde decorada com abóboras.....  | 10 |
| Figura 2 – Abóbora Moranga <i>in natura</i> .....  | 11 |
| Figura 3 – Cascas de Abóbora Moranga.....  | 13 |
| Figura 4 – Fluxograma do processamento da abóbora moranga para a secagem das cascas.....                                   | 15 |
| Tabela 1 – Equações de modelos matemáticos testados.....   | 17 |
| Tabela 2 – Constantes de secagem e critérios de representatividade nos diferentes modelos testados.....                    | 19 |
| Quadro 1 – Trabalhos distintos utilizando cascas de vegetais e seus respectivos modelos matemáticos com boa adaptação..... | 20 |
| Figura 5 – Razão do teor de água das lascas de casca de abóbora moranga em função do tempo.....                            | 21 |

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

|                |                                |
|----------------|--------------------------------|
| %              | Porcentagem                    |
| *              | Asterisco                      |
| °C             | Graus Celcius                  |
| ®              | Marca registrada               |
| G              | Gramma                         |
| H              | Hora                           |
| b.s            | Base seca                      |
| b.u            | Base úmida                     |
| ppm            | Partes por milhão              |
| RU             | Razão de umidade               |
| U*             | Umidade no ponto experimental  |
| U <sub>e</sub> | Umidade de equilíbrio          |
| U <sub>i</sub> | Umidade inicial                |
| Exp            | Exponencial                    |
| GLR            | Grau de liberdade real         |
| VO             | Valor observado                |
| VP             | Valor predito                  |
| $\chi^2$       | Qui-quadrado reduzido          |
| RQME           | Raiz do quadrado médio do erro |
| R <sup>2</sup> | Coefficiente de determinação   |

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| AGRADECIMENTOS .....                                | 4  |
| RESUMO .....  | 5  |
| LISTA DE TABELAS, GRÁFICOS, QUADROS E FIGURAS ..... | 6  |
| LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES .....               | 7  |
| RESUMO .....  | 8  |
| 1. INTRODUÇÃO .....                                 | 7  |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA .....                      | 10 |
| <b>2.1. Abóbora</b> .....                           | 10 |
| <b>2.2. Secagem de alimentos</b> .....              | 11 |
| <b>2.3. Modelagem matemática</b> .....              | 12 |
| <b>2.4. Subproduto casca</b> .....                  | 13 |
| <b>2.5. Comentários Finais</b> .....                | 12 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS .....                         | 15 |
| <b>3.1. Material</b> .....                          | 15 |
| <b>3.2. Métodos</b> .....                           | 15 |
| <b>3.2.1. Cinética de secagem</b> .....             | 16 |
| <b>3.2.1.1. Umidade de equilíbrio</b> .....         | 16 |
| <b>3.3. Análise estatística</b> .....               | 16 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                     | 19 |
| <b>4.1. Modelagem matemática</b> .....              | 19 |
| <b>4.2. Cinética de secagem</b> .....               | 20 |
| 5. CONCLUSÃO .....                                  | 22 |
| 6. REFERÊNCIAS .....                                | 23 |

## RESUMO

Alves, Jordana dos Santos. **Modelagem matemática de secagem da casca de abóbora moranga (*Cucurbita maxima*.)**. 2019. 25 p. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Alimentos). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Rio Verde, Rio Verde, GO, 2019.

O processo de secagem de alimentos utilizando recursos como a circulação de ar, propicia um meio de conservação de baixo custo e de simples execução em relação a outros tipos de operação envolvendo a elaboração de um produto. Portanto, objetivou-se analisar a cinética de secagem, da casca em lascas da abóbora moranga, submetidas a temperaturas de 45, 55, 65 e 75°C em estufa com circulação de ar e posteriormente calcular as constantes e coeficientes de secagem via regressão não linear dos modelos sondados, estimar o modelo matemático que alcance a melhor adaptação entre os tratamentos do processo de secagem do produto. Após a análise de dados, constatou-se que o modelo de Dois termos foi o único que ficou dentro dos critérios de representatividade, indicando bons ajustes dos dados experimentais.

**Palavras-Chave:** Cinética de secagem, umidade, regressão não linear.

## 1. INTRODUÇÃO

A região Centro-Oeste tem se tornado um polo de cultivo e comercialização de abóbora. A produção na cidade de Rio Verde, vem crescendo a cada período de safrinha, devido a utilização de tecnologias estimuladas pela Agência Goiana de Assistência Técnica, Extensão Rural e Pesquisa Agropecuária-EMATER (2019), que vem contribuindo para este aumento na produção.

A exploração dos subprodutos é de suma importância para a indústria de alimentos, através das possibilidades de utilização desse material, os produtores se beneficiam com a diminuição de custos e redução do impacto de contaminação ao meio ambiente (SCHIEBER et al., 2001). Além do mais, o uso de cascas e sementes de vegetais elevam a ingestão de fibras (MONTEIRO, 2009).

A secagem de vegetais tem como função a redução da umidade e do volume, através da retirada de água pelo fenômeno da evaporação, propiciando a conservação do alimento por maiores períodos em relação a vegetais *in natura*, pois o processo diminui a atividade de microrganismos e retarda as reações de deterioração, deste modo reduzindo as perdas pós-colheita (FIGUEIRA, 2014).

A etapa de secagem consiste na transferência de calor e massa do alimento, retirando a água contida no mesmo. Acompanhando este processo da perda de massa do produto ao longo do tempo da secagem, obtemos dados que viabilizam buscar um modelo matemático que possa descrever a perda de água no processo. Assim, simplificando a padronização e utilização dos equipamentos envolvidos no processo, monitorando o gasto energético, podemos controlar os custos de produção (CORRÊA, 2010).

Através deste trabalho, objetivou-se obter as curvas de secagem da casca em lascas de abóbora submetidas a quatro temperaturas de 45, 55, 65 e 75°C, a fim de determinar através da análise de dados, o modelo matemático que melhor descreve a cinética de secagem do produto.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Abóbora

A *Cucurbita maxima* é comumente nomeada como moranga. São oriundas das Américas e faziam parte da refeição de habitantes indígenas que antecederam o período da colonização do território brasileiro (FERREIRA, 2007).

Em 1865, a vila de Rio Verde ofereceu abóboras como alimento aos combatentes da Frente Norte da Guerra do Paraguai, durante o período de três dias os homens consumiram nas refeições o fruto, que existia em abundância e era nativo na região. A tropa entediada devido ao cardápio restrito, apelidaram a vila de Arraial das abóboras. A cidade nos dias de hoje se orgulha do apelido recebido, e o tem como um marco em sua história (FOLHA DA CIDADE, 2019).



Figura 1. Cidade de Rio Verde decorada com abóboras. Fonte: CURTA MAIS, 2019.

A moranga está dentro do grupo de hortaliças com maior número de vendas, é de fácil produção, possui produção contínua durante todo o ano e após a colheita, pode resistir durante um período de meses, mesmo sendo exposta a temperatura ambiente. É uma planta que se adapta bem a temperaturas de quinze a vinte cinco graus Celcius e se habitua a diversos solos. Comumente a moranga é utilizada para a fabricação de doces, purês ou na elaboração de receitas regionais (CONAB, 2010; RODRIGUEZ-AMAYA et al., 2008).



Figura 2. Abóbora Moranga *in natura*. Fonte: arquivo pessoal

## **2.2.Secagem de alimentos**

Da visão da engenharia é de grande valia compreender e controlar os fatores do complexo processo de secagem (DOYMAZ, 2009).

Entre os diferentes mecanismos que buscam a conservação de alimentos, a secagem é uma operação unitária da qual consiste em retirar a umidade do alimento por meio do provimento de calor, efetuando a evaporação da água contida em seu interior, podendo ser de forma convencional ou em larga escala (SILVA, 2015).

A origem não-linear desses fenômenos de transporte torna o processo de difícil controle, podendo causar alterações não desejáveis no produto (MUJUNDAR, 1997). Os alimentos são dependentes da presença de água, pois ela contribui para características como textura, disponibilidade orgânica, palatabilidade, estabilidade e maior peso. Com tudo, a água é um dos principais elementos que promovem a degradação de um alimento (CELESTINO, 2010).

Evidenciando-se como um processo tradicional que não requer dificuldades em sua operação se comparado a processos de maior complexidade, a secagem promove a conservação, facilita o transporte e auxilia em etapas de produção para formulação de alimentos, concedendo ao método, um cunho técnico (CARDOSO, 2017).

A secagem engloba processos concomitantes de transferências de calor e massa. Essa transferência de calor parte do ar para o interior do alimento, constituindo um gradiente térmico que vai das extremidades superficiais do alimento até a parte interna

do mesmo. Para tal processo, a alimentação de energia térmica tem de ser hábil para a transformação da água do estado líquido em vapor, e posteriormente este vapor gerado se deslocar até a extremidade do alimento. A transferência de calor e massa ocorre em escala molecular, podendo sofrer restrições, devido a composição, tamanho do produto e condutividade térmica específica (BARBOSA-CÁNOVAS et al., 2008; FELLOWS, 2006; KHOLMANSKIY et al., 2013; NIJHUIS et al., 1998; SINGH e HELDMAN, 2009).

### **2.3. Modelagem matemática**

A busca de dados para a cinética de secagem é primordial para a modelagem matemática da operação e entre outros fins como o projeto de secadores. A análise do sistema de secagem, dimensionamento, aperfeiçoamento e determinação da viabilidade comercial, são feitos através de simulação matemática. A simulação necessita de um modelo matemático, do qual irá melhor representar o processo de secagem do produto (JUNIOR e CORREA, 1999).

Cada alimento pode se comportar de formas distintas durante o processo de secagem, devido as propriedades físicas, químicas, a geometria, espessura e os compostos do alimento, todos eles iram influenciar o resultado final. Através de simulações do processo, podemos otimizar a montagem da linha de produção, recorrendo por intermédio modelos matemáticos (OLIVEIRA et al., 2015).

A curva de umidade e relativa, determina o tempo gasto para que se possa atingir a estabilidade no processo de secagem do alimento, em situação do controle de temperatura, umidade, velocidade e pressão, a valor da umidade de equilíbrio indica o ponto limite da perda de umidade no mesmo processo (VILELA e ARTUR, 2008).

De acordo com Araújo (2017a), os modelos matemáticos são concernentes a fatores extrínsecos e ao fenômeno de transferência de massa e energia do ar, de modo teórico. Certos modelos partem de ajustes experimentais, ou provém da segunda lei de Fick, ocorrendo que o secundário pode atingir uma resposta pouca representativa.

Os modelos matemáticos de um sistema, conseguem por meio de equações, efetuar a aproximação dos dados experimentais adquiridos, levando em consideração o modelo que tenha maior precisão, e ainda promover o ajuste do modelo ao experimento. Todo sistema tem suas singularidades, ainda assim, há distinções dentre os modelos matemáticos dos quais são condições determinantes para uma boa adaptação

(CORRÊA, 2010; CASTIGLIONI et al., 2013).

#### 2.4. Subproduto casca

Segundo Rocha et al. (2008), os subprodutos como cascas, talos, sementes e folhas são ricos em fibras e lipídios, a título de exemplo temos as sementes de abóbora; talos de brócolis, de couve, de espinafre; cascas de banana, de laranja, de limão, de rabanete e folhas de brócolis.



Figura 3. Cascas de Abóbora Moranga. Fonte: arquivo pessoal

Em relação a composição nutricional da casca, entre as três principais espécies comercializadas, *C. pepo*, *C. moschata* e *C. maxima*, conforme o estudo de Kim et al. (2012), a espécie *C. maxima* possui mais carboidratos, proteínas e lipídios se comparada as outras espécies. Em relação a concentração de tocoferóis e carotenoides a espécie *C. Maxima* possui as maiores concentrações de tocoferóis presentes na casca.

#### 2.5. Comentários Finais

Como visto anteriormente, a obtenção de dados para a cinética de secagem é primordial para a execução da modelagem matemática, assim com estas informações é possível realizar o controle do processo de secagem e projetar de secadores para este produto. Tendo em vista o aproveitamento de subprodutos que apresentam uma boa fonte de nutrientes e são

descartados, não foram encontrados na literatura relatos sobre a modelagem matemática de secagem da casca de abóbora moranga (*Cucurbita maxima.*), o que então justifica este estudo.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Material

O trabalho foi realizado no Laboratório de Fitoquímica e Fertilizantes Organominerais do Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde, no período de fevereiro a junho de 2019. As abóboras foram adquiridas em sua forma *in natura*, em um supermercado localizado no município de Rio Verde - Goiás, no mês de fevereiro de 2019.

#### 3.2. Métodos

As etapas para a execução do experimento seguiram o esquema apresentado no fluxograma da figura 4.

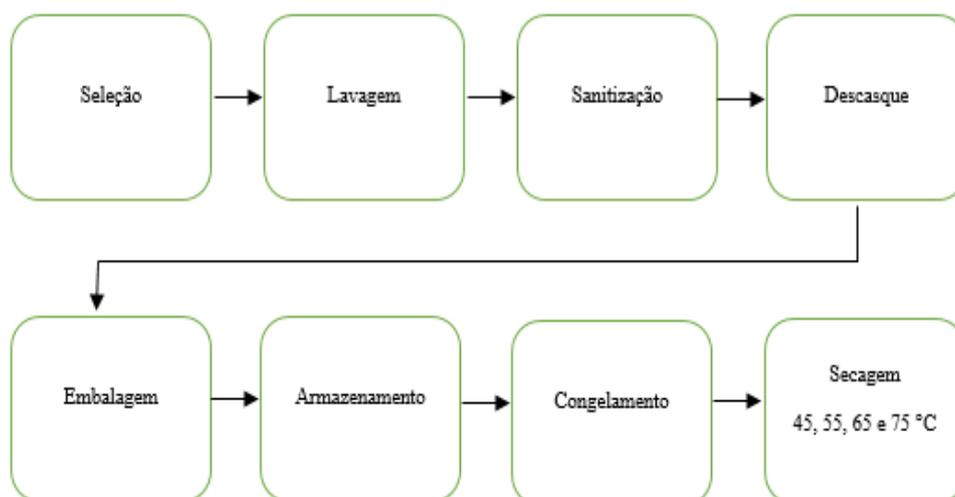


Figura 4. Fluxograma do processamento da abóbora moranga para a secagem das cascas.

As abóboras foram selecionadas, em seguida ainda em sua forma integral foram lavadas com auxílio de uma esponja em água corrente, e posteriormente levadas a sanitização, sendo imersas em uma solução de hipoclorito de sódio em concentração de 100 ppm durante 30 minutos.

Após a etapa de sanitização com a solução, foram postas em tábuas plásticas para a retirada da casca, com a assistência de facas de aço inoxidável, removeu-se as cascas em lascas de espessuras aproximadamente semelhantes.

As cascas foram retidas em sacos plásticos transparentes em frações de 150 g

por invólucro, assim embaladas e congeladas em freezer convencional, para subsequente utilização no processo de secagem.

A metodologia a obtenção das curvas de secagem e teor de umidade de equilíbrio foram de acordo ao executado por Araújo et al. (2017b), e o teor de umidade final foi determinado em conformidade com Instituto Adolfo Lutz (2008). Os experimentos foram realizados em triplicata para cada tratamento.

### **3.2.1. Cinética de secagem**

As lascas da casca foram colocadas em bandejas de alumínio de dimensões 24 x 10 x 5 cm (comprimento x largura x altura) previamente limpas, secas, identificadas e pesadas, em balança semi analítica (WebLabor® S423), foram acrescentados cerca de 5 gramas de amostra, em estufa com circulação de ar (Toth® Th-510-480) submetidas as temperaturas de 45, 55, 65 e 75° C, acompanhando a perda de massa por meio da pesagem em razão do intervalo de tempo.

As pesagens foram efetuadas em períodos de 15 minutos nas duas horas iniciais, 30 minutos nas duas horas posteriores, e a cada 60 minutos até que se alcançou a estabilidade de perda menor ou igual a 0,01 g.

#### **3.2.1.1. Umidade de equilíbrio**

Em cadinhos de alumínio previamente identificados limpos e secos, foram pesadas, em balança semi analítica (WebLabor® S423) cerca de 3 g de amostra da casca, e colocados na estufa com circulação de ar, nas mesmas circunstancias de temperatura do item 3.2.1, acompanhando a perda de massa da amostra em um período de 24 horas, até peso constante, e posteriormente com a mesma amostra foi realizada a análise de umidade a 105°C por 24 horas com três repetições até obtenção novamente do peso constante (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 2008), e através de método gravimétrico, foram definidos o teor de água e o teor de água de equilíbrio, em percentual de umidade em relação a quantidade inicial de amostra e posteriormente convertida para percentual em base seca.

### **3.3. Análise estatística**

Foram efetuados testes com quatro diferentes modelos matemáticos de secagem, sendo Dois termos, Page, Exponencial de dois termos e Newton, conforme descritas as equações na Tabela 1.

Tabela 1. Equações de modelos matemáticos testados

| Modelo                     | Equação  |
|----------------------------|--|
| Dois termos                | $RU = a \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$           |
| Page                       | $RU = \exp(-k \cdot t^n)$  |
| Exponencial de dois termos | $RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \cdot \exp(-k \cdot a \cdot t)$ |
| Newton                     | $RU = \exp(-k \cdot t)$  |

Sendo RU: Razão de umidade; t: tempo (h); k, k<sub>0</sub> e k<sub>1</sub>: constantes de secagem (h<sup>-1</sup>); e a, b, c, n: coeficientes do modelo.

$$RU = \frac{U^* - U_e}{U_i - U_e} \quad (1)$$

Sendo U\*: Umidade no ponto experimental (b.s)

U<sub>e</sub>: Umidade de equilíbrio (b.s)

U<sub>i</sub>: Umidade inicial

O estudo dos dados da cinética de secagem foram realizados por meio de regressão não linear, para isto foi utilizado o software STATISTICA® 7.0, assim foi determinado o valor estimado das constantes de secagem, com base na razão de umidade em função do tempo, pelo método de Gauss-Newton, de acordo com cada modelo matemático proposto.

No entanto, foram aplicados o coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), o erro médio relativo (P), o qui-quadrado reduzido (χ<sup>2</sup>), e a Raiz do quadrado médio do erro (RQME), como critérios de representatividade do modelo, sendo definido o modelo mais adequado que apresente os seguintes critérios, quando o R<sup>2</sup> se aproxima de 1, e os erros estimados tendem a 0, sendo valores inversamente proporcionais.

Outro critério também adotado, foi considerar os modelos matemáticos que possuíssem o erro relativo médio P, menor a 10%, conforme empregado por Corrêa et al. (2010).

As equações abaixo, representam respectivamente, o erro médio relativo (2), o qui-quadrado reduzido (3), e a raiz do quadrado médio do erro (4):

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|V_o - V_p|}{V_o} \quad (2)$$

$$\chi^2 = \Sigma \frac{(V_o - V_p)^2}{GLR} \quad (3)$$

$$RQME = \left\{ \frac{1}{n} \Sigma [(V_o - V_p)^2] \right\}^{1/2} \quad (4)$$

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Modelagem matemática

Na Tabela 2 estão expostos os valores das constantes e os coeficientes de secagem adquiridos através da análise de regressão, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o erro médio relativo (P), a raiz do quadrado médio do erro (RQME), e o qui-quadrado reduzido ( $\chi^2$ ), encontrados em todos os modelos matemáticos testados experimentalmente.

Tabela 2. Constantes de secagem e critérios de representatividade nos diferentes modelos testados.

| Dois termos                |          |          |          |           |           |           |          |          |
|----------------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
| T°C                        | A        | $k_0$    | B        | $k_1$     | $R^2$     | P (%)     | $\chi^2$ | RQME     |
| 45                         | 0,87141  | 0,65369  | 0,11237  | 0,02595   | 0,993274  | 4,573338  | 0,000617 | 0,022351 |
| 55                         | 0,09383  | 0,21753  | 0,90335  | 1,003321  | 0,997353  | 8,400531  | 0,000254 | 0,014329 |
| 65                         | 0,91205  | 0,99427  | 0,07305  | -0,00263  | 0,998889  | 3,585973  | 0,000091 | 0,008570 |
| 75                         | 0,81757  | 1,59890  | 0,16272  | 0,08770   | 0,996196  | 7,444966  | 0,000257 | 0,014412 |
| Page                       |          |          |          |           |           |           |          |          |
| T°C                        | K        |          | N        |           | $R^2$     | P(%)      | $\chi^2$ | RQME     |
| 45                         | 0,60091  |          | 0,732798 |           | 0,982549  | 19,580583 | 0,001361 | 0,036000 |
| 55                         | 0,889606 |          | 0,902910 |           | 0,996441  | 22,533153 | 0,000290 | 0,016615 |
| 65                         | 0,879707 |          | 0,734835 |           | 0,976171  | 32,2982   | 0,00165  | 0,03969  |
| 75                         | 1,067966 |          | 0,546183 |           | 0,976631  | 26,338987 | 0,001339 | 0,035721 |
| Exponencial de dois termos |          |          |          |           |           |           |          |          |
| T°C                        | A        | K        |          | $R^2$     | P(%)      | $\chi^2$  | RQME     |          |
| 45                         | 0,262736 | 1,426148 |          | 0,976155  | 25,610275 | 0,001957  | 0,042082 |          |
| 55                         | 0,417560 | 1,490933 |          | 0,996945  | 19,279167 | 0,000262  | 0,015392 |          |
| 65                         | 0,301432 | 2,013447 |          | 0,971994  | 37,435767 | 0,002045  | 0,043023 |          |
| 75                         | 0,254067 | 3,081041 |          | 0,940483  | 48,565057 | 0,003591  | 0,057007 |          |
| Newton                     |          |          |          |           |           |           |          |          |
| T°C                        | K        |          | $R^2$    | P(%)      | $\chi^2$  | RQME      |          |          |
| 45                         | 0,51403  |          | 0,957858 | 34,869330 | 0,003286  | 0,055944  |          |          |
| 55                         | 0,87122  |          | 0,994452 | 31,016419 | 0,000452  | 0,020744  |          |          |
| 65                         | 0,83274  |          | 0,98258  | 27,98     | 0,03487   | 0,00134   |          |          |
| 75                         | 1,04266  |          | 0,911749 | 56,123742 | 0,005059  | 0,069418  |          |          |

O modelo de Dois termos corresponde a uma boa adaptação aos resultados experimentais, com erros médios relativos inferiores a 10% para as temperaturas de 45, 55, 65 e 75°C. Sendo a temperatura de 65 °C o melhor tratamento, com  $R^2$  de 0,998889; P (%) de 3,585973;  $\chi^2$  de 0,000091 e RQME de 0,008570.

Os outros modelos testados de Page, Exponencial de dois termos e Newton apresentaram também uma boa representatividade em relação ao coeficiente de

determinação  $R^2$ , contudo, os erros médios relativos para todas temperaturas ultrapassaram o limite de 10%.

Lescano (2009) salienta que a equação de Page tem mostrado bons ajustes a produtos alimentícios. Para maioria dos trabalhos encontrados cujo produto de secagem seja a casca de vegetais, nas diversas temperaturas e pré-tratamentos que antecedem o processo, estes estudos também mostraram se adaptar bem ao modelo de Page, mostrando todos serem distintos deste trabalho, conforme exposto no Quadro 1.

Quadro 1. Trabalhos distintos utilizando cascas de vegetais e seus respectivos modelos matemáticos com boa adaptação

| Modelos Matemáticos com boa adaptação   | Produto       | Referencia                |
|---|---------------|---------------------------|
| Page, Lewis, Wang e Singer, Henderson-Pabis, Midilli e Aproximação de difusão | Banana Verde  | (GONÇALVES et al., 2016)  |
| Midilli e Page.   | Mulungu       | (MARTINS et al., 2014)    |
| Page  | Soja          | (DAL'TOÉ & FIORESE, 2012) |
| Crank   | Mandioca      | (VILHALVA et al., 2012)   |
| Page, Henderson-Pabis e Newton.   | Maracujá      | (SPOLADORE et al., 2014)  |
| Page, Henderson-Pabis e Lewis.  | Abacaxi       | (ALEXANDRE et al., 2013)  |
| Page e Midilli.   | Cambucá-Preto | (Santos et al.,2015)      |

Fonte: Dados levantados

Sendo assim, podemos observar a importância de se fazer o maior número de testes para obtermos uma equação que faça o melhor ajuste dos dados em uma curva.

#### 4.2 Cinética de secagem

Determinado como sendo o modelo com melhor ajuste o de Dois termos para as temperaturas de 45, 55, 65 e 75°C, a Figura 1 aponta os dados de razão de umidade predita pela adaptação deste modelo de aproximação para cada tratamento, em função do tempo.

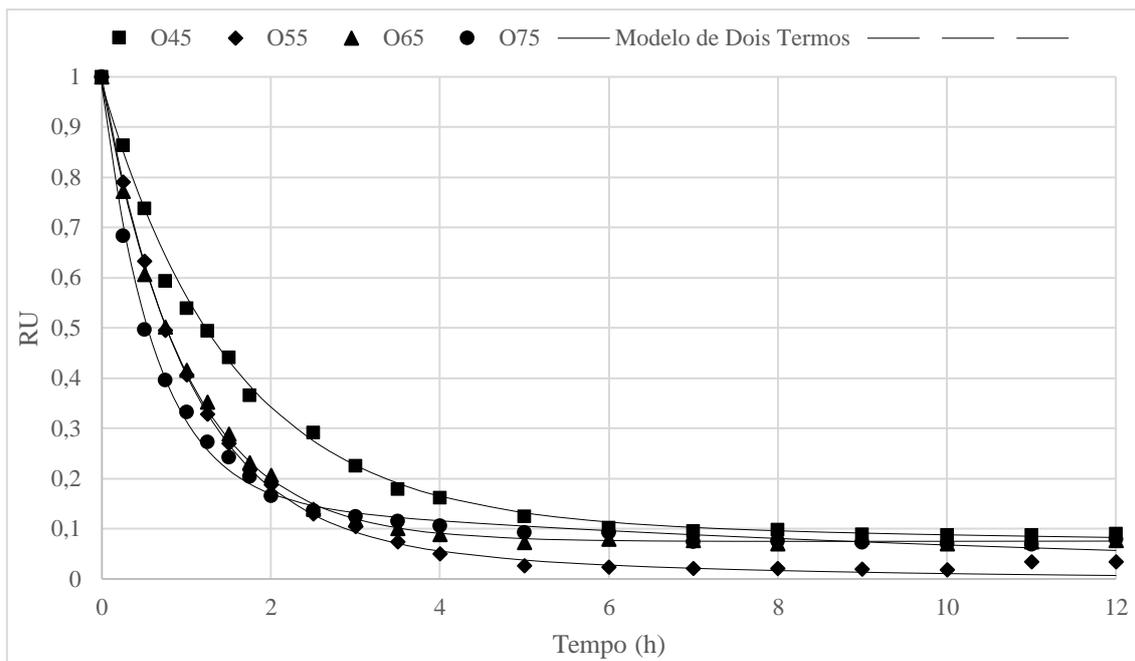


Figura 5. Razão do teor de água das lascas de casca de abóbora moranga em função do tempo.

Nota-se através dos dados, que o emprego de uma maior temperatura causa uma maior acentuação na curva, mostrando que as maiores temperaturas de secagem tendem ao equilíbrio higroscópico com maior rapidez. Esse comportamento também foi encontrado no trabalho de Silva (2016) que estudou a cinética de secagem de amostras de abóbora (*Cucurbita moschata*) *in natura* e pré-congeladas para as temperaturas de 50, 60 e 70°C.

O teor de água não variou expressivamente após cinco horas de secagem para os distintos tratamentos, isso pode ser explicado devido ao pré-congelamento das amostras durante o armazenamento. O congelamento lento, segundo os estudos de Pinedo (2003), provoca mudanças estruturais no tecido e na membrana celular, pois o processo gera o rompimento das células e também aumenta a porosidade da matéria-prima, possibilitando assim uma melhor transferência de umidade no processo de secagem.

## **5. CONCLUSÃO**

De todos os modelos matemáticos testados, o de Dois termos foi o único que alcançou resultados satisfatórios do processo de secagem. É de suma relevância, a realização do maior número de testes para a seleção da equação, que assim melhor descreva o processo de secagem de um produto. Contudo, para o processo de secagem da casca da abóbora moranga o modelo de dois termos alcançou a precisão dos parâmetros exigidos.

## 6. REFERÊNCIAS

- ALEXANDRE, H. V.; SILVA, F. L. H.; GOMES, J. P.; SILVA, O. S.; CARVALHO, J. P. D.; LIMA, E. E. Cinética de secagem do resíduo de abacaxi enriquecido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 6, p. 640-646, 2013.
- ARAÚJO, C. S.; MACEDO, L. L.; VIMERCATI, W. C. SARAIVA, S. H.; OLIVEIRA, A. N. TEIXEIRA, L. J. Q. Cinética de secagem de acerola em leito de espuma e ajuste de modelos matemáticos. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 20, e2016152, 2017.(a)
- ARAÚJO, W. D. Modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 3, p. 448-457, Fortaleza, 2017. (b)
- BARBOSA-CÁNOVAS, G.V., FONTANA, A. J., SCHMIDT, S. J., & LABUZA, T. P. Water Activity in Foods : Fundamentals and Applications. **Hoboken: Wiley-Blackwell**, 2008.
- CARDOSO, I. R. M. Análise da cinética e modelagem matemática da secagem da polpa de buriti (*auritia flexuosa l*). **ENGEVISTA**, V. 19, n.5, p. 1188-1197, 2017.
- CASTIGLIONI, G. L. ; SILVA, F. A. D., CALIARI, M., SOARES, J. M. S. Modelagem matemática do processo de secagem da massa fibrosa de mandioca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.9, p.987–994, Campina Grande, 2013.
- CELESTINO, S. M. C. Princípios de secagem de alimentos. **Embrapa Cerrado**. 51 p. Planaltina, 2010.
- CONAB. **Catálogo Brasileiro de Hortaliças: Saiba como plantar e aproveitar 50 das espécies mais comercializadas do país**. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2010. Disponível em: <http://www.ceasa.gov.br/dados/publicacao/Catalogo%20hortalicas.pdf>. Acesso em: 24 de junho de 2019.
- CORRÊA, P. C. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica L.*) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, v. 57, n.5, p. 595-601, Viçosa, 2010.
- CURTA MAIS. **Cidade do interior de Goiás é 'invadida' por abóboras e população se surpreende**. Disponível em: <http://www.curtamais.com.br/goiania/cidade-do-interior-de-goias-e-invadida-por-aboboras-e-populacao-se-surpreende>. Acesso em: 24 de junho de 2019.
- DAL'TOÉ, A.T.O., FIORESE, M.L. Estudo da secagem da casca de soja para utilização com fins alimentícios. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**. Campina Grande, v.14, n.4, p.363-372, 2012.
- DOYMAZ, I. Thin-layer drying of spinach leaves in a convective dryer. **Journal of Food Engineering**, v 32, p. 112-125, Essex, England, 2009.
- EMATER, Agência Goiana de Assistência Técnica, Extensão Rural e Pesquisa Agropecuária. **Produção de abóbora em Rio Verde se torna referência nacional**. Disponível em: <https://site.emater.go.gov.br/wp/producao-de-abobora-em-rio-verde-se-torna-referencia-nacional/>. Acesso em: 24 de junho de 2019.

FELLOWS, P. J. **Tecnologia dos processamentos de alimentos: princípios e práticas**, 2 ed. Artmed, Porto Alegre, 2006. 230 p.

FERREIRA, M. A. J. F. **Abóboras, morangas e abobrinhas: estratégias para coleta, conservação e uso**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Brasília, 2007. Disponível em: <http://www.embrapa.br/imprensa/artigos/2007/artigo.2007-04-10.7554499366>. Acesso em: 24 de julho de 2019.

FIGUEIRA, F. V. **Secagem de pequi (*Caryocar brasiliensis Camb.*) Precedida de desidratação osmótica**. 2014. 66 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

FOLHA DA CIDADE. **Rio Verde das Abóboras por quê?**. Disponível em: <http://www.jornalfolhadacidade.com/2018/08/01/rio-verde-das-aboboras-por-que/>. Acesso em: 24 de junho de 2019.

GONÇALVES, J. Q.; SILVA, M. A. P.; PLÁCIDO, G. R.; CALIARI, M.; SILVA, R. M.; MOURA, L. C.; SOUZA, D. G. Secagem da casca e polpa da banana verde (*Musa acuminata*): propriedades físicas e funcionais da farinha. **Global Science and Technology**, v. 9, n. 3, 2016.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Métodos físico-químicos para análise de alimentos. 4 ed. 1018p. São Paulo: IAL, 2008.

JÚNIOR, P.C.A.; CORRÊA, P.A. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, n.3, p.349-353, 1999

KHOLMANSKIY, A.S.; TILOV, Z.; SOROKINA Y. Drying kinetics of plant products: dependence on chemical composition. **Journal of Food Engineering**, v. 117, n. 3, p. 378-382, 2013.

KIM, M. Y. et al. Comparison of the chemical compositions and nutritive values of various pumpkin (*Cucurbitaceae*) species and parts. **Nutricion Research and Practice**, Seoul, v. 6, n. 1, p. 21-27, 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.

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, n. 6, p. 1652-1660, 2014.

MONTEIRO, B. A. **Valor Nutricional de partes convencionais e não convencionais de frutas e hortaliças**. 2009. 62 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2009.

MUJUMDAR, A. S. Drying Fundamentals. In Industrial Drying of Foods. **Blackie Academic & Professional**. p. 7-30, London, 1997.

NIJHUIS, H.H.; TORRINGA, H. M.; MURESAN, S.; YUKSEL, D.; LEGUIJT, C.; W. KLOEK. Approaches to improve the quality of dried fruit and vegetables. **Trends in Food Science & Technology**, v. 9, n. 1, p. 13-20; 1998.

OLIVEIRA, G. H. H.; ARAGÃO, D. M. S.; OLIVEIRA, A. P. L. R. de.; SILVA, M. G.; GUSMÃO, A. C. A. Modelagem e propriedades termodinâmicas na secagem de morangos. **Brazilian Journal of Food Technology**. v. 18, n. 4, p. 314-321, Campinas, 2015.

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.

ROCHA, S. A.; LIMA, G. P. P.; LOPES, A. M.; BORGUINI, M. G.; CICCONE, V. R.; BELUTA, I. Fibras e lipídios em alimentos vegetais oriundos do cultivo orgânico e convencional. **Revista Simbio-Logias**, Botucatu, v. 1, n. 2, p. 1-9, nov. 2008.

RODRIGUEZ-AMAYA, D. B.; KIMURA, M.; AMAYA-FARFAN, J. Fontes Brasileiras de Carotenóides: Tabela Brasileira de Composição de Carotenóides em Alimentos. Ministério do Meio Ambiente, Brasília 2008.

SANTOS, J. A. B. D.; RESENDE, L. G. M.; SANTOS, B. S. D.; TRAVÁLIA, B. M.; CONSTANT, P. B. L.; PAGANI, A. A. C. Modelagem matemática da secagem de casca do fruto cambucá-preto (*eugenia velutina berg.*) utilizando diferentes sistemas de secador, p. 1816-1822 . In: **In Anais do XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados - ENEMP 2015**. São Paulo, 2015.

SCHIEBER, A. et al. Byproducts of plant food processing as a source of functional compounds: recent developments. **Trends Food Science Technology**, v.12, n.11, p.401-413, Cambridge, 2001.

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, E. S.; OLIVEIRA, J.; MACHADO, A. V.; COSTA, R. O. Secagem de Grãos e Frutas: Revisão Bibliográfica. **Revista Brasileira de Agrotecnologia**, v.5, n.1, p. 19-23, Garanhuns, 2015.

SINGH, R.P.; HELDMAN, D.R. **Introduction to Food Engineering**. ed. 4. Elsevier, 2009.

SPOLADORE, S. F.; BISSARO, C.A.; VIEIRA, T.F.; SILVA, M.V.; HAMINIUK, C.W.I.; DEMCZUK, B. Modelagem matemática da secagem de casca de maracujá e influência da temperatura na cor, compostos fenólicos e atividade antioxidante. **Revista Brasileira de Pesquisa em Alimentos**, v. 5, n. 2, p. 17-25, Campo Mourão, 2014.

VILELA, C. A. A.; ARTUR, P. O. Secagem do açafrão (*Curcuma longa L.*) em diferentes cortes geométricos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.28, p.387-394, Campinas, 2008.

VILHALVA, D. A. A.; SOARES JÚNIOR, M. S.; CALIARI, M.; SILVA, F. A. Secagem convencional de casca de mandioca proveniente de resíduos de indústria de amido. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.42, p.331-339, 2012.