

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CURSO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS

MARIANA MARINE CRESPI

**CINÉTICA DE LIOFILIZAÇÃO DE FATIAS DE MANGA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MEDIANEIRA

2016

MARIANA MARINE CRESPI

**CINÉTICA DE LIOFILIZAÇÃO DE FATIAS DE MANGA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Medianeira.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Carolina Castilho Garcia

Co-orientador: Prof. Dr. Ilton José Baraldi

MEDIANEIRA

2016



**Ministério da Educação**  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Câmpus Medianeira  
Diretoria de Graduação e Educação Profissional  
Coordenação do Curso de Engenharia de Alimentos

---

**MARIANA MARINE CRESPI**

**CINÉTICA DA LIOFILIZAÇÃO DE FATIAS DE MANGA**

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado como requisito parcial para obtenção de grau de Engenheiro de Alimentos, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Medianeira, avaliado pela banca formada pelos professores:

---

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Carolina Castilho Garcia  
Orientadora

---

Prof. Dr. Ilton José Baraldi  
Co-orientador

---

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Gláucia Cristina Moreira  
Membro da banca

---

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Daiane Cristina Lenhard  
Membro da banca

---

Mariana Marine Crespi  
Aluna

Medianeira, 10 de Junho de 2016

O termo de aprovação assinado e aprovado encontra-se na Coordenação de Curso.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus e à minha família. Minha mãe, Katia Leila Marine Crespi, meu pai, Elcio Luiz Crespi, que mesmo com toda a dificuldade financeira em me manter fora, apoiaram meus estudos e não mediram esforços para me ajudarem, fazendo com que esse sonho fosse possível. À minha irmã, Nathália Marine Crespi, que contribuiu com essa ajuda e me apoiou.

Agradeço em especial à minha orientadora, Professora Dra. Carolina Castilho Garcia pela orientação na elaboração e condução desse Trabalho de Conclusão de Curso, pela extrema paciência, compartilhando sua amizade, conhecimento, atenção, fazendo críticas construtivas, que só acrescentaram à minha vida pessoal e profissional.

Ao meu Co-orientador Dr. Ilton Baraldi, que me forneceu assistência sempre que necessário, sempre sendo muito paciente e atencioso.

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná que por todos esses anos de aprendizagem, sempre dando suporte às pesquisas e ao estudo.

A todos os meus professores, que fizeram desse longo trajeto, o mais proveitoso possível, repassando seu conhecimento.

Aos técnicos dos Laboratórios que sempre estiveram dispostos a ajudar e colaborar com a pesquisa.

À toda minha turma de Engenharia de Alimentos, especialmente aos meus amigos Ígor Ciolin, Rafaela Prata, Manoella Moura, Marcelo Gava e Adriano Freitas Lima, pelas incansáveis noites de estudos, presença em todos os momentos e por sempre compartilharem boas risadas. Pela família que eu escolhi ter por perto, da qual, com certeza, eles foram peças fundamentais.

## RESUMO

CRESPI, Mariana. **Cinética de liofilização de fatias de manga**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso Engenharia de Alimentos. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2016.

A manga (*mangifera indica L.*) é uma fruta de polpa carnosa e succulenta, com sabor e aroma característicos e contém compostos bio-ativos, tais como carotenóides e vitamina C. Devido à elevada atividade de água, ela deteriora rapidamente. Com o intuito de aumentar a sua durabilidade e agregar valor à fruta, sem que ela perca suas características naturais (físicas, químicas, nutricionais e sensoriais), distintas maneiras de processamento da manga vêm sendo estudadas. A liofilização tem se mostrado promissora na conservação das características da fruta, por reduzir sua atividade de água utilizando baixas temperaturas para a secagem. Por esse motivo, o objetivo desse trabalho foi estudar a cinética de liofilização de fatias de manga Tommy Atkins em diferentes espessuras. As mangas foram adquiridas em mercado local da cidade de Medianeira, PR, foram limpas e descascadas manualmente. Fatiou-se a fruta em três espessuras distintas (0,5, 1,0 e 1,5 cm) utilizando um fatiador de frios elétrico comercial e, posteriormente, as fatias foram seccionadas utilizando um molde metálico retangular nas dimensões de 1,7 x 2,7 cm. As fatias de manga foram acomodadas em bandejas metálicas perfuradas e submetidas ao congelamento à temperatura de  $-20 \pm 2$  °C, por 24 h. A liofilização foi realizada em um liofilizador Labconco, à pressão de 0,024 mbar, condensador a -40 °C e temperatura de aquecimento das bandejas de 40 °C. Os dados experimentais foram ajustados a 9 modelos matemáticos, através do software *Statisc 7.0*, e o modelo de Fick foi utilizado para o cálculo do coeficiente de difusão da água durante a liofilização de mangas. A difusividade da água durante a liofilização das fatias de manga variou de 0,61 a  $2,12 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>, aumentando com o aumento da espessura das fatias, fato possivelmente relacionado ao tamanho dos cristais formados durante o congelamento das amostras. Os modelos que melhor se ajustaram aos dados experimentais foram: o de Page, para a espessura de 0,5 cm, com  $R^2 = 0,998$  e  $SE = 0,009$ ; o de Verma, para a espessura de 1,0 cm, com  $R^2 = 0,988$  e  $SE = 0,027$ ; e o modelo de Aproximação da Difusão, para a espessura de 1,5 cm, com  $R^2 = 0,997$  e  $SE = 0,013$ .

**Palavras-chave:** *Mangifera indica L.*; Secagem; Modelagem matemática.

## ABSTRACT

CRESPI, Mariana. **Kinetics freeze-drying of mango slices**. 2016. Work Completion of course. Course Food Engineering. Federal Technological University of Paraná. Medianeira, 2016.

The mango is a fruit that has a fleshy and juicy pulp with characteristic aroma and flavor, it also contains bio-active compounds, such as carotenoids and vitamin C. Because of the high water activity, it deteriorates rapidly. In order to increase its durability and add value to the fruit without lost its natural characteristics (physical, chemical, nutritional and sensory), distinct mango processing ways have been studied. Freeze drying has shown promise in the conservation of fruit characteristics, due to the water activity reduction through low temperatures. Therefore, the objective of this study was to explore the freeze drying kinetics of Tommy Atkins mango sliced in different thicknesses. The mangoes were purchased at a local market of Medianeira, Paraná, then cleaned and peeled manually. The fruit was sliced into three different thicknesses (0.5, 1.0 and 1.5 cm) using a commercial electric slicer and subsequently the slices were sectioned through a rectangular metal mold the dimensions of 1.7 x 2.7 cm. The mango slices were placed in perforated metal trays and led to freezing process at a temperature of  $-20 \pm 2$  ° C for 24 hours. Freeze drying was performed in a Labconco lyophilizer at a pressure of 0.024 mbar with the condenser set at  $-40$  ° C and the trays' heating temperature were 40 ° C. Experimental data were fitted by nine mathematical models through Statistic 7.0 software and the Fick model was used to calculate the diffusion coefficient of water during the mangoes freeze drying process. The water diffusivity during the freeze drying of the mango slices ranged from 0,61 to  $2,12 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup> raising with the increase in slices thickness, a fact possibly due to the size of the crystals formed during the samples freezing process. The models that best fitted the experimental data were the Page model for the thickness of 0.5 cm, with  $R^2 = 0.998$ , SE = 0.009; the Verma model, for 1.0 cm of thickness,  $R^2 = 0.988$  and SE= 0.027; and the diffusion approximation model for the thickness of 1.5 cm,  $R^2 = 0.997$  and SE = 0.013.

**Keywords:** *Mangifera indica L.* ; dried; mathematical modeling.

## INDÍCE DE FIGURAS

Figura 1 – Curvas típicas de secagem, em que: “a” representa a evolução do conteúdo de umidade; “b” representa a cinética de secagem e “c” representa a evolução da temperatura do produto.....	17
Figura 2 - Liofilizador labconco com os recipientes acoplados contendo as amostras de manga para realização da cinética de secagem.....	26
Figura 3 – Curva de secagem para fatias de mangas nas espessuras de 0,5; 1,0 e 1,5 cm. ....	30

## INDÍCE DE TABELAS

Tabela 1 – Tempos (h) de pesagem das amostras de manga nas diferentes espessuras para o acompanhamento da cinética de secagem das mesmas. ....	27
Tabela 2 – Modelos matemáticos utilizados para prever a secagem de produtos agrícolas. ....	28
Tabela 3 – Coeficientes de difusão efetivos da água durante a liofilização das fatias de manga nas espessuras de 0,5, 1,0 e 1,5 cm e parâmetros estatísticos para avaliação do ajuste do modelo aos dados experimentais. ....	31
Tabela 4 – Coeficiente de determinação e erro médio estimado determinados para os modelos matemáticos propostos (Eqs. 5 a 13). ....	32



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>12</b>
2.1. OBJETIVO GERAL .....	12
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>13</b>
3.1. MERCADO DE FRUTAS NO BRASIL .....	13
3.2. MANGA .....	14
3.3. DESIDRATAÇÃO DE ALIMENTOS .....	16
3.4. LIOFILIZAÇÃO .....	18
3.5. MODELAGEM .....	21
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>25</b>
4.1. PREPARO DA MATÉRIA-PRIMA .....	25
4.2. LIOFILIZAÇÃO .....	25
4.3. MODELAGEM .....	27
4.4. DETERMINAÇÃO DE UMIDADE .....	28
4.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	29
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>30</b>
<b>6. CONCLUSÃO</b> .....	<b>34</b>
<b>7. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>35</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A produção de frutas vem apresentando um crescimento contínuo mundialmente. Nos anos de 89/91 estimou-se uma produção de 420 milhões de toneladas de fruta, em 1996, tal produção ultrapassou 500 milhões de toneladas e em 2012 colheu-se 773,8 milhões de toneladas de frutas. A China, Índia e Brasil são considerados os 3 maiores produtores de frutas, com a soma das produções correspondendo a 44,2 % do total mundial (ANDRADE, 2015).

Estudos mostram que, o desempenho econômico brasileiro deve-se muito ao setor agrícola, no qual obteve-se a participação de 20 % do PIB entre 2010-2013. A agricultura brasileira, nas últimas três décadas, vem crescendo de forma contínua, sendo que, em 2015, a produção agrícola mais que duplicou quando comparada a de 1990. Em relação às exportações, os setores agrícolas e industriais, totalizaram cerca de US\$ 86 bilhões em 2013, correspondendo a 36 % do que foi exportado. Tais exportações compensaram os déficits que o Brasil sofreu em outros setores no ano de 2015, fazendo com que o país apresentasse um papel importante no mercado internacional, ocupando o 2º lugar de maior exportador agrícola mundial e o maior fornecedor de açúcar, soja, laranja e café (OCDE – FAO, 2015).

Tal fator pode ser relacionado ao clima variado que o Brasil possui, o que permite cultivar uma grande variedade de frutas. A manga é uma fruta muito apreciada devido ao seu sabor e aroma característicos (MARQUES, 2008), sendo uma fruta não sazonal, o que permite a sua disponibilidade ampla durante o ano inteiro (BRUNINI; DURIGAN; OLIVEIRA, 2002). No país, os principais estados produtores de manga são: São Paulo, Bahia, Rio Grande do Sul, Minas Gerais, Santa Catarina, Pará, Paraná, Espírito Santo, Pernambuco e Ceará (ADECE, 2013).

Apesar de o setor agrícola brasileiro ser um celeiro extremamente importante para a economia do país, apresentando recordes em suas safras, o país é considerado como o líder em perdas pós-colheita e desperdícios (VILELA et al., 2003). As perdas estimadas no setor hortifrutigranjeiro são de 30 a 40 %, causadas por danos que vão desde o produtor até o consumidor (DURIGAN; MATTIUZ; DURIGAN, 2005).

O processo de pós-colheita de produtos agrícolas é um conjunto de tarefas cuja finalidade é preservar a qualidade do produto, aumentando seu período de conservação (MARCHESE; FIGUEIRA, 2005). Conhecer a fisiologia pós-colheita é extremamente

importante, pois dessa forma utilizam-se os recursos corretos para a conservação do alimento, como o tempo e as condições adequadas de armazenamento, a fim de não alterar as características físicas, sensoriais e nutricionais do produto (ABREU; CARVALHO; GONÇALVEZ, 1998).

Devido a alta perda de produtos agrícolas, dados da FAO (2013) mostram que cerca de 1,3 bilhões de toneladas de alimentos são desperdiçados anualmente e isso reflete não somente na economia, mas também causa impacto nos recursos ambientais. Em 2015, um terço de todo o alimento produzido no mundo foi perdido ou desperdiçado por conta de práticas de manuseio inadequadas, isso equivale a quase 1,7 bilhões de toneladas de alimentos. O Brasil está no ranking dos 10 países que mais desperdiçam, com 30 % referentes a frutos e 35 % à hortaliças, sendo que na produção ou na pós colheita são verificadas as maiores perdas, devido ao manuseio ou armazenamento inadequado (FAO, 2015). As injúrias mecânicas são a principal causa das perdas pós-colheita, podendo ser causadas por impacto, compressão e corte. Isso acaba reduzindo a vida útil do produto, causando uma desvalorização comercial (DURIGAN; MATTIUZ; DURIGAN, 2005).

Uma maneira de minimizar as perdas na colheita e pós colheita é o processamento da fruta ou partes dela, de maneira a agregar valor ao produto que seria perdido. Uma técnica bastante antiga de conservação de alimentos é a secagem, que consiste em uma redução no teor de água do produto, diminuindo sua atividade de água e, por consequência, diminuindo as reações químicas e bioquímicas e o desenvolvimento de micro-organismos, que porventura levariam à degradação do alimento (PONTES et al. 2007; DURIGAN, MATTIUZ, DURIGAN, 2005; SILVA et al., 2003).

Um tipo de secagem que está sendo bastante estudado é a liofilização, utilizada principalmente em matérias termo-instáveis. Ela consiste em uma desidratação/secagem do produto através da sublimação da água a temperaturas baixas e sob vácuo (BARBOSA-CANOVAS, VEJA-MERCADO, 2000). É um processo em que ocorre a passagem da água contida no material do estado sólido diretamente para o gasoso, sem passar pelo estado líquido, nas condições adequadas de temperatura e pressão (ALVES et al., 2008).

Uma vez que a desidratação de alimentos por liofilização possibilita maior retenção de nutrientes do que a secagem convencional (FISSORE, PISANO, BARRESI, 2013; ANDRADE et al., 2015), e, visando a redução das perdas na colheita e na pós

colheita de frutas, em virtude de seu processamento, esse trabalho objetivou estudar a liofilização de fatias de manga em diferentes espessuras (0,5, 1,0 e 1,5 cm).

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. OBJETIVO GERAL

Estudar a cinética de liofilização de fatias de manga em diferentes espessuras.

### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar a umidade das amostras frescas e liofilizadas de manga cultivar Tommy Atkins;
- Liofilizar fatias retangulares (1,7 x 2,7 cm) de manga em três diferentes espessuras (0,5, 1,0 e 1,5 cm);
- Modelar a cinética da liofilização das fatias de manga.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. MERCADO DE FRUTAS NO BRASIL

Em 2013 o Brasil foi o 3º maior produtor de frutas do mundo, com colheitas consideráveis de laranja e banana, melancia, caju, coco, mamão, abacaxi, uva, maçã, limão e manga, sendo esta liderada pelo estado da Bahia, seguido por São Paulo, Pernambuco e Minas Gerais. Como o Brasil é um país que possui diversos tipos de clima e solo, há facilidade de produção de uma diversidade de frutas, sejam elas temperadas, subtropicais ou tropicais (ADECE, 2013). Dentre as frutas mais produzidas pelo Brasil, destacam-se a banana, maçã, uva, melão e frutas tropicais, como o abacate, abacaxi e manga (OCDE-FAO, 2015), sendo que, em 2012, o país ocupou o 24º lugar na produção mundial de manga (FAO, 2012) e em 2013, a fruta ocupou o 30º lugar dos produtos mais cultivados no país (FAO, 2015).

As frutas desempenham um importante papel no cenário econômico brasileiro, tanto no mercado interno quanto no mercado externo. No ano de 2014 o valor referente às exportações brasileiras de frutas frescas foi de US\$ 877,6 milhões, com uma quantidade de produtos exportados referente a 778 mil toneladas, com destaque para mamões, mangas e melões, com produção concentrada principalmente no Nordeste (MAPA, 2015)

De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação, no ano de 2012 a produção mundial estimada de frutas tropicais foi de 82 milhões de toneladas, o que representou um aumento de 1,7% em relação ao ano de 2004 (FAO, 2012).

Estudos mostram que as projeções para os anos de 2024/2025 são de aumentos nas produções de: melão em 39,3%, mamão em 31,2% e manga em 25,9% em relação ao ano de 2014/2015. Em relação à exportação, estima-se um aumento de 34,8% para o melão e 16,9% para a manga (MAPA, 2015).

Tal fator é favorecido pelo fato de o Brasil possuir uma variedade de cultivares de frutas produzidas, tanto em lavouras permanentes, com foco de produção em laranja, banana, coco, mamão e uva, quanto em lavouras temporárias, com cultivos de melancia,

abacaxi e melão. Em 2013, a produção de frutas no país foi referente a 43,6 milhões de toneladas (SEBRAE, 2015).

Um fato que está ligado à produção de frutas, é a perda das mesmas, seja na colheita ou na pós-colheita. Quando o manejo, tanto na colheita, quanto na pós-colheita, é inadequado o processo de senescência acaba se acelerando e, conseqüentemente, comprometendo a qualidade do produto (AZZOLINI; JACOMINO; BRON, 2004).

Dessa forma, pode-se entender como perdas os produtos que não estão bons para o consumo humano, por estarem deteriorados, amassados, com “machucados” ou podres, injúrias essas causadas tanto na hora do manuseio/colheita, transporte, estoque/armazenamento ou até mesmo nas redes varejistas ou centrais de abastecimento (VILELA et al., 2003).

Quando algum desses “defeitos” é encontrado na fruta, ela pode sofrer perda de peso, por perder água (perda quantitativa), pode apresentar mudança no sabor, aroma, textura e em sua aparência (perda qualitativa) e também pode ocorrer perda de nutrientes como vitaminas, proteínas e lipídios (perda nutricional) (CHITARRA; CHITARRA 2005).

### 3.2. MANGA

A manga é uma fruta que teve origem na Ásia, mais precisamente na Índia. Hoje em dia, ela é cultivada em todos os países de climas tropical e equatorial. O Brasil é um dos maiores exportadores e produtores de manga do mundo, com 1.176 mil toneladas produzidas, com destaque para as regiões nordeste e sudeste, com 66% e 33% da produção nacional (IBGE, 2013).

A manga foi apontada, em 2010, como uma das 10 culturas mais cultivadas no mundo (FAO, 2010). No país, diversas espécies podem ser encontradas em várias regiões, sendo cotado, em 2011, como o 4º exportador mundial (FAOSTAT, 2011). No ano de 2012, o Brasil exportou cerca de 127 mil toneladas de manga, isso corresponde a 12% da produção nacional (MDIC, 2013). Segundo dados do IBGE (2013), a produção de manga teve um aumento de 41%, de 2000 a 2012.

Estudos realizados pelo SEBRAE (2015), apontam o Brasil como o 3º maior produtor de frutas do mundo, com 38,36 milhões de toneladas, ficando atrás somente da China e Índia. As frutas mais exportadas no Brasil, em 2014, foram melão, lima limão, banana e manga, esta com um valor de 133,033 milhões de toneladas.

Sendo uma fruta tropical, a manga possui uma grande aceitação dentre os consumidores devido ao seu aroma, sabor e cor característicos, além de apresentar compostos bioativos, tais como vitamina C e  $\beta$ -caroteno (TACO, 2011; RODRIGUEZ-AMAYA et al., 2008). Por ser sazonal sua utilização industrial é viável, uma vez que o processamento reduz as perdas, sendo obtido melhor aproveitamento do alimento (BRUNINI; DURIGAN; OLIVEIRA, 2002).

Os cultivares mais produzidos no Brasil são a manga Espada, comum em todo território nacional, manga Rosa, Bourbon, no estado de São Paulo, Ubá, em Minas Gerais, Carlotinha, na Bahia e Tommy Atkins, Palmer e Haden, produzidas em maior quantidade por serem as mais consumidas e as mais exportadas (FONSECA, 2014).

Atualmente, o cultivar de manga mais produzido no Brasil é a Tommy Atkins, correspondendo a aproximadamente 80% de área cultivada e 90% das exportações da fruta no país (FURLANETO, SOARES, BERTANI, 2015).

Suas características variam conforme a cultura, estágio de maturação e outros fatores, uma vez que a água é o principal constituinte da manga, seguida de carboidratos, ácidos orgânicos, sais minerais, proteínas, vitaminas e pigmentos (CARDELLO; CARDELLO, 1998).

A forma de consumo mais comum é a fruta *in natura*, sendo ela usada amplamente na culinária em forma de mousses, saladas, bolos, vitaminas e tortas. Em escala industrial, a manga é mais utilizada na produção de polpas, sucos, néctares e geleia (RAMOS; SOUSA; BENEVIDES, 2010).

A manga apresenta também inúmeras possibilidades para industrialização, ainda não exploradas. Como o país é um produtor mundial de manga, seu aproveitamento a fim de reduzir as grandes perdas, possibilitando a inovação e o desenvolvimento de novos produtos, mantendo a qualidade nutricional da fruta, é fator de suma importância (RIBEIRO; SABAA-SRUR, 1999).



### 3.3. DESIDRATAÇÃO DE ALIMENTOS

A população vem procurando uma vida mais saudável, optando por alimentos mais saudáveis e naturais. Como consequência, o consumo de frutas e hortaliças vem crescendo, já que ambos são conhecidos por possuírem vitaminas e minerais.

Entretanto, como a quantidade de água que frutas e hortaliças possuem é alta, sua vida de prateleira é limitada. Esse fato impulsionou a produção de alimentos desidratados, já que a ação dos micro-organismos é reduzida, devido à baixa atividade de água nesses produtos (GOMES, CEREDA, VILPOUX, 2007; JERONIMO, 2013).

A quantidade de água presente no alimento é fator de extrema importância em relação às interações químicas e físicas (GHODAKE et al., 2007). Quando o alimento possui um alto teor de água, a possibilidade de crescimento microbiano é maior. Ao reduzir o teor de água livre de um alimento, diminui-se a atividade microbiana e a velocidade de reações químicas e bioquímicas que poderiam ocorrer durante seu armazenamento (YAZDANI et al., 2006).

Frutas secas são produtos desidratados muito utilizados pela indústria tanto na panificação, quanto na fabricação de recheios, dentre outros. O ideal para os alimentos desidratados é manter as características do produto fresco, principalmente no que diz respeito ao conteúdo nutricional, aroma, sabor e textura. Para que isso seja possível, a escolha do tipo de secagem a ser utilizada é um fator de grande influência (MARQUES, 2008).

De acordo com Celestino (2010), durante o processo de secagem de alimentos, alguns nutrientes são perdidos, como as vitaminas, que são facilmente degradadas em temperaturas mais altas. Por outro lado, a secagem apresenta vantagens, pois acarreta em:

- Aumento da vida útil do produto;
- Um alimento nutritivo, mesmo com a quantidade de nutrientes reduzida;
- Facilidade no transporte e na comercialização, uma vez que o alimento seco é mais leve, compacto e suas qualidades sensoriais e químicas permanecem as mesmas por um tempo maior;
- Redução do impacto e perda de produtos na operação de pós colheita.

O processo de secagem consiste na transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem, para que ocorra a evaporação parcial da umidade contida no alimento.

O processo de convecção forçada de ar aquecido é o mais utilizado em processos de secagem industriais de alimentos (GARCIA, 2012).

Baseado nos fenômenos de transferência de massa e calor, a secagem, pode ser dividida em três estágios, conforme ilustrado na Figura 1.

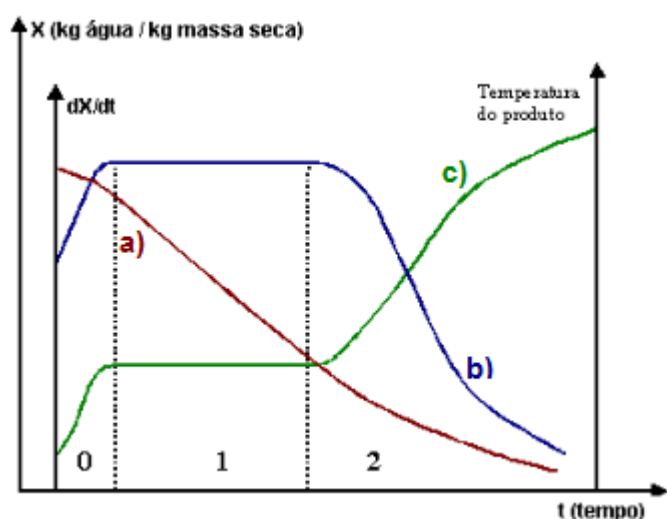


Figura 1 – Curvas típicas de secagem, em que: “a” representa a evolução do conteúdo de umidade no tempo; “b” representa a cinética de secagem, a variação da taxa de umidade no tempo e “c” representa a evolução da temperatura do produto no tempo.

Fonte: Adaptado de PARK; YADO; BROD (2001).

Na Figura 1 a curva “a” representa o teor de água do produto em base seca,  $X$ , durante a secagem em relação ao tempo de secagem,  $t$ . A curva “b” está relacionada à velocidade de secagem e à variação taxa de umidade em relação ao tempo. Na curva “c”, é mostrada a variação da temperatura do produto que está sendo seco em relação ao tempo (PARK; YADO; BROD, 2001).

A Figura 1 apresenta as três fases do processo de secagem. O primeiro período, chamado período de indução (0), é referente ao início da secagem. Nessa etapa acontece uma elevação gradativa da temperatura do produto e da pressão do vapor de água. Esse aumento cessa quando a transferência de calor é equivalente à transferência de massa, ou seja, quando a temperatura do sólido atinge a temperatura de bulbo úmido do ar de secagem.

A segunda etapa refere-se ao período de taxa constante de secagem (1), nesse período a temperatura do sólido será a temperatura do bulbo úmido do ar de secagem e a taxa de secagem é constante. Dessa forma, nessa etapa ocorre a evaporação da água livre.

A velocidade de secagem é considerada constante, pois a transferência de calor e de massa são equivalentes, já que a água transferida do sólido encontra-se livre em sua superfície.

O terceiro período (2) representa a taxa de secagem decrescente, uma vez que a água presente no alimento não se encontra livre na superfície do sólido e, portanto, deve difundir de seu interior até a mesma. Isso ocasiona uma redução na velocidade de transferência de massa. A transferência de calor nessa etapa não é suprida pela transferência de massa e a temperatura do produto aumenta, igualando-se à temperatura de bulbo seco do ar de secagem. A velocidade de transporte da água é controlada pela difusão da água do interior do sólido para sua superfície, possibilitando a modelagem do processo com base na Lei de Fick.

Apesar da secagem apresentar pontos positivos em relação à conservação e aproveitamento do alimento, ela pode causar alterações indesejáveis nas características sensoriais e nutricionais do produto devido à natureza não linear dos fenômenos envolvidos na secagem, dificultando o controle do processo. A intensidade de tais alterações, depende, principalmente, da forma com que a secagem é conduzida (GARCIA, 2012).

Dessa forma, mudanças químicas e físicas ocorrem durante o processo de secagem, influenciando na qualidade do produto em termos de valor nutricional, cor, aroma, sabor e textura. Durante a secagem, ocorrem reações de escurecimento enzimático e não enzimático, reações de oxidação de lipídeos e vitaminas, degradação de pigmentos, dentre outras (CELESTINO, 2010).

### 3.4. LIOFILIZAÇÃO

A liofilização, chamada também de criodesidratação ou criosecagem, é um processo singular de secagem, ocorrendo em condições diferenciadas de temperatura e pressão. A água presente no material a ser desidratado encontra-se no estado sólido, passando para o estado gasoso, sem retornar ao estado líquido durante o processo, ou seja, ocorre a sublimação da água do material (VIEIRA, 2010).

Muito utilizada para materiais termo instáveis, a liofilização consiste em uma desidratação/secagem do produto através da sublimação da água a temperaturas baixas e sob vácuo (BARBOSA-CÁNOVAS, 2000). Ou seja, é um processo em que ocorre a

passagem da água contida no material do estado sólido diretamente para o gasoso, sem passar pelo estado líquido, nas condições adequadas de temperatura e pressão (VIEIRA, 2010; ALVES et al., 2008).

O desempenho e as características finais do produto liofilizados depende do congelamento do material, pois o produto é congelado a temperaturas bem inferiores ao seu ponto de congelamento. Dessa forma, a velocidade e o tipo de congelamento utilizado são fatores de grande influência na estrutura final do alimento, uma vez que a formação dos poros no alimento depende do tamanho e da localização dos cristais de gelo formados (TERRONI et al., 2013).

Segundo Gava (1978), ao comparar os processos de secagem em estufas e a liofilização, observam-se algumas vantagens na operação por liofilização em relação aos produtos desidratados. Mesmo com a secagem em estufa apresentando custos relativamente mais baixos, ela ocasiona danos maiores às frutas, como perda de vitaminas e outros nutrientes, decorrentes do uso de temperaturas relativamente elevadas. Na liofilização, o processo de secagem é realizado através de condições de temperatura e pressão diferenciados, possibilitando a sublimação da água contida no alimento em baixas temperaturas e com ausência de ar atmosférico. Dessa forma, as propriedades sensoriais e químicas do alimento não sofrem muita alteração.

Três etapas que constituem o processo de liofilização. A primeira é o congelamento, o qual pode ser realizado em um congelador de concha, que consta de um frasco que rotaciona em um banho de gelo seco e metanol, ou por nitrogênio líquido. O material é solidificado a uma temperatura inferior ao seu ponto de congelamento inicial. Além de utilizar temperaturas baixas, o processo deve ser realizado com muita cautela, uma vez que se conduzido de forma errônea, afeta a qualidade do produto liofilizado (SHUKLA, 2011)

Quanto maior a diferença de temperatura entre o produto e o meio congelante, maior é a força motriz à transferência de calor e, conseqüentemente, mais rápido ocorrerá o congelamento do produto. Isso é de fundamental importância para produtos alimentícios, devido ao tamanho dos cristais de gelo formados. Durante o congelamento lento de um alimento formam-se grandes cristais de gelo, que são facilmente sublimados, porém, resulta na formação de grandes poros após a liofilização, ocasionando grande perda de aromas, vitaminas e outros compostos bioativos (SHUKLA, 2011).

Por outro lado, o congelamento rápido é o resultado de uma queda rápida de pressão ou de temperatura. Como resposta são formados pequenos cristais de gelo distribuídos de forma uniforme, não afetando significativamente a estrutura das células (BOSS, 2004). Os pequenos cristais de gelo formados são liofilizados com maior dificuldade, ou seja, será necessário maior tempo de processamento, porém os poros formados após a liofilização são pequenos, de maneira que a perda de compostos voláteis ou bio-ativos é reduzida.

A segunda etapa da liofilização é a secagem primária. Nesse estágio, a pressão é reduzida, controlada por vácuo parcial, e a temperatura é aumentada no liofilizador, a fim de sublimar a água contida no produto. Assim, são originados espaços vazios no interior da matriz alimentícia, que antes eram ocupados pelo gelo sublimado, resultando em um produto poroso. O vapor de água passa para o condensador, que opera a baixas temperaturas, para impedir que o vapor atinja a bomba de vácuo, comprometendo o equipamento (SHUKLA, 2011).

A última etapa da liofilização é a secagem secundária. Nessa etapa do processo é eliminada a água que não foi congelada, ou seja, a água ligada, e que, por consequência, não foi removida na primeira secagem. A água ligada deve ser desorvida da matriz alimentícia, de maneira que a temperatura de trabalho é superior à do primeiro estágio, podendo ser superior a 0 °C (SHUKLA, 2011).

Ao final do processo, o vácuo do sistema é quebrado e a água contida no produto liofilizado chega a ser inferior a 5% (SHUKLA, 2011).

A liofilização requer um custo muito alto pelo uso energético em larga escala, devido à energia necessária para a desorção e sublimação da água, às baixas taxas de secagem e temperaturas de condensação, além do uso de vácuo, o que acaba limitando a sua utilização em escala industrial (MARQUES, 2008).

Vários estudos foram conduzidos sobre o processo de liofilização, focando em características nutritivas dos produtos após o processamento. Oliveira, Afonso e Costa (2011) estudaram o comportamento higroscópico de sapoti liofilizado; Martins et al. (2011) avaliaram a liofilização como alternativa para conservação de leite humano; Menezes, Torres e Srur (2008) avaliaram o valor nutricional da polpa de açaí liofilizada; Fante (2011) estudou a cinética de branqueamento e de secagem por ar quente e liofilização do alho; Nogueira (1973) estudou o controle do escurecimento enzimático nas propriedades sensoriais de maçãs ohio beauty conservadas por congelamento e

liofilização; Vieira, Nicoleti e Telis (2012) estudaram a liofilização de fatias de abacaxi; Ribeiro (2012) estudou a liofilização de produtos alimentícios perecíveis, como carnes, mariscos e peixes.

### 3.5. MODELAGEM

A simulação dos sistemas de secagem, utilizando um modelo matemático que represente adequadamente os dados experimentais permite sua otimização, o dimensionamento de equipamentos e processos e a determinação do melhor método para a aplicação comercial desse processamento. De acordo com a literatura, existem diversos modelos matemáticos para simular a secagem, podendo ser métodos teóricos, semiteóricos ou empíricos (AFONSO JÚNIOR; CORRÊA, 1999).

Os cálculos da cinética de secagem dependem da etapa de secagem do produto (Figura 1), uma vez que seu comportamento ao longo da operação de secagem não é constante. Assim, na etapa em que a taxa de secagem é constante, as transferências de calor e massa na superfície do produto são equivalentes, fazendo com que a velocidade de secagem seja constante. No período de taxa decrescente, as transferências internas são as que definem a velocidade de secagem, sendo este o período mais relevante para os cálculos de cinética quando se realiza a secagem de produtos agrícolas e alimentícios (GARCIA, 2012; PARK et al., 2004).

Dentre os mecanismos de transporte existentes no período em que a taxa de secagem é decrescente, destacam-se três, que são considerados primordiais: difusão líquida, escoamento capilar e difusão de vapor. Essa etapa de secagem é a mais importante na modelagem da secagem de produtos agrícolas, uma vez que o período de taxa constante dificilmente é detectado nos experimentos de secagem, por apresentar curta duração (GARCIA, 2012; VENTURINI et al., 2012; KUROZAWA, 2005; PARK et al., 2004; MIDILLI; KUCUK; YAPAR, 2002; PANCHARIYA; POPOVIC; SHARMA, 2002).

A lei de Fick é a base da teoria da difusão, pois através dela é possível mostrar que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água (Equação 1). Crank (1975) calculou diversas soluções da equação de difusão

(Equação 1) para as condições iniciais, de contorno e para os sólidos que possuem uma geometria definida (Equação 2), tais como corpos infinitos (placas, cilindros e esfera) ou semi infinitos (GARCIA, 2012). A Equação 2 apresenta a solução integrada de Crank (1975) para uma placa infinita.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{ef} \frac{\partial X}{\partial z} \right) \quad \text{Eq. 1}$$

Em que:  $X$  representa a umidade, em base seca (kg de água/ kg de matéria seca);  $D_{ef}$  representa a difusividade efetiva da água, em  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $t$  representa o tempo, em s;  $z$  representa uma dimensão característica que depende do formato do produto, em m.

$$\frac{\bar{X}_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \left[ e^{\left(\frac{-\pi^2}{4} Fo\right)} + \frac{1}{9} e^{\left(\frac{-9\pi^2}{4} Fo\right)} + \frac{1}{25} e^{\left(\frac{-25\pi^2}{4} Fo\right)} + \frac{1}{49} \dots \right] = f(Fo)_{placa\ inf} \quad \text{Eq. 2}$$

$$Fo = \frac{D_{ef} \cdot t}{z^2} \quad \text{Eq. 3}$$

Em que:  $X_t$  representa a umidade do sólido no tempo  $t$ , em base seca;  $X_{eq}$  é a umidade de equilíbrio, em base seca;  $X_0$  representa a umidade inicial do sólido, em base seca;  $Fo$  é o número de Fourier;  $D_{ef}$  representa o coeficiente de difusão do líquido aplicável ao movimento através do sólido, em  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $t$  é o tempo de secagem;  $z$  é a meia espessura da placa.

As equações semi-empíricas para a modelagem da secagem são baseadas na lei de resfriamento de Newton para transferência de calor por convecção, adotando a ideia de que, durante a secagem, as condições sejam isotérmicas e que a transferência de água se limita somente à superfície do produto (INCROPERA, DEWITT, 1992). De acordo com Mohadptra e Rao (2005), os modelos matemáticos mais usados para representar a secagem são: o Exponencial, o de Henderson e Pabis, o de Wang e Sing, o de Dois termos, o modelo de Lewis, o de Page e o de Thompson.

Há na literatura muitos estudos sobre a cinética de secagem, principalmente em produtos de origem agrícolas, como frutas, sementes e grãos. É possível observar que, dependendo do produto e do processo de secagem realizado, diferentes modelos melhor ajustam-se aos dados experimentais (FARIA et al., 2012; LEITE; MANCINI; BORGES, 2007; MARTINAZZO et al., 2007; KUROZAWA, 2005; AKPINAR, BICER, YILDIZ, 2003; NICOLETI, TELIS-ROMERO, TELIS; 2001). Entretanto, como previamente

constatado por Vieira (2010), são poucos os estudos sobre a modelagem da cinética da liofilização.

Santacatalina et al. (2015), estudaram a cinética da liofilização sob pressão atmosférica (AFD) de cubos (de 8,8 mm e de 17,5 mm) e cilindros de maçãs (espessura de 40 mm e diâmetro de 15 mm). A liofilização sob pressão atmosférica consiste em uma secagem por convecção na qual a temperatura do ar deve ser menor que o ponto de congelamento do produto a ser liofilizado e a umidade relativa do mesmo deve ser extremamente baixa. Normalmente a AFD é conduzida em temperaturas entre  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  e o ponto de congelamento inicial do material que será liofilizado. As amostras possuíam densidade inicial de  $9,5\text{ kg/m}^3$  e foram congeladas a  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , durante 24 h. Em seguida foram submetidas à secagem convectiva com velocidade do ar de 1, 2, 4 e 6 m/s, às temperaturas de  $-5$ ,  $-10$  e  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Algumas amostras passaram por tratamentos ultrassônicos, sendo utilizadas as potências de 25, 50 e 75 W. Os autores utilizaram um modelo unidimensional que considera o movimento difusivo do vapor na superfície do material para representar os dados experimentais da liofilização da fruta, permitindo o cálculo do coeficiente difusivo da água, com valores na ordem de  $10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$ .

Santos, Souza e Castro (2012) estudaram a secagem por liofilização em ramos de coentro. As amostras foram submetidas a um congelamento a  $-22 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  e liofilizadas nas condições de pressão e temperatura do condensador de  $130\text{ }\mu\text{mHg}$  e  $-50 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. Os autores efetuaram a pesagem das amostras a cada 60 minutos e utilizaram os modelos de Lewis, Brooker, Page e Logarítmico para representar a liofilização do coentro, verificando que todos apresentaram com ajuste aos dados experimentais.

Júnior et al. (2016), avaliaram a utilização de diferentes modelos representativos do processo de secagem na representação da liofilização de mangabas em duas diferentes espessuras, nomeadas como pequenas e grandes. As frutas foram congeladas a uma temperatura de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  e para a liofilização utilizou-se a temperatura no condensador de  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  e vácuo parcial de  $38\text{ }\mu\text{mHg}$ , por 23 h. As pesagens das amostras foram realizadas nos intervalos de 30, 60 e 180 minutos. Os modelos utilizados para representar os dados experimentais foram os de Page, de Midilli, de Henderson e Pabis e de Lewis. O modelo que apresentou o melhor ajuste foi o modelo de Page, para ambas espessuras.

Vieira (2010) determinou a cinética de liofilização de fatias de abacaxi de diferentes espessuras (0,5, 1,0 e 1,5 cm) submetidas a diferentes taxas de congelamento



(-14 °C, -24 °C e -34 °C). A liofilização foi conduzida à pressão abaixo de 500 mmHg por 24 h e a temperatura de aquecimento da câmara de liofilização foi de 45 °C. A 2ª Lei de Fick aplicada a placas planas foi utilizada para modelar a cinética de liofilização, tendo sido verificado que o modelo apresentou um bom ajuste aos dados experimentais ( $R^2 > 0,99$ ) e que a difusividade da água aumentou com o aumento da espessura, apresentando valores de  $2,17 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s,  $3,52 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s,  $1,17 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s, para as fatias de 0,5 cm de espessura congeladas nas temperaturas de -14, -24 e -34 °C, respectivamente; para as fatias de 1,0 e 1,5 cm de espessura os coeficientes de difusão da água foram  $1,93 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s,  $5,9 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s,  $1,66 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s e  $4,08 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s,  $5,85 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s,  $5,19 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s, quando congeladas às temperaturas de -14, -24 e -34 °C, respectivamente.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. PREPARO DA MATÉRIA-PRIMA

As mangas da cultivar Tommy Atkins foram adquiridas em mercado local da cidade de Medianeira, nos meses de Janeiro a Abril de 2015. Foram selecionadas frutas maduras (com cascas mais avermelhadas) sem injúrias e mais “firmes”. Realizou-se a lavagem das frutas em água corrente e, posteriormente, efetuou-se o descascamento manual das mesmas, utilizando facas de mesa, com o máximo de cuidado para que não houvesse perda de polpa na casca. Em seguida, as frutas foram fatiadas em um cortador de frios elétrico comercial (Modelo 892/892 BLK, marca *Fun Kitchen*, China) em três espessuras distintas (0,5, 1,0 e 1,5 cm) e, então, foram seccionadas utilizando moldes retangulares (1,7 x 2,7 cm). As fatias de fruta foram acomodadas em bandejas metálicas perfuradas e submetidas ao congelamento, logo após o corte, em um freezer comercial de geladeira doméstica (*Freezer flex frost free*, BRASTEMP, São Paulo, Brasil), com temperatura de  $-20 \pm 2$  °C, durante 24 h.

### 4.2. LIOFILIZAÇÃO

A liofilização foi realizada em um liofilizador Free Zone 6, modelo 7753522 (Labconco Corporation, Kansas City, MO, EUA), a uma pressão de 0,024 mbar, condensador a -40 °C e temperatura das bandejas de 40 °C.

Esse equipamento é composto por uma câmara de secagem acoplada a “torneiras” de aço inoxidáveis. A parte superior consiste em um recipiente em formato retangular, composto por três bandejas de aço inoxidável, nas quais é possível obter um controle de temperatura a ser trabalhada.

O equipamento contém seis torneiras de aço inoxidável em que podem ser conectados recipientes de vidro, contento amostras a serem liofilizadas. É possível realizar a liofilização independente em cada recipiente, pois o equipamento possui

válvulas de controle para cada um, em destaque pela seta vermelha na Figura 2. Assim, aproximadamente 12 g de amostra foram colocadas nos recipientes de vidro, os quais foram acoplados ao liofilizador, conforme é ilustrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Diferentes ensaios foram realizados para cada uma das espessuras de fatias estudadas (0,5, 1,0 e 1,5 cm).



Figura 2 - Liofilizador labconco com os recipientes acoplados contendo as amostras de manga para realização da cinética de secagem.

Fonte: Autor.

Antes de serem conectados ao equipamento, os recipientes de vidro foram submetidos ao resfriamento, pois a temperatura ambiente encontrava-se em torno de 32 °C e as fatias de frutas em uma temperatura de  $-20 \pm 2$  °C, ocasionando uma aderência das mesmas nos recipientes de vidro, acarretando em perda de massa e, conseqüentemente, interferindo na avaliação da cinética de secagem.

Para acompanhar a cinética de secagem, as fatias de manga contidas nos recipientes de vidro foram pesadas em determinados intervalos de tempo, conforme a Tabela 1.

A umidade de equilíbrio foi determinada por método dinâmico, secando uma porção de aproximadamente 12 g de amostras de cada espessura por 24 h, na câmara de liofilização do equipamento.

Tabela 1 – Tempos (h) de pesagem das amostras de manga nas diferentes espessuras para o acompanhamento da cinética de secagem das mesmas.

	Espessuras (cm)		
	0,5	1,0	1,5
Tempo (h)	0	0	0
	1	1	1
	2	2	2
	3	3	3
	5	10	5
	10	15	20
	11	24	24

Fonte: Autor

#### 4.3. MODELAGEM

A partir dos dados de perda de massa das amostras durante a liofilização das fatias de manga foram calculados os adimensionais de umidade, através da Equação 4.

$$RX = \frac{X_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad \text{Eq. 4}$$

Em que:  $X_t$  representa o teor de água num tempo  $t$ , em base seca;  $X_{eq}$  representa o teor de água no equilíbrio, em base seca;  $X_0$  representa o teor de água no instante inicial, em base seca;  $RX$  é o adimensional de umidade.

Os coeficientes de difusão efetivos da água durante a liofilização das fatias de manga foram calculados segundo a Lei de Fick (Equação 1), utilizando a solução integrada de Crank (1975) para placa infinita (Equação 2).

A Tabela 2 apresenta os 9 modelos matemáticos aos quais os dados experimentais da perda de massa no tempo durante a liofilização das fatias de manga foram ajustados. A escolha dos modelos utilizados foi baseada no trabalho de Sousa et al. (2011), que avaliaram a cinética de secagem de nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.) em diferentes temperaturas. Outros pesquisadores, tais como Resende et al. (2009), Goneli et al. (2009), Goneli (2008), Resende et al. (2008), Corrêa et al. (2007), Andrade et al. (2006), Corrêa et al. (2006), Corrêa, Araújo e Afonso Júnior (2003) e Afonso Junior e Corrêa (1999), também trabalharam com um ou mais dos modelos propostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Modelos matemáticos utilizados para prever a secagem de produtos agrícolas.

Designação do Modelo	Modelo	
$RX = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$	Wang e Sing (WANG; SING, 1978)	(5)
$RX = a \cdot e^{(-k \cdot t)} + (1 - a)e^{(-k_1 \cdot t)}$	Verma (VERMA et al., 1985)	(6)
$RX = e^{[-a - (a^2 + 4 \cdot b \cdot t)^{0.5}] / 2 \cdot b}$	Thompson (THOMPSON et al., 1968)	(7)
$RX = e^{(-k \cdot t^n)}$	Page (PAGE, 1949)	(8)
$RX = e^{(-k \cdot t)}$	Newton (LEWIS, 1921)	(9)
$RX = a \cdot e^{(-k \cdot t)} + c$	Logarítmico (YAGCIOGLU et al., 1999)	(10)
$RX = a \cdot e^{(-k \cdot t)}$	Henderson e Pabis (HENDERSON; PABIS, 1961)	(11)
$RX = a \cdot e^{(-k \cdot t)} + (1 - a) \cdot e^{(-k \cdot a \cdot t)}$	Exponencial de Dois Termos (SHARAF-ELDEE et al., 1980)	(12)
$RX = a \cdot e^{(-k \cdot t)} + (1 - a) \cdot e^{(-k \cdot b \cdot t)}$	Aproximação da Difusão (KASSEM, 1998)	(13)

Nota:  $t$  é o tempo de secagem, em horas;  $k$  e  $k_1$  são as constantes de secagem, em  $t^{-1}$ ;  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $n$  são os coeficientes dos modelos.

Os modelos matemáticos foram ajustados aos dados experimentais utilizado o software *Statistica 7.0*, através da análise de regressão não linear, pelo método de Gauss-Newton.

Para verificar o ajuste dos modelos foram utilizados o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o erro médio estimado ( $SE$ , Equação 14).

$$SE = \sqrt{\frac{\sum(Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad \text{Eq. 14}$$

Em que:  $Y$  representa o adimensional de umidade experimental;  $\hat{Y}$  é o adimensional estimado pelo modelo;  $GLR$  representa os graus de liberdade do modelo (observações menos o número de parâmetros do modelo).

#### 4.4. DETERMINAÇÃO DE UMIDADE

A determinação de umidade inicial das amostras frescas e processadas foi realizada em triplicata, pelo método gravimétrico na câmara do liofilizador Labconco a uma pressão de 0,024 mbar, condensador a  $-40$  °C com temperatura das bandejas de 40 °C, durante 24 h.

#### 4.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os modelos matemáticos (Eqs. 2 e 5 a 13) foram ajustados aos dados experimentais utilizando o *software Statistic 7.0*.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos ensaios de liofilização das fatias de manga em diferentes espessuras, foram construídas as curvas de secagem, representadas na Figura 3.

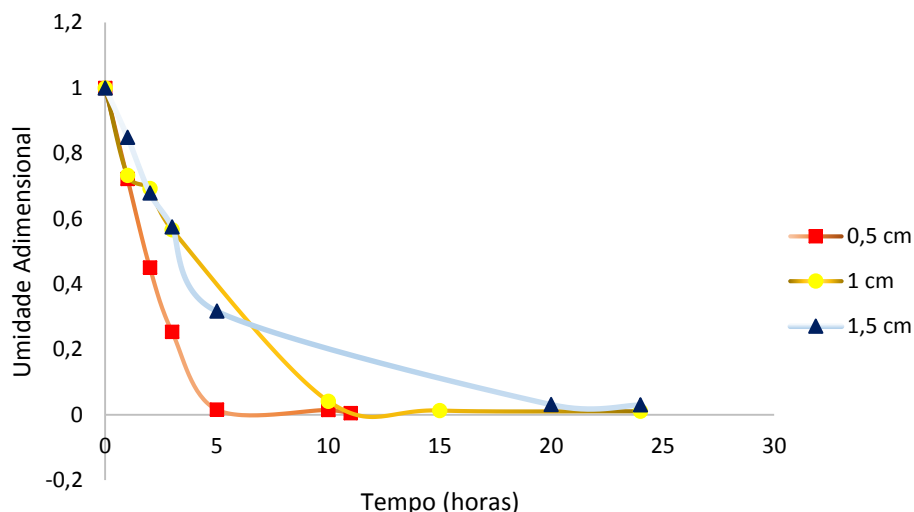


Figura 3 – Curva de secagem das fatias de mangas nas espessuras de 0,5; 1,0 e 1,5 cm.

Nas três primeiras horas, é possível verificar que as curvas de secagem apresentaram comportamento semelhante com altas taxas de perda de água, conforme apresentado na Figura 3. Esse comportamento deve-se ao fato da manga possuir uma grande quantidade inicial de água, resultando, portanto, em grande força motriz à transferência de massa.

Ainda, verificou-se nas três primeiras horas de secagem que, para determinado tempo, a umidade das fatias de abacaxi com 0,5 cm de espessura foi menor do que a das fatias de 1,0 e 1,5 cm, sendo possível concluir que sua velocidade de perda de água foi maior que a das demais (Figura 3). Segundo Michalewicz, Drustra e Guerrero (2010) e Machado et al. (2012) a espessura influencia no processo de secagem: maiores espessuras, resultam em menores taxas de secagem.

Os coeficientes efetivos de difusão da água durante a liofilização das fatias de manga foram calculados de acordo com a 2ª Lei de Fick aplicada a uma placa infinita

(Equação 2) e são apresentados na Tabela 3. Esta tabela também apresenta os parâmetros estatísticos para verificação do ajuste da Lei de Fick aos dados experimentais.

Verificou-se que o aumento da espessura das fatias de manga ocasionou aumento da difusividade da água durante sua liofilização (Tabela 3). Assim, as fatias de manga de 1,5 cm de espessura (maior espessura) apresentaram maiores coeficientes de difusão da água durante a liofilização do que as fatias de 1,0 e 0,5 cm. Segundo Vieira (2010) esse fato está associado às taxas de congelamento: quanto maior a espessura, menor a taxa de congelamento, levando à formação de cristais de gelo maiores, os quais são mais facilmente sublimados.

Tabela 3 – Coeficientes de difusão efetivos da água durante a liofilização das fatias de manga nas espessuras de 0,5, 1,0 e 1,5 cm e parâmetros estatísticos para avaliação do ajuste do modelo aos dados experimentais.

<b>Espessura (cm)</b>	<b><math>D_{ef}</math> (<math>\cdot 10^{-8}</math>, m<sup>2</sup>/s)</b>	<b><math>R^2</math></b>	<b><math>SE</math></b>
0,5	0,6094 $\pm$ 0,0003	0,9558	3,38 $\cdot 10^{-4}$
1,0	1,1450 $\pm$ 0,0006	0,9672	6,43 $\cdot 10^{-4}$
1,5	2,1244 $\pm$ 0,001	0,9700	7,65 $\cdot 10^{-3}$

Santacatalina et al. (2015), avaliaram a liofilização sob pressão atmosférica (AFD) de maçãs no formato de placas (com 8,8 e 17,7 mm de espessura) através de um modelo unidimensional o qual permitiu o cálculo do coeficiente de difusão da água. Os autores verificaram que a difusividade efetiva das fatias de maçã para as amostras de 8,8 mm e 17,7 mm variaram entre 1,38 $\cdot 10^{-5}$  e 1,5 $\cdot 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s, respectivamente. Esses valores são bastante superiores aos verificados no presente trabalho, porém deve-se considerar que as metodologias de secagem empregadas são distintas e, ainda, que as frutas são diferentes e, portanto, apresentam diferentes estruturas celulares e comportamentos durante o processamento.

Avaliando a liofilização de fatias de abacaxi nas espessuras de 0,5, 1,0 e 1,5 cm, submetidas a diferentes taxas de congelamento (-14, -24 e -34 °C), Vieira (2010) ajustou os dados experimentais de liofilização à solução integrada de Crank (1975) para a 2ª Lei de Fick aplicada a uma placa plana, possibilitando o cálculo da difusividade efetiva da água ( $D_{ef}$ ) durante a liofilização das fatias dessa fruta.

A autora relacionou a difusividade da água à espessura das fatias de abacaxi e às taxas de congelamento, tendo sido verificado maiores difusividades para as fatias de



maior espessura, devido à formação de maiores cristais de gelo. As difusividades da água durante a liofilização das fatias de abacaxi foram da ordem de  $10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s, menores que as verificadas no presente trabalho, fato relacionado às diferenças estruturais das frutas e ao próprio processo de liofilização.

Na Tabela 4 são apresentados os parâmetros estatísticos para verificação do ajuste dos demais modelos matemáticos propostos.

Tabela 4 – Coeficiente de determinação e erro médio estimado determinados para os modelos matemáticos propostos (Eqs. 5 a 13).

Modelos	Espessuras das fatias de manga					
	0,5 cm		1,0 cm		1,5 cm	
	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>SE</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>SE</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>SE</i>
4	0,9901	0,0191	0,9539	0,0429	0,9633	0,0360
5	0,9875	0,0268	0,9880	0,0274	0,9944	0,0175
6	0,1449	0,1776	0,9849	0,0246	0,9944	0,2695
7	0,9978	0,0090	0,9865	0,0232	0,9969	0,0105
8	0,9823	0,0213	0,9850	0,0204	0,9944	0,0117
9	0,9857	0,0287	0,9865	0,0296	0,9956	0,0155
10	0,9839	0,0243	0,9855	0,0244	0,9951	0,0132
11	0,9823	0,0255	0,9850	0,0245	0,9944	0,0140
12	0,9875	0,0268	0,9880	0,0274	0,9971	0,0126

É possível observar que a maioria dos modelos avaliados apresentou um bom ajuste aos dados experimentais, com valores de  $R^2 \geq 0,98$ , com exceção do modelo de Thompson para a espessura de 0,5 cm, o qual apresentou  $R^2 = 0,144$  (Tabela 4).

Os modelos que melhor se ajustaram aos dados experimentais foram: o de Page, para a espessura de 0,5 cm, com  $R^2 = 0,998$  e  $SE = 0,009$ ; o de Verma, para a espessura de 1,0 cm, com  $R^2 = 0,988$  e  $SE = 0,027$ ; e o modelo de Aproximação da Difusão, para a espessura de 1,5 cm, com  $R^2 = 0,997$  e  $SE = 0,013$  (Tabela 4).

Sousa et al. (2011) ao estudarem a secagem convectiva do nabo forrageiro, nas temperaturas de 30, 40, 50, 60 e 70 °C, nos tempos de 19; 9,5; 5,2; 3,0 e 2,5 horas, respectivamente, verificaram que os modelos de Page e da Aproximação da Difusão foram os que melhor se ajustaram aos dados experimentais.

Agra (2006), também constatou que o modelo de Page melhor se ajustou aos seus dados experimentais da liofilização de fatias de manga, cortadas em palito com uma espessura de 10 mm e submetidas ao aquecimento à temperatura de 55 °C para a

sublimação da água. O mesmo pode ser verificado nos estudos de Júnior et al. (2016), em liofilização de mangabas e Santos, Souza e Castro (2012), que liofilizaram ramos de coentro, cujo coeficiente de correlação para os modelos foi  $R^2 \geq 0,96$ .

## 6. CONCLUSÃO

O processo de liofilização aplicado à fatias de mangas apresenta-se como uma ótima alternativa para a conservação da fruta, visto que tal processo é capaz de garantir a segurança microbiológica do produto processado.

Os resultados obtidos mostraram que a espessura das amostras, de fato, afeta a cinética de secagem de produtos agrícolas, como a manga. Para as espessuras menores verificam-se menores tempos de secagem para atingir determinado valor de umidade e menores valores para a difusividade da água. A velocidade de congelamento das amostras possivelmente interferiu na difusividade da água, uma vez que a formação de cristais de gelo de maior tamanho, ocasiona a formação de maiores poros nas amostras, facilitando a sublimação da água e resultando em maiores valores do coeficiente de difusão da água para as fatias mais espessas.

Com exceção do Modelo de Thompson para a espessura de 0,5 cm, os modelos matemáticos propostos ajustaram-se aos dados experimentais, sendo que, os que apresentaram melhores ajustes foram o de Page, Verma e Aproximação por Difusão, para as espessuras de 0,5, 1,0 e 1,5 cm, respectivamente.

Devido à escassez em pesquisas sobre a cinética de liofilização de frutas, o presente trabalho sugere a necessidade de mais estudos na área, uma vez que tal processo está sendo bastante difundido.

## 7. REFERÊNCIAS

- ABREU, C. M. P.; CARVALHO, V. D.; GONÇALVES, N. B. Cuidados pós-colheita e qualidade do abacaxi para exportação. **Informe Agropecuário**, v. 19, n. 195, p. 70-72, 1998.
- ADECE – Perfil da produção de frutas. **Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará S/A**, 6p., 2013.
- AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C. 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, p.349-353, 1999.
- AGRA, N. G. **Secagem e liofilização de manga: características físico-químicas e sensoriais**. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006.
- AKPINAR, E. K.; BICER, Y.; YILDIZ, C. Thin layer drying of red pepper. **Journal of Food Engineering**, v.59, p.99-104, 2003.
- ALVES, C. C. O.; RESENDE, J. V.; CRUVINEL, R. S. R.; PRADO, M. E. T. Estabilidade da microestrutura e do teor de carotenóides de pós obtidos da polpa de pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) liofilizada. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 28, n. 4, p. 830-839, 2008.
- ANDRADE, D. S.; BRANDÃO, R. J.; MARQUES, L. G.; PRADO, M.; MARCELO, D. Estudo da influência do pré-tratamento ultrassônico sobre a transferência de massa nos processos de liofilização e reidratação de jaca (*Artocarpus heterophyllus*). **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 2, n. 1, p. 1608-1617, 2015.
- ANDRADE, E. T. D.; CORREA, P. C.; TEIXEIRA, L. P.; PEREIRA, R. G.; CALOMENI, J. D. F. Cinética de secagem e qualidade de sementes de feijão. **Engvista**, v. 08, n. 02, p. 83-95, 2006.
- ANDRADE, P. F. S. **SEAB – Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento; DERAL – Departamento de Economia Rural**. Fruticultura, Maio, 2015.
- AZZOLINI, M.; JACOMINO, A. P; BRON, I. U. Índices para avaliar qualidade pós-colheita de goiabas em diferentes estádios de maturação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 2, p. 139-145, 2004.
- BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; VEGA-MERCADO, H. **Deshidratación de Alimentos**. Zaragoza: Acribia, 297p., 2000.
- BOSS, E. A. **Modelagem e Otimização do Processo de Liofilização: Aplicação para Leite Desnatado e Café Solúvel**. 2004. 107p. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.
- BRUNINI, M. A.; DURIGAN, J. F.; OLIVEIRA, A. L. Avaliação das alterações em polpa de manga 'Tommy-Atkins' congeladas. **Revista Brasileira de Fruticultura**, p. 651-653, 2002.

CARDELLO, H. M. A. B.; CARDELLO, L. Teor de vitamina C, atividade de ascorbato oxidase e perfil sensorial de manga (*Mangifera indica* L.) var. Haden, durante o amadurecimento. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 18, n. 2, p. 211-217, 1998.

CELESTINO, S. M. C. Princípios de secagem de alimentos. **Planaltina: Embrapa Cerrados**. Planaltina, DF. 51p., 2010.

CHITARRA, M. I. F.; CHITARRA, A. B. **Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio**. Lavras: Esal/Faepe, 2005.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A. P.; GONELI, A. L.; BOTELHO, F. M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 02, p. 501-510, 2007.

CORRÊA, P. C.; RIBEIRO, D. M.; RESENDE, O.; BOTELHO, F. M. Determinação e modelagem das propriedades físicas e da contração volumétrica do trigo, durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 03, p. 665-670, 2006.

CORRÊA, P. C.; ARAÚJO, E. F.; AFONSO JÚNIOR, P. C. Determinação dos parâmetros de secagem em camada delgada de sementes de milho doce (*Zea mays* L.). **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 02, n. 02, p. 110-119, 2003.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 2.ed.; Clarendon Press Oxford, 1975.

DURIGAN, M. F. B.; MATTIUZ, B.; DURIGAN, J. F. Injúrias mecânicas na qualidade pós-colheita de lima ácida 'Tahiti' armazenada sob condição ambiente. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 27, n. 3, 2005.

FANTE, L. **Estudo da cinética de branqueamento e de secagem por ar quente e liofilização do alho (*Allium sativum* L.)**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2011.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2010) **Current situation and medium-term outlook for tropical fruits**. Disponível em: <[http://www.fao.org.br/es/esc/common/ecg/218/en/SIT\\_web\\_e.pdf](http://www.fao.org.br/es/esc/common/ecg/218/en/SIT_web_e.pdf)>. Acessado em: 07 de Maio de 2016.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2015). **FAO's role in food losses and wast**. Disponível em: < <http://www.fao.org/food-loss-and-food-waste/en/>>. Acessado em: 09 de Maio.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2012). **Top production – Mangoes, mangosteens, guaves – 2012**. Disponível em: < <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>>. Acessado em: 09 de Maio, às 23:27, 2016.

FAO – Organização das Nações Unidas para Alimentação e a Agricultura (2013). **Desperdício de Alimentos tem consequência no clima, na água na terra e na biodiversidade**. Disponível em: < <https://www.fao.org.br/daccatb.asp>>. Acessado em: 09 de Maio de 2016.

FARIA, R. Q.; TEIXEIRA, I. R.; DEVILLA, I. A.; ASCHERI, D. P.; RESENDE, O. Cinética de secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 5, p. 573-583, 2012.

FISSORE, D.; PISANO, R.; BARRESI, A. A. Applying quality-by-design to develop a coffee freeze-drying process. **Journal of Food Engineering**, v 123, p. 179-187, 2013.

FONSECA, N. **Mangas mais comuns no Brasil**. Disponível em: <<http://www.diadecampo.com.br/zpublisher/materias/Materia.asp?id=21166&secao=Artigos%20Especiais>>. Setembro, 2014. Acesso em:

FURLANETO, F. P. B.; SOARES, A. A. V. L.; BERTANI, R. M. A. Caracterização Técnica e Econômica da Manga “Tommy Atkins”. **Informações Tecnológicas – Pesquisa & Tecnologia**, vol. 12, n. 2, Jul-Dez, 2015.

GARCIA, C. C. **Avaliação da desidratação de mamão utilizando métodos combinados**. 173 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Alimentos) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São José do Rio Preto, 2012.

GAVA, A. J. **Princípios de tecnologia de alimentos**. NBL Editora, 1978.

GHODAKE, H. M.; GOSWAMI, T. K.; CHAKRAVERTY, A. Moisture sorption and vaporization of withered leaves, black and green tea. **Journal of Food Engineering**, p.827-935, 2007.

GOMES, A. T.; CEREDA, M. P.; VILPOUX, O. Desidratação Osmótica: uma tecnologia de baixo custo para o desenvolvimento da agricultura familiar. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 3, n. 3, 2007.

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

GONELI, A. L.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; REIS NETO, S. A. Estudo da difusão de umidade em grãos de trigo durante a secagem. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.27, p.135-140. 2007.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory: temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 06, p. 169-174, 1961.

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. Fundamentals of heat and mass transfer. Rio de Janeiro, **Editora Guanabara Koogan S.A.** 380p. 1992.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Fonte de dados. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/download/estatistica.shtm>>. Acesso em: 17 de Maio de 2016.

JÚNIOR, A. M. O.; SOARES, D. S. C.; SANTOS J. T. S.; NUNES, T. P. Avaliação de diferentes modelos de secagem para liofilização de mangabas com diferentes diâmetros através de indicadores de desempenho. **Scientia Plena**, v. 12, n. 05, 2016.

JÚNIOR, P.C. A.; CORRÊA, P. C. 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.

KASSEM, A. S. Comparative studies on thin layer drying models for wheat. **In: International Congress on Agricultural Engineering**, 13th., 1998, Morocco. [Holdings]. Morocco: [s. n.], 1998. v. 06.

KUROZAWA, L. E. **Efeito das condições de processo na cinética de secagem de cogumelo (*Agaricus blazei*)**. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, 2005.

- LEITE, J. B.; MANCINI, M. C.; BORGES, S. V. Effect of drying temperature on the quality of dried bananas cv. Prata and d'água. **Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie**, v. 40, n. 2, p. 319-323, 2007.
- LEWIS, W. K. The rate drying of solid material. **The Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 13, n. 5, p. 427-432, 1921.
- MACHADO, A. V.; OLIVEIRA, E. L.; SANTOS, E. S.; OLIVEIRA, J. A.; FREITAS, L. M. Estudo da influência da espessura no tempo de secagem do pedúnculo de caju em secadores solar de radiação direta e indireta. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 7, n. 1, p. 256-263, 2012.
- MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeções do Agronegócio – Brasil 2014/2015 a 2024/25, Projeções de Longo Prazo**. Brasília/DF, Julho, 2015.
- MARCHESE, J. A.; FIGUEIRA, G. M. O uso de tecnologias pré e pós-colheita e boas práticas agrícolas na produção de plantas medicinais e aromáticas. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v. 7, n. 3, p. 86-96, 2005.
- MARQUES, L. G. **Liofilização de frutas tropicais**. 293f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.
- MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; MELO, E. C.; BARBOSA, F. F. Difusividade efetiva em folhas de *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf submetidas à secagem com diferentes comprimentos de corte e temperaturas do ar. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v.9, p.68-72, 2007.
- MARTINS, E. D. C., LEONARDI, R. R., OLIVEIRA, C. R., & MATSUMOTO, F. M. T. Liofilização como alternativa para conservação do leite humano. **Journal of the Health Sciences Institute**. v. 29, n. 2, p. 119-22, 2011.
- MENEZES, E. M. S., TORRES, A. T., SRUR, A. U. S. Valor nutricional da polpa de açaí (*Euterpe oleracea* Mart) liofilizada. **Acta Amazonica**, v. 38, n. 2, p. 311-316, 2008.
- MICHALEWICZ, J. S.; DUTRA, J. C. C.; GUERRERO, J. R. H. Análise experimental da cinética de secagem de fatias de caju in-natura. **CONEM 2010 – VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**. Capina Grande – Paraíba. 18 de Agosto de 2010.
- MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A. New model for single-layer drying. **Drying Technology**, v.20, p.1503-1513, 2002
- MOHAPATRA, D.; RAO, P.S. A thin layer-drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v. 66, n. 4, p. 513-518, 2005.
- NAKAGAWA, K., OCHIAI, Ti. A mathematical model of multi-dimensional freeze-drying for food products. **Journal of Food Engineering**, v. 161, p. 55-67, 2015.
- NICOLETI, J. F; TELIS-ROMERO, R.; TELIS, V. R. N. Air-drying of fresh and osmotically pre-treated pineapple slices: fixed air temperature versus fixed slices temperature drying kinetics. **Drying Technology**, v. 19, n. 9, p. 2175-2191, 2001
- NOGUEIRA, J. N. Influência de alguns métodos de controle do escurecimento enzimático nas propriedades organolépticas da maçã Bruckner do Brasil conservada por congelamento e liofilização. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, v. 30, p. 375-386, 1973.

OCDE-FAO – Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura, **Perspectivas Agrícolas no Brasil: desafios da agricultura brasileira 2015-2024**, 2015. Disponível em: <<http://www.agri-outlook.org/>>. Acessado em Maio de 2016.

OLIVEIRA, V. S.; AFONSO, M. R. A.; COSTA, J. M. C. Caracterização físico-química e comportamento higroscópico de sapoti liofilizado. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 2, p. 342-348, 2011.

PAGE, G. E. Factors influencing the maximum rates of air-drying shelled corn in thin layers. **West Lafayette: Purdue University**, 1949.

PANCHARIYA, P. C.; POPOVIC, D.; SHARMA, A. L. Thin-layer modeling of black tea drying process. **Journal of Food Engineering**, v.52, p.349-357, 2002.

PARK, K. J.; TUBONI, C. T.; OLIVEIRA, R. A.; PARK, K. J. Estudo da secagem de caqui giombo com encolhimento e sem encolhimento **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.6, n.1, p.71-86, 2004.

PARK, K. J.; YADO, M. K. M.; BROD, F. P. R. Estudo de secagem de pêra bartlett (*Pyrus sp.*) em fatias. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 21, n. 3, p. 288-292, 2001.

PONTES, S. F. O.; BONOMO, R. C. F.; PONTES, L. V.; RIBEIRO, A. D. C.; CARNEIRO, J. C. S. Secagem e avaliação sensorial de banana da terra. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v. 9, n. 2, p. 143-148, 2007.

RAMOS, A. M.; SOUSA, P.; BENEVIDES, S. D. **Tecnologia da industrialização da manga**. ROZANE, DE; DAREZZO, RJ; AGUIAR, RL; AGUILERA GHA Eds., p. 571-604, 2010. p. 571-604, 2010.

RESENDE, O.; ARCANJO, R. V.; SIQUEIRA, V. C.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática para a secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de concreto. **Acta Scientiarum**, v. 31, p.189-196, 2009.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M; RODRIGUES, S. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.10, p.17-26, 2008.

RIBEIRO, M. S.; SABAA-SRUR, A. U. O. Saturação de manga var. rosa com açúcares. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 19, n. 1, p. 118-122, 1999.

RIBEIRO, P. F. F. A. C.. **Processo de liofilização de produtos alimentares perecíveis**. 177 f. Dissertação (Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto Superior De Engenharia De Lisboa, 2012.

RODRIGUEZ-AMAYA, D. B.; KIMURA, M., GODOY, H. T.; AMAYA-FARFAN, J. Updated Brazilian database on food carotenoids: Factors affecting carotenoid composition. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 21, n. 6, p. 445-463, 2008.

SHARAF-ELDEEN, Y. I.; BLAISDELL, J. L.; HAMDY, M. Y. A model for ear corn drying. **Transactions of the ASAE**, v. 23, p. 1261-1265, 1980.

SANTACATALINA, J. V.; FISSORE, D., CARCEL, J. A.; MULET, A.; GARCIA-PEREZ, J. V. Model-based investigation into atmospheric freeze drying assisted by power ultrasound. **Journal of Food Engineering**, v. 151, p. 7-15, 2015.

SANTOS, G.; SOUZA, D. S.; CASTRO, A. A. Cinética de secagem convectiva e liofilização de ramos de coentro (*Coriandrum sativum* L.): Estudo da influência dos



processos em sua coloração. **Revista Brasileira de Produtos Agrícolas**, Campina Grande, v. 14, n. 4, p. 329-335, 2012.

SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio à Micro e Pequenas Empresas. **Agronegócio – Fruticultura**. Boletim de Inteligência, Outubro, 2015. Disponível em: <<http://www.sebraemercados.com.br/wp-content/uploads/2015/11/Panorama-do-mercado-de-fruticultura-no-Brasil.pdf>>. Acessado em: 10 de Maio de 2016.

SHARAF-ELDEEN, Y. I.; BLAISDELL, J. L.; HAMDY, M. Y. A model for ear corn drying. **Transactions of the ASAE**, v. 23, p. 1261-1265, 1980.

SHUKLA, S. Freeze Drying: A Review. **Internacional Journal of Pharmaceutical Science and Research**, v.2, n.12, p. 3061-3068, 2011.

SILVA, C. D. S.; Perosa, J. M. Y.; RUA, P. S.; ABREU, C. D.; PÂNTANO, S. C.; VIEIRA, C. R. Y. I.; BRIZOLA, R. D. O. Avaliação econômica das perdas de banana no mercado varejista: um estudo de caso. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 25, n. 2, p. 229-234, 2003.

SOUSA, K. A.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H.; COSTA, L. M. Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 4, p. 883-892, 2011.

TACO - Tabela Brasileira de Composição de Alimentos. 4. ed. rev. e ampl. Campinas: UNICAMP NEPA, 2011. p.161. Disponível em: <[http://www.unicamp.br/nepa/downloads/taco\\_4\\_edicao\\_ampliada\\_e\\_revisada.pdf](http://www.unicamp.br/nepa/downloads/taco_4_edicao_ampliada_e_revisada.pdf)> Acesso em: 25 novembro 2014.

TERRONI, H. C.; DE JESUS, J. M.; ARTUZO, L. T.; VENTURA, L. V.; SANTOS, R. F. Liofilização. **Revista Científica UNILAGO**. p. 271-284, 2013.

THOMPSON, T. L.; PEART, R. M.; FOSTER, G. H. Mathematical simulation of corn drying: a new model. **Transactions of ASAE**, v. 11, n. 4, p. 582-586, 1968.

VERMA, L. R., BUCKLIN, R. A., ENDAN, J. B., & WRATTEN, F. T. Effects of drying air parameters on rice drying models. **Transactions of the ASAE**, v. 28, p. 296- 301, 1985.

VIEIRA, A. P. **Efeito das condições de congelamento sobre atributos de qualidade de fatias de abacaxi liofilizado**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, São José do Rio Preto, 2010.

VENTURINI, T.; BENCHIMOL, L.; BERTUOL, D.; ROSA, M. B.; MEILI, L. Estudo da secagem e extração de sementes de mamão (*Carica papaya* L.). **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 5, n. 5, p. 950-959, 2012.

VIEIRA, A. P.; NICOLETI, J. F.; TELIS, V. R. N. Liofilização de fatias de abacaxi: avaliação da cinética de secagem e da qualidade do produto. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 15, n. 1, p. 50-58, 2012.

VILELA, N. J.; LANA, M. M.; NASCIMENTO, E. F.; MAKISHIMA, N. O peso da perda de alimentos para a sociedade: o caso das hortaliças. **Horticultura Brasileira**, v. 21, n 2, p. 142-144, 2003.

WANG, C. Y.; SINGH, R. P. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. **Transaction of ASAE**, v. 11, p. 668-672, 1978.

YAGCIOGLU, A.; DEGIRMENCIOGLU, A.; CAGATAY, F. Drying characteristics of laurel leaves under different conditions. ***In: International Congress on Agricultural Mechanization and Energy***, 7th., 1999, Adana. Proceedings Adana: Cukurova University, 1999. p. 565-569.

YAZDANI, M.; SAZANDEHCHI, P.; AZIZI, M.; GHOBADI, P. Moisture sorption isotherms and isosteric heat for pistachio. ***European Food Research Technology***, v. 223, n. 5, p. 577-584, 2006.