



STEFÂNIA NAIRES SILVA BARROS

**MODELAGEM MATEMÁTICA E CINÉTICA DE SECAGEM
DA BATATA-DOCE (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.)**

STEFÂNIA NAIRES SILVA BARROS

**MODELAGEM MATEMÁTICA E CINÉTICA DE SECAGEM
DA BATATA-DOCE (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.)**

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

Orientador: Prof. Dr. Harvey Alexander Villa Velez.

São Luís
2018

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

BARROS, STEFANNIA NAIRES SILVA.

Modelagem matemática e cinética de secagem da batata-
doce Ipomoea batatas L. Lam / STEFANNIA NAIRES SILVA
BARROS. - 2018.

73 f.

Orientador(a): HARVEY ALEXANDER VILLA VELEZ.

Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do
Maranhão, São Luís, 2018.

1. BATATA-DOCE. 2. DIFUSIVIDADE EFETIVA. 3. MODELOS
MATEMATICOS. 4. SECAGEM. I. VELEZ, HARVEY ALEXANDER
VILLA. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. HARVEY ALEXANDER VILLA VELEZ
Orientador – COEQ/CCET/UFMA

Profª. Dra. AUDIRENE AMORIM SANTANA
COEQ/CCET/UFMA

Profª. Dra. MARIA DA GLÓRIA ALMEIDA BANDEIRA
DETEQ/CCET/UFMA

09 de Julho de 2018

Dedico este trabalho aos meus pais e familiares que me apoiam, ajudam, suportam, incentivam e não me deixam desistir. É com vocês e por vocês que sigo em frente em busca de um futuro melhor.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar ao meu lado em todos os momentos de minha vida, sempre me guiando e fortalecendo.

A meus pais, pelo amor, apoio, compreensão e por não medirem esforços para garantir um futuro melhor a cada um dos seus.

A meus irmãos, Junior Barros e Brunno Barros, pela amizade, apoio e ajuda em vários momentos.

A minha avó, Maria, pelas orações e amor.

A minha tia Noeme, pelo amor, incentivo e por me tratar como filha.

A meus familiares, pelo carinho, incentivo e compreensão em todos os momentos.

A Lídia Raquel, minha irmã do coração, por estar sempre ao meu lado.

Às minhas queridas amigas Marisa Freitas, Larissa Cordeira, Raquel Medeiros, Thainara Prazeres, Ana Claudia, que mantém nossa linda e sincera amizade, independentemente da distância.

A todos os amigos que eu fiz ao longo da graduação: Fabiana Vases, Leonardo Pacheco, Talita Santos, Talita Azevedo, Pedro Augusto, Artenisia Costa, Renata Avelar, Layrton Silva, Valkerline Pires, Larissa Machado e Hugo Leonardo

A Aline Ferreira, pela disponibilidade e ajuda durante a realização dos experimentos.

A meu orientador, Prof. Harvey Alexander Villa Velez, pela orientação, incentivo, paciência e auxílio. Meus irrestritos agradecimentos pela oportunidade que me foi concedida desde o começo da graduação na UFMA, por consequência de ter acreditado em mim. Agradeço, ainda, sua amizade, simplicidade e alegria, que, certamente, tornaram a realização deste trabalho mais amena.

À Profa. Dra. Audirene Amorim, pelos ensinamentos técnicos, incentivo, amizade, apoio, auxílio e conselhos. Por estar sempre disponível e pela generosidade em me ajudar todas as vezes que precisei.

À Profa. Dra. Glória Bandeira, pelas sugestões dadas e pela disponibilidade de participar da banca examinadora deste trabalho.

A todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização deste trabalho. Pessoas que me apoiaram e que se regozijaram por mim nesta jornada.

“Esforça-te, e tem bom ânimo; não temas, nem te espantas; porque o Senhor Deus é contigo, por onde quer que andares.”

Josué 1:9

BARROS, STEFÂNIA NAIRES SILVA. **Modelagem matemática e cinética de secagem da Batata-doce (*Ipomoea batata* (L.) Lam.)**. 2018. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

RESUMO

A batata-doce é uma importante cultura tuberosa cultivada em quase todos os continentes. É conhecida como uma excelente fonte de energia e nutrientes na dieta alimentar. Em função disso, seu elevado teor de matéria seca altamente nutritiva representa um ótimo produto para o processamento industrial. Uma das formas de aproveitamento do fruto para obtenção de um produto de maior valor agregado para diferentes fins é realizando a secagem do material. Desse modo, este trabalho objetiva avaliar diferentes modelos empíricos disponíveis para modelagem e simulação das curvas de secagem da batata-doce (*Ipomea batatas* (L.) Lam.) a diferentes níveis de temperatura. Para esse fim, foi realizada a secagem por convecção forçada, utilizando-se um secador convectivo, operando nas temperaturas de 30, 45 e 60° C. A descrição da cinética de secagem foi realizada pelo ajuste de modelos matemáticos para cada temperatura do ar de secagem. Os modelos Peleg, Logarítmico, Midilli et al., representaram satisfatoriamente os dados experimentais da secagem de batatas, com coeficientes de ajustes superiores a 0,98 e o erro médio abaixo de 0,61 %. Estimou-se a difusividade efetiva da batata-doce nas diferentes temperaturas através do modelo de difusão. Além disso, a influência da temperatura de secagem sobre a difusividade efetiva foi avaliada ajustando-se ao modelo de Arrhenius. A energia de ativação para o processo de secagem da batata-doce foi de 28,48 kJ/mol.

Palavras-chave: Batata-doce. Secagem. Modelos Matemáticos. Difusividade Efetiva.

BARROS, STEFÂNIA NAIRES SILVA. **Mathematical modeling and drying kinetics of sweet potato (*Ipomoea batata* (L.) Lam.)**. 2018. 73 f. End-of-course Paper of Chemical Engineering of the Exact Sciences and Technology Center of the Federal University of Maranhão, São Luís, 2018.

ABSTRACT

The sweet potato is an important tuberous cultivation farmed in almost all continents. It's known as an excellent source of energy and nutrients in dieting. As a result, its elevated content of highly nutritive dry matter represents a great product for the industrial processing. One of the ways of using the fruit to obtain a product of a higher aggregated value for different purposes is executing the drying of the material. Thus, this work aims to evaluate different empirical models available for the modeling and simulation of the drying curves of the sweet potato (*Ipomeabatatas* (L.) Lam.) at different temperature levels. For this purpose, the drying was made using forced convection, utilizing a convective dryer, operating at temperatures such as 30, 45, and 60° C. The drying kinetics description was made with the adjustment of mathematical models to each air-drying temperature. The Peleg, Logarítmico, Midilliet *al.* models satisfactorily represent the experimental data of the drying of potatoes, with adjustment coefficients over 0.98 and mean error below 0.61 %. The effective diffusivity of the sweet potato was estimated in different temperatures via the diffusion model. In addition, the influence of the drying temperature over the effective diffusivity was evaluated adjusting to the Arrhenius model. The activation energy for the drying process of the sweet potato was 28.48 kJ/mol.

Keywords: Sweet potato. Drying. Mathematical Models. Effectivediffusivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Cultivares da batata-doce.....	6
Figura 2 - Relação da taxa de deterioriração de alimentos.....	14
Figura 3 - Curva de secagem	18
Figura 4 - Taxa de secagem em função do conteúdo de umidade em base das amostras para o processo de secagem da batata-doce nas temperaturas de 30 (●), 45 (▲) e 60 (■) °C.	29
Figura 5 - Curvas de secagem da batata doce pelo modelo Peleg nas temperaturas 30 (●), 45 (▲) e 60 (■) °C e dos resíduos entre os valores calculados e experimentais.....	32
Figura 6 - Curvas de secagem da batata doce pelo modelo Logarítmico nas temperaturas 30 (●), 45 (▲) e 60 (■) °C e dos resíduos entre os valores calculados e experimentais.....	33
Figura 7 - Curvas de secagem da batata doce pelo modelo Midilli et al. nas temperaturas 30 (●), 45 (▲) e 60 (■) °C e dos resíduos entre os valores calculados e experimentais.....	33
Figura 8 - Representação da equação Arrhenius para a relação entre a difusividade efetiva e a temperatura absoluta na secagem de batata-doce	35
Figura 9 - Curvas de secagem da batata-doce pelo modelo de Aproximação por Difusão.....	47
Figura 10 - Curvas de secagem da batata-doce pelo modelo de Dois Termos.....	47
Figura 11 - Curvas secagem da batata-doce pelo modelo de Henderson-Pabis.....	48
Figura 12 - Curvas de secagem da batata-doce pelo modelo Lewis.....	48
Figura 13 - Curvas de secagem da batata-doce pelo modelo de Wang-Sing	49
Figura 14 - Curvas de secagem da batata-doce pelo modelo de Weibull.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Área, produção e produtividade da batata-doce nas regiões brasileiras.....	9
Tabela 2 - Composição físico-química e nutricional da batata-doce.....	11
Tabela 3 - Valores mínimos de atividade de água () para crescimento e produção de toxina de patógenos de importância alimentar	15
Tabela 4 - Taxa secagem de batata doce em três temperaturas	28
Tabela 5 - Valores dos parâmetros, dos modelos matemáticos, empregados para o ajuste da cinética de secagem da batata doce.	30
Tabela 6 - Valores do coeficiente de determinação (R^2) e do erro médio relativo (MRE, %), dos modelos matemáticos, empregados para o ajuste da cinética de secagem, por convecção forçada, da batata-doce	31
Tabela 7 - Valores da difusividade efetiva (Def) obtidos para a batata-doce em diferentes temperaturas do ar de secagem.....	34

LISTA DE SÍMBOLOS

X	Teor de umidade (g/g, b.s)	E_a	Energia de ativação
X_e	Umidade de equilíbrio (g/g, b.s)	D_{ef}	Difusividade efetiva
a_w	Atividade de água		
P	Pressão de vapor da água em solução (kPa)		
P_0	Pressão de vapor da água pura (kPa)		
X_c	Conteúdo de umidade crítica		
dX/dt	Taxa de secagem		
A	Área da superfície exposta (m ²)		
h	Coefficiente de transferência de massa (W·(m ²) ⁻¹ ·°C ⁻¹)		
λ	Calor de vaporização (J·mol ⁻¹)		
T_{amb}	Temperatura ambiente (°C)		
T_{bu}	Temperatura de bulbo úmido (°C)		
G	Fluxo de massa de ar		
C_1, C_2	Constantes dos modelos para obtenção do coeficiente de transferência		
$d\theta/dt$	Taxa de variação de temperatura		
ξ	Constante de resfriamento ou aquecimento (K·s ⁻¹)		
T	Tempo (s)		
θ	Temperatura do produto (K)		
θ_e	Temperatura do meio (K)		
k, k_1, k_2	Coefficientes de secagem (s ⁻¹)		
a, b, c, n	Constantes dos modelos		
R^2	Coefficiente de determinação		
y	Valores experimentais da variável sob a qual se faz a análise estatística		
y^*	Valores teóricos estimados para a variável sob a qual se faz a análise estatística		
\bar{y}	Média dos valores experimentais da variável sob a qual se faz a análise estatística		
N	Número de valores experimentais		

SUMÁRIO

FOLHA DE APROVAÇÃO	i
AGRADECIMENTOS.....	iii
RESUMO	v
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE SÍMBOLOS	ix
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	4
2.1 Objetivo geral.....	4
2.2 Objetivos específicos	4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1 Batata-doce	5
3.1.1 ORIGEM E ASPECTOS GERAIS.....	5
3.1.2 CARACTERÍSTICAS TAXONÔMICAS	6
3.1.3 IMPORTÂNCIA ECONÔMICA E SOCIAL	8
3.1.4 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA BATATA-DOCE	10
3.2 Teor de água nos alimentos	11
3.2.1 RELAÇÃO ENTRE A ÁGUA E A DEGRADAÇÃO DE ALIMENTOS	11
3.2.2 TEOR DE ÁGUA.....	12
3.2.3 ATIVIDADE DE ÁGUA	13
3.3 Secagem em alimentos	15
3.3.1 PROCESSO DE SECAGEM.....	15
3.3.2 MECANISMO DE SECAGEM	16
3.3.3 CINÉTICA DE SECAGEM	17
3.3.4 FATORES QUE INFLUENCIAM A TAXA DE SECAGEM	19
3.4 Modelagem matemática da cinética de secagem	20
3.4.1 MODELAGEM DO PERÍODO DE TAXA CRESCENTE	20
3.4.2 MODELAGEM DO PERÍODO TAXA DECRESCENTE	21
3.4.2.1 Modelos empíricos empregados para a análise no período taxa decrescente	21
3.4.2.2 Modelos teóricos empregados para a análise no período taxa decrescente	22
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	24
4.1 Matéria-prima e preparação das amostras	24
4.2 Curvas de secagem da batata-doce.....	24
4.3 Modelagem e simulação do processo de secagem.....	24
4.4 Estimativa dos parâmetros e análise estatística	26
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	28

5.1 Cinética de secagem	28
5.2 Modelagem da cinética de secagem	30
5.3 Difusividade efetiva da secagem da batata-doce	34
6 CONCLUSÃO	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38
APÊNDICE A – RESULTADOS PARA A MODELAGEM DA CINÉTICA DE SECAGEM ENGAÇO DA BATATA-DOCE E DEMAIS MODELOS ESTUDADOS	47
APÊNDICE B – CÓDIGOS COMPUTACIONAIS UTILIZADO PARA MODELAGEM E SIMULAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS.....	50

1 INTRODUÇÃO

As mudanças de hábitos das pessoas e o surgimento de novas opções de consumo de alimentos, que decorrem da necessidade de o ser humano ter uma dieta diversificada e nutricionalmente balanceada para a manutenção de sua saúde, têm propiciado questionamentos acerca da qualidade dos alimentos e da dieta alimentar. Por essa razão, o interesse por raízes e tubérculos aumentou durante as últimas décadas, já que são alimentos ricos em energia para a nutrição humana e podem desempenhar um papel importante no contexto do desenvolvimento sustentável enquanto fonte independente de energia e nutriente.

As raízes e tubérculos são fontes de carboidratos, minerais e vitaminas. Além disso, fornecem benefícios nutricionais e econômicos. Dentre as várias opções de alimentos com essas características, destaca-se a batata-doce (*Ipomeoea batatas*), que é largamente utilizada na alimentação humana e animal por ser considerada uma raiz altamente nutritiva, rica em vitaminas e minerais, bem como por apresentar alta concentração de carotenoides (ARAÚJO et al., 2015). Além disso, seu cultivo apresenta uma boa perspectiva de abrangência de mercado, principalmente para países em desenvolvimento e com escassez de alimentos para a população.

Dentre os principais alimentos cultivados em escala mundial, a batata-doce é considerada uma das doze culturas mais importantes, com uma produção anual superior a 105 milhões de toneladas (EMBRAPA, 2008).

Cultivada em 111 países, a maior parte da produção, aproximadamente 90%, concentra-se no continente Asiático, com destaque para a China, maior produtor mundial com volume de 70 milhões de toneladas (FAO, 2017). No ranking mundial, a produção brasileira ocupa a 20ª posição, com produção de 669.454 toneladas em 2016, detendo o 6º lugar entre as hortaliças mais plantadas e a 4ª mais consumida. Dentro deste valor, 170.601 toneladas são produzidas no Nordeste (IBGE, 2016).

A cultura da batata-doce apresenta uma elevada adaptação ao clima tropical, por ser de fácil manutenção, além de ser perene e ter boa resistência à seca. Trata-se de uma planta rústica, que pode ser cultivada em solos onde outras culturas mais exigentes, como o arroz e o milho, também são cultivadas. Ademais, o ciclo e o custo de sua produção são relativamente baixos, com investimentos “mínimos”. Contudo, vale ressaltar que embora em seu cultivo pouca tecnologia seja empregada, o índice de produtividade tem sido crescente nos últimos anos, podendo alcançar 60 toneladas por hectare (EMBRAPA, 2008).

Outra informação relevante é que a batata-doce é um dos tubérculos amplamente apreciados no Brasil, principalmente nas regiões Norte e Nordeste. No que concerne à alimentação humana, diretamente, com a utilização dos tubérculos cozidos ou assados, é oferecida de maneira industrializada na forma de doces. Já a utilização de ramas na alimentação humana, no entanto, é feita em escala bastante limitada.

Quanto ao aspecto durabilidade, pode-se afirmar que por ser um alimento perecível, a batata-doce tem uma “vida de prateleira” que não dura mais que algumas semanas após a colheita (EMBRAPA, 2008). Normalmente, essa deterioração é proveniente da ação de microrganismos, de atividade enzimática e de reações químicas, que, na maioria das vezes, dependem do teor de água contida no alimento (BOBBIO e BOBBLIO, 2001; CECCHI, 2003; FELLOFELLOWS, 2006).

Na abordagem da conservação dos alimentos, nota-se a necessidade de utilizar processos para agregar valor e atender as inúmeras divergências entre as preferências do consumidor. A secagem surge nesse contexto como método alternativo para estender a vida de prateleira dos alimentos perecíveis. A secagem consiste em remover água na forma de vapor para o ar não saturado. De modo consequente, facilita a conservação do produto, inibe o desenvolvimento da atividade microbiana, reduz o peso, facilitando o transporte e o armazenamento dos produtos, além de disponibilizar o produto em qualquer época do ano (AZEVEDO; ALVES, 2013).

A polpa, na forma de pó, é obtida por métodos de secagem e proporciona, além de baixo custo, produtos que conservam, com pouca alteração, suas características organolépticas e nutritivas. Com o resultado do emprego desta técnica, a polpa demonstra ser uma matéria-prima muito versátil, podendo ser usada para obtenção de inúmeros produtos industrializados de maior valor agregado como a fabricação de farinha para panificação, suplementos e ração para animais (CASTRO *et al.*, 2008; FELTRAN; FABRI, 2010), o que ressalta o potencial dessa espécie para a indústria alimentícia.

É pertinente ressaltar que a realização de novas pesquisas em busca da viabilidade e qualidade da secagem da batata-doce contribui para o desenvolvimento de produtos industrializados de maior valor agregado. Contudo, é importante se estudar algumas variáveis que incidem sobre tal processo, a fim de que se possa determinar o método ideal de secagem e também a sua modelagem matemática. A partir disso, pode-se determinar o estabelecimento de condições ótimas de operação, que permitem avaliar a eficiência da produção e a obtenção de um produto de qualidade.

Dessa forma, a fim de aprimorar o conhecimento sobre este vegetal, este trabalho visa estudar o processo de secagem da batata-doce, assim como obter os parâmetros dos modelos cinéticos de secagem para esse produto.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Modelar e simular as cinéticas de secagem da batata-doce através de modelos empíricos clássicos.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar a cinética de secagem da batata-doce a diferentes temperaturas;
- Aplicar modelos empíricos clássicos de secagem na simulação das cinéticas de secagem da batata-doce;
- Determinar o efeito da temperatura sobre a difusividade da água na batata doce.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Batata-doce

3.1.1 ORIGEM E ASPECTOS GERAIS

De acordo com relatos arqueológicos, a provável região de origem da batata-doce (*Ipomoea batata*) é a faixa compreendida entre a América Central e a América do Sul. Seu uso remonta a períodos que compreendem mais de dez mil anos, conforme análises realizadas em batatas secas encontradas em cavernas no Peru e em regiões localizadas pelos Maias (EMBRAPA, 2008).

O desenvolvimento da batata-doce em regiões tropicais e de temperaturas moderadas, a exemplo da África, América e Ásia, decorre da grande rusticidade de seu cultivo, de sua fácil manutenção e de ampla variedade de condições climáticas favoráveis. (EMBRAPA, 2008).

No que concerne ao potencial de seu desenvolvimento, pode-se afirmar que é alto em razão de a batata-doce ser uma planta rasteira classificada como raiz tuberosa, que não necessita de muitos cuidados quanto ao cultivo, já que apresenta uma elevada tolerância à seca e às pragas, além de ter uma rápida capacidade de multiplicação.

Já em termos de produtividade, pode-se dizer que o cultivo de batata-doce apresenta um alto rendimento em curto período de tempo, uma vez que possui um ciclo de 4 a 5 meses, em média, o que permitiria mais de um ciclo por ano no mesmo local (MALUF, 2003).

No Brasil, a cultura da batata-doce, ao longo do tempo, tem sido realizada pelos pequenos agricultores, sendo caracterizada por apresentar custos de produção relativamente pequenos, com baixo nível de investimentos e alto retorno econômico. Entretanto, por ser um cultivo que exige investimento em tecnologia, ainda que baixo, geralmente os produtores não têm a devida orientação técnica e isso reflete em baixos índices de produtividade. Nesse viés, estima-se que a produtividade média nacional do produto seja inferior a 10 t/ha, embora se saiba que é possível obter uma produtividade superior a 25 t/ha quando a cultura é conduzida com tecnologia e conhecimentos adequados (SILVA et al., 1995, EMBRAPA, 2008).

Outro aspecto da cultura da batata-doce que merece destaque é a variabilidade fenotípica, destacando-se as colorações de casca e da polpa, que podem variar entre branca, amarela, salmão, alaranjada, creme e roxa (MIRANDA et al., 1987). A escolha das cores depende da preferência do mercado consumidor, já que algumas pessoas, na culinária

doméstica, preferem raízes tuberosas de pele rosa e polpa creme, enquanto outras dão preferência a pele e polpa claras. Contudo, para o setor industrial, a cor da polpa tem importância na escolha por aquelas que apresentam maiores teores de matéria seca (ROESLER *et al.*, 2008)

3.1.2 CARACTERÍSTICAS TAXONÔMICAS

A batata-doce é uma espécie dicotiledônea, da família botânica *Convolvulaceae*, que abrange aproximadamente 45 gêneros e mais de 1000 espécies, mas somente esta raiz tuberosa tem cultivo de expressão econômica como alimento. A variabilidade genética dentro da espécie é alta, provavelmente devido ao nível ploidia. A maioria das espécies é diploide ($2n= 2x=30$), porém, podem ser encontradas algumas do tipo tetraploides ($2n= 4x= 60$) e hexaplóides ($2n= 2x= 90$). Dentre as espécies, a batata-doce é a única hexaplóide do gênero, com número de cromossomos $x=15$ (HUAMÁN, 1992; RAJAPAKSE *et al.*, 2004).

Além das informações acima dispostas, pode-se ainda dizer que é uma planta herbácea, perene, de caule rastejante, com ramificações de tamanho, cor e pilosidade bastante distintas; é provida de folhas com pecíolos longas, com formato, cor e recortes variáveis. Suas flores são hermafroditas, porém, são de fecundação cruzada devido ao mecanismo de autoincompatibilidade. Os frutos são do tipo cápsula deiscente com duas, três ou quatro sementes com 6 mm de diâmetro e cor que varia desde castanho-claro a negra. No tocante à fertilização da flor à deiscência do fruto, pode-se afirmar que sucedem seis semanas (EDMOND; AMMERMAN, 1971; HUMÁN, 1992; OLIVEIRA *et al.*, 2002).

Figura 1 - Cultivares da batata-doce



Fonte: EMBRAPA,2008.

O sistema radicular da batata-doce possui raízes de dois tipos, as fibrosas ou absorventes, responsáveis pela absorção de água e nutrientes do solo, e as tuberosas, que acumulam reservas e constituem a parte comercial da planta. As raízes absorventes são formadas a partir do meristema cambial contendo cinco ou seis feixes de vasos, são abundantes e altamente ramificadas. Quanto às raízes tuberosas, são formadas no início do desenvolvimento da planta apresentando cinco ou seis feixes de vasos, são de maiores espessuras e poucas raízes secundárias. Além disso, possuem capacidade de desenvolver gemas vegetativas que são formadas a partir do tecido meristemático localizado na região vascular (EMBRAPA, 2008).

As raízes podem apresentar os formatos mais variados: redondo, oblongo, fusiforme ou alongado, assim como podem conter veias e dobras nas raízes, assim como casca lisa ou rugosa. Além do componente genético, que contribui para o formato, o tipo do solo, como a presença de torrões, pedras e camadas compactadas podem afetar diretamente o seu formato (HUMÁN, 1992; EMBRAPA, 2008).

De acordo com Silveira (2008), em decorrência da influência do tipo do solo, esta cultura se adapta melhor a solos de textura média ou arenosa, leves, soltos, arejados, permeáveis e cálidos. Em contrapartida, solos argilosos, pesados, úmidos e frios são totalmente inadequados para o seu desenvolvimento.

Vale destacar, ainda em se tratando de suas características, que são revestidas por uma pele fina, formada por poucas camadas de células. Uma camada com cerca de 2 mm é denominada de casca, ao passo que a parte central recebe o nome de polpa. A pele pode ser retirada facilmente da casca, enquanto a divisão entre a casca e polpa nem sempre é nítida e fácil de separar, já que depende da variedade, do estado vegetativo da planta e do tempo de armazenamento. Tanto a pele quanto a casca e a polpa podem apresentar coloração variável de roxo, salmão, amarelo, creme ou branco. A intensidade da cor pode variar de acordo com as condições ambientais em que a planta cresce (HUMÁN, 1992; EMBRAPA, 2008; SILVEIRA et al., 2008).

O cultivo da batata-doce, vale asseverar, requer altas temperaturas durante todo o ciclo vegetativo. Por essa razão, um dos fatores limitantes para sua cultura é a geada, embora seja possível cultivar essa batata em regiões temperadas, mais precisamente nos períodos da primavera e verão, quando a temperatura é elevada e a alta radiação solar favorece o desenvolvimento da planta. Em outras palavras, para que a batata obtenha um desenvolvimento vegetativo adequado, a planta necessita de temperatura média superior a 24 °C. Temperaturas inferiores a 10 °C já interferem negativamente em sua produtividade.

Por ser tolerante à seca, sua umidade ideal é cerca de 500 a 1000 mm anuais de chuva. Em temperaturas médias (20 a 24 °C), associadas com menor luminosidade, curto fotoperíodo, menor umidade do solo são propiciadoras do desenvolvimento das raízes tuberosas (SILVA et al., 1995; EMBRAPA, 2008).

3.1.3 IMPORTÂNCIA ECONÔMICA E SOCIAL

De acordo com Barrera (1996), a batata-doce é considerada uma das doze culturas mais importantes do mundo. É uma planta de extrema importância socioeconômica, pois pode ser cultivada em quase todos os países e fornece uma série de nutrientes alimentares para a população, principalmente em regiões mais carentes. Além disso, ela é um alimento energético, com uma alta capacidade de produzir energia por unidade de área e tempo (Kcal/ha/dia). Por essa razão, as ramas e raízes tuberosas são largamente utilizadas na alimentação humana e animal e como matéria-prima para a indústria de alimentos (MIRANDA et al. 1987; OLIVEIRA et al., 2006).

Outra informação relevante sobre a *Ipomoea batatas*, é que atualmente é considerada a oitava cultura de maior produção mundial (CIP, 2018). Dos 111 países que produzem batata-doce, estima-se que aproximadamente 90% da produção é oriunda da Ásia e 5% da África. Os outros 5% restantes estão distribuídos nos demais continentes. Em países desenvolvidos, como os Estados Unidos e o Japão, a produção é baixa, chegando a apenas 2% (EMBRAPA, 2008). De acordo com a FAO (2016), a China é o maior produtor de batata-doce, produzindo, só em 2016, cerca de 70 milhões de toneladas, o que corresponde a 76% da produção mundial.

No continente Latino-Americano, o Brasil surge como o principal produtor. É considerada a sexta hortaliça mais cultivada, porque além de sua agricultura ser antiga no país, ela também foi bastante disseminada, em geral, por pequenos agricultores rurais. Tal presença marcante desse produto em territórios brasileiros fica ainda mais evidente quando se sabe que a produção brasileira de batata-doce ocupa a 20ª posição no ranking mundial, produzindo 669.454 toneladas em 2016, com área plantada de 49.554 ha e produtividade média de 14 t/ha (EMBRAPA, 2008).

Em se tratando dos fatores que propiciam a baixa produtividade de *Ipomoea batatas*, destacam-se o uso de tecnologia inadequada, a falta de cultivares apropriados e a ocorrência de pragas e doenças. Mas, vale evidenciar, que se a produtividade fosse conduzida com

tecnologia e orientação técnica adequadas, poderia ultrapassar a marca de 25 t/ha, segundo dados da EMBRAPA (2008) e do IBGE (2016).

No Brasil, a batata-doce é cultivada em todas as regiões. Por apresentar uma grande área territorial, com uma diversidade de climas e diferentes tipos de solo, o cultivo da batata-doce é propício em todo o seu território, podendo obter uma grande diversidade desse tubérculo em ampla quantidade. De acordo com dados do IBGE (2016), a região Sul é a principal produtora dessas batatas, pois tem uma produção anual de 249.154 toneladas, o que corresponde cerca de 37 % da produção nacional.

Na Tabela 1, a seguir, é possível observar, em números, a produção por área e produtividade da batata-doce nas regiões brasileiras.

Tabela 1- Área, produção e produtividade da batata-doce nas regiões brasileiras

Regiões	Área (ha)	Produção (t)	Produtividade (t/ha)
Sul	16.652	249.154	15
Suldeste	12.384	222.180	17,9
Centro-Oeste	684	199.960	25
Nordeste	19.194	170.601	9,8
Norte	640	7559	11,9

Fonte: IBGE, 2016.

Ainda no tocante à presença da batata-doce em solo brasileiro, vale destacar que esta assume uma maior importância social na região Nordeste do país. Por ser um alimento de grande produção e de fácil acesso, constitui-se como uma das mais importantes fontes de alimento da região. Além disso, auxilia na geração de emprego e renda, contribuindo para com a fixação do homem no campo. Entretanto, é nesta região com melhor clima e onde vive a maioria da população carente do país, que sua produtividade é mais baixa.

De acordo com Silva (2002), essa baixa produtividade é decorrente de a cultura ser mantida por famílias rurais, na condição de cultura marginal, com ausência de informações técnicas e tecnologias adequadas para o cultivo.

Segundo Feltran e Fabri (2010), o plantio de batata-doce está ligado diretamente à finalidade da produção, preferência do mercado e interesse do consumidor. Normalmente, a comercialização é realizada *in natura*. A venda da raiz se dá durante todo o ano nas feiras e mercados. Segundo a CONAB (2018), no primeiro trimestre de 2018, o quilo da batata-doce

nas capitais brasileiras foi vendido, em média, por R\$1,65. Tais dados revelam que a batata-doce é um alimento de baixo custo, embora nela se encontre grande fonte energética e nutricional. Além do mais, vale lembrar, a venda da batata-doce é uma importante fonte de renda para os pequenos agricultores e poderá ser para economia regional uma alternativa de emprego e renda através dos produtos industrializados que dela resultam.

3.1.4 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA BATATA-DOCE

A batata-doce oferece grande versatilidade na sua transformação industrial, devido à sua composição, podendo ser utilizada tanto na alimentação humana como também na produção de combustível alternativo para a gasolina e na indústria de cosméticos (ANDRADE JR et al., 2012). As propriedades físico-químicas consistem em um critério útil para avaliar a utilidade da raiz tuberosa, pois dependendo da sua composição, a raiz será utilizada de diferentes maneiras pela indústria.

As raízes tuberosas de batata-doce são fontes de energia, minerais e vitaminas. De acordo com Miranda (1995), a composição química da raiz da batata-doce varia com o cultivar, as condições climáticas, a época da colheita, os tratos culturais e a duração de armazenamento. A determinação destas propriedades é fundamental para o conhecimento da qualidade do produto, para a verificação do efeito de processamento e também para a adequação nutricional.

As raízes possuem elevado valor nutricional devido à grande reserva de energia, vitaminas e vários minerais. Dessas características, a batata-doce é uma excelente fonte de vitamina A, em razão do seu elevado teor de carotenoides.

Segundo Miranda (1995), a batata-doce é uma excelente fonte de vitamina A, principalmente nas raízes de variedades com cor de polpa amarelada. Quanto ao teor de proteína, é relativamente baixo, em média de 1,5 a 2,5%, porém, a qualidade da proteína é extremamente alta, com um bom equilíbrio de aminoácidos (EMBRAPA, 2008; MIRANDA et al., 1987; OLIVEIRA et al., 2006). A Tabela 2 exhibe a composição físico-química e nutricional da batata-doce *in natura*.

Tabela 2 - Composição físico-química e nutricional da batata-doce

Componentes	Composição da batata-doce por 100g de parte comestível (crua)	Composição da batata-doce por 100g de parte comestível (cozida)
Umidade (%)	69,5	80,4
Energia (Kcal)	118	77
Proteína (g)	1,3	0,6
Carboidrato (g)	28,2	18,4
Fibra Alimentar (g)	2,6	2,2
Cinzas (mg)	0,9	0,4
Cálcio (mg)	21	17
Magnésio (mg)	17	11
Fósforo (mg)	36	15
Vitamina A (mg)	252	300
Vitamina C (mg)	16,5	23,8
Vitamina B5 (mg)	Traços	2,57

Fonte: TACO, 2011.

Quanto à composição centesimal, as raízes apresentam em média 70% de umidade, 26% de carboidratos, 1,05% de cinzas e 0,61% de fibras (CEREDA, 1985). Dentre os principais constituintes dos carboidratos, o amido destaca-se pelo seu alto teor; em média possui o equivalente a 30% (NODA, 1992). Por apresentar propriedades físico-químicas específicas, a composição deste carboidrato influencia diretamente suas propriedades funcionais. O amido da batata-doce é de grande interesse ao setor industrial, pois revela excelentes propriedades adesivas que permitem o seu uso nas mais diversas finalidades, entre elas, a indústria alimentícia, a indústria de papel, têxteis e até mesmo na produção de etanol (GONÇALVES NETO et al., 2011).

3.2 Teor de água nos alimentos

3.2.1 RELAÇÃO ENTRE A ÁGUA E A DEGRADAÇÃO DE ALIMENTOS

A água é um dos principais componentes dos alimentos. De acordo com Gava *et al.* (2008), a composição percentual da água nos alimentos possui mais de 30%, com raras

exceções, como os cereais e leguminosas, que apresentam de 13 e 15%, respectivamente. Devido à sua capacidade de formar dipolo e ligações de hidrogênio, a água é um ótimo solvente, permitindo que os constituintes restantes se tornem solúveis e possam ser transportados, absorvidos ou expelidos do interior das células. Por estas condições, ocorrem nos alimentos reações químicas, alterações enzimáticas e crescimento microbiano, até mesmo onde, a princípio, o pH e a temperatura sejam fatores limitantes (DIAS, 2006).

Segundo Fellows (2006), o teor de água é de grande importância na produção de alimentos, pois têm influência direta no controle da taxa de deterioração por microrganismos e reações enzimáticas e químicas que ocorrem durante a armazenagem. Diante destes fatores, a água exerce uma influência importante na conservação dos alimentos. Tal fato é conhecido desde épocas bastante remotas, onde a técnica da secagem ao sol era utilizada no intuito de conservar os alimentos. No processo de secagem, baseia-se na diminuição do conteúdo de água livre contida em um alimento até ao ponto em que ocorra inibição dos microrganismos deteriorantes e dos causadores de doença de origem alimentar (JAY, 2005).

3.2.2 TEOR DE ÁGUA

O teor de água, ou umidade de um alimento, constitui-se em um dos mais importantes e utilizados índices para análise em alimentos. A umidade é o principal fator para os processos microbiológicos, como o desenvolvimento de fungos, leveduras e bactérias. A determinação desse fator é de grande importância econômica para definir a estabilidade, qualidade e composição dos alimentos, podendo afetar a estocagem, a embalagem e o processamento do alimento (JAY, 2005; FELLOWS, 2006).

De acordo com Strumillo e Kudra (1986), os materiais úmidos são considerados materiais secos com certa quantidade de água, sendo que as diferentes propriedades dos materiais são parâmetros que influenciam significativamente no processo de secagem, dentre os quais, a umidade, que é um dos parâmetros mais importantes de um sólido a ser submetido à secagem. Conforme Cecchi (2003), a água ou umidade existente nos alimentos pode apresentar-se sob três formas:

- *Umidade livre:* é a umidade que está presente na superfície externa, entre os espaços intergranulares e os poros do material. Funciona como agente dispersante para substâncias coloidais e como solvente para compostos cristalinos;

- *Umidade ligada:* é a umidade contida no sólido que está ligada quimicamente com outras substâncias do alimento ou mesmo retida em microcapilares;
- *Umidade não ligada:* é a umidade que está em excesso em relação a umidade ligada.

O teor de umidade de um alimento pode ser expresso tanto em base úmida (b.u.) como em base seca (b.s.). Para Fioreze (2003), nas operações de secagem, o teor de umidade de sólido é geralmente expresso em função da sua massa de matéria seca, pois esta permanece constante durante todo o processo, ao contrário da massa do sólido úmido, que pode variar. Desta forma, o teor de umidade em base seca, (X_{bs}), é determinado através da razão entre a massa de água presente no sólido (m_w) e a massa de matéria seca (m_s):

$$X_{bs} = \frac{m_w}{m_s} \quad (1)$$

3.2.3 ATIVIDADE DE ÁGUA

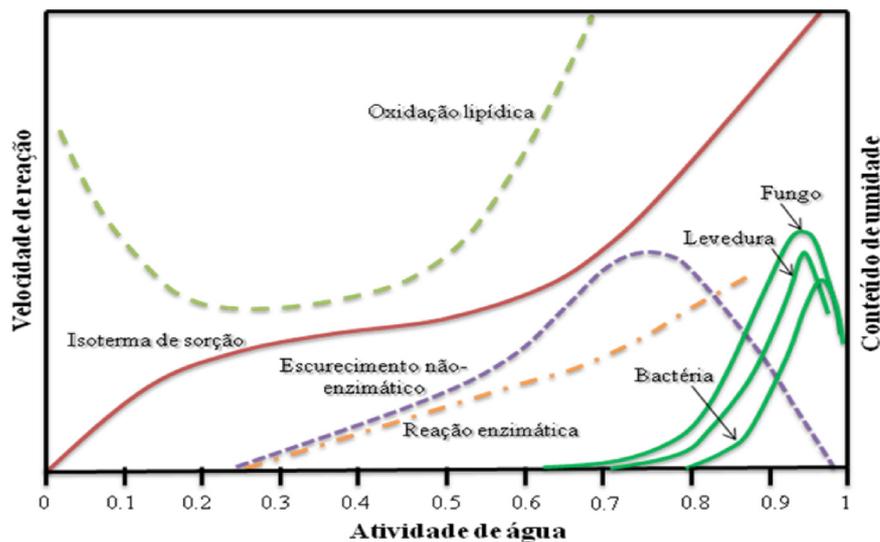
A umidade é um dos principais fatores que influencia na alteração dos alimentos. Entretanto, o seu teor não é a melhor variável para analisar esse comportamento. Segundo Maltini et al. (2003), a escolha da atividade de água, a_w , ao invés da umidade, enquanto parâmetro de referência para determinação da qualidade e segurança dos alimentos, é mais indicado por estar diretamente relacionado com o crescimento e atividade metabólica dos microrganismos e com reações de degradações de natureza química, enzimática e física, ao passo que o teor de umidade é uma medida meramente quantitativa.

De acordo com Ordóñez (2005), a atividade de água faz referência ao quão disponível está a água no alimento, ou seja, indica a intensidade das forças que unem a água com outros componentes não aquosos, podendo encontrar-se livre, permitindo o crescimento dos microrganismos e as reações químicas. A atividade de água, a_w , de um produto alimentício é definida pela razão entre a pressão de vapor de água de uma solução ou alimento (P) e a pressão de vapor da água pura (P_0), à mesma temperatura (GAVA *et al.*, 2008).

$$a_w = \frac{P}{P_0} \quad (2)$$

A atividade da água pode variar entre zero, onde a água livre é inexistente, e um, onde a água se encontra pura. O valor de a_w tem grande importância na área de tecnologia de alimentos, permitindo avaliar a disponibilidade de água para atividade microbológica, enzimática ou química e, conseqüentemente, a vida de prateleira do produto (GAVA et al., 2008). A Figura 2, disposta a seguir, apresenta a relação da taxa de deterioração dos alimentos em função da atividade de água.

Figura 2 - Relação da taxa de deterioração de alimentos



Fonte: BARBOSA-CÁNOVAS et al.,(2007)

A Figura mostra que a atividade ideal para um produto alimentício situa-se entre 0,2 e 0,3, pois nesta faixa a água apresenta-se fortemente ligada e não disponível para quaisquer transformações. Logo o alimento apresentará a maior estabilidade frente ao crescimento de microrganismos. Além disso, abaixo de 0,2 todas as reações estão praticamente inibidas, com exceção da oxidação de lipídios (RIBEIRO; SERAVALLI, 2003).

Todos os microrganismos necessitam de água livre para seu crescimento, tendo uma a_w mínima de desenvolvimento. Em geral, as bactérias necessitam de valores de a_w superiores aos valores requeridos pelas leveduras e bolores. É oportuno ressaltar também que a maior parte das bactérias deteriorantes de alimentos não cresce com a_w abaixo de 0,91, havendo exceções, como é o caso *Staphylococcus aureus*, cujo crescimento se verifica para valores até 0,86. Quanto aos fungos, pode-se afirmar que são os microrganismos mais resistentes à

diminuição da atividade de água, podendo crescer em alimentos onde a atividade encontra-se em 0,61 (GAVA et al., 2008).

A Tabela 3 demonstra a_w mínima para o crescimento de diversos microrganismos e produção de toxinas.

Tabela 3 - Valores mínimos de atividade de água (a_w) para crescimento e produção de toxina de patógenos de importância alimentar

Microrganismos	a_w para crescimento	a_w para produção de toxinas
<i>Clostridium botulinum</i> (tipo E)	0,95 – 0,97	0,97
<i>Salmonella</i> P.	0,92 – 0,95	-
<i>Staphylococcus aureus</i>	0,86	0,87 – 0,90 (enterotoxina A)
<i>Penicillium cyclopium</i>	0,81 – 0,85	0,87 – 0,90 (ocratoxina)
<i>Aspergillus flavus</i>	0,78 – 0,80	0,83 – 0,87 (aflatoxina)
<i>Aspergillus parasiticus</i>	0,82	0,87 (aflatoxina)
Bolores xerofílicos	0,65	-
Fungos osmofílicos	0,60	-

Fonte: adaptado de BEUCHAT (1981).

O emprego do parâmetro da atividade de água tem sido muito importante para garantir a estabilidade de alimentos e controlar o crescimento de microrganismos deterioradores e causadores de intoxicação e infecção alimentar. O crescimento microbiano, é relevante ressaltar, influencia na preservação de alimentos, ao passo que a redução dos valores da atividade de água corresponde a uma das melhores maneiras de controlar a deterioração dos alimentos e aumentar a sua vida de prateleira.

3.3 Secagem em alimentos

3.3.1 PROCESSO DE SECAGEM

A secagem é um dos processos mais antigos para conservação dos alimentos. Desde épocas bastante remotas, o homem vem desenvolvendo técnicas e métodos para preservação dos alimentos no intuito de permitir seu melhor aproveitamento em estado natural (GAVA et

al., 2008). Para Fioreze (2013), a secagem baseia-se na redução da atividade de água dos alimentos por meio da remoção de água presente nestes. Como é sabido, a maioria dos alimentos contém umidade suficiente para permitir o desenvolvimento de microrganismos e reações químicas e enzimáticas e, por essa razão, torna-se necessária a sua preservação através da secagem.

De acordo com Azevedo e Alves (2013), o processo de secagem é uma operação na qual há o fornecimento de calor a um determinado material que contém água, a fim de seja evaporada uma certa quantidade de umidade, obtendo-se um produto sólido parcialmente seco. Esta redução de água que o sólido pode conter, resulta em uma maior facilidade de manuseamento de sólidos secos, na melhora da conservação e armazenamento, na redução dos custos do transporte de sólidos e ainda possibilita o uso do ingrediente na elaboração de outros produtos alimentícios (TRAVAGLINI et al., 2001).

O processo de secagem é uma operação demasiadamente complexa, pois envolve a interação de fases, entre um gás (meio circundante do material) e um líquido (água presente na forma de umidade interna). Trata-se de um processo governado por fenômenos de transporte simultâneo de calor e massa, em estado transiente. Quando se coloca o produto em contato com ar quente, ocorre uma transferência de calor do ar ao produto sob efeito da diferença de temperatura entre eles. Paralelamente, a diferença de pressão de vapor de água existente no ar e da água presente na superfície do produto determina uma transferência de massa para o ar, na forma de vapor de água (AZEVEDO; ALVES, 2013; PARK et al., 2014).

O calor necessário para conseguir a evaporação dos alimentos pode ser transmitido por condução, convecção e por radiação ou como resultado de uma combinação de mecanismos. A transferência por convecção é o meio mais utilizado na secagem, a qual o fluxo de ar aquecido penetra na camada do produto. O ar possibilita uma dupla função: de levar calor ao alimento, provocando evaporação, e de ser uma espécie de veículo de transporte de valor úmido liberado pelo alimento (BRENNAN, 2006).

3.3.2 MECANISMO DE SECAGEM

Durante o processo de secagem, para que se tenha a evaporação de água da superfície do material para o ambiente, a água deve ser conduzida do interior do sólido até a superfície. O movimento de água é avaliado pelos mecanismos de transferência de massa, o que é de fundamental importância para a descrição da secagem. O conhecimento dos mecanismos é de fundamental relevância para a descrição do fenômeno de secagem.

Segundo Park et al. (2014), os mecanismos mais importantes e que dão fundamento ao fenômeno de secagem são:

- *Difusão líquida*: ocorre por causa da existência do gradiente de concentração;
- *Difusão de vapor*: ocorre devido ao gradiente de vapor e devido à presença do gradiente de temperatura;
- *Escoamento de líquido*: ocorre devido à diferença de pressão externa, concentração, alta temperatura e capilaridade.

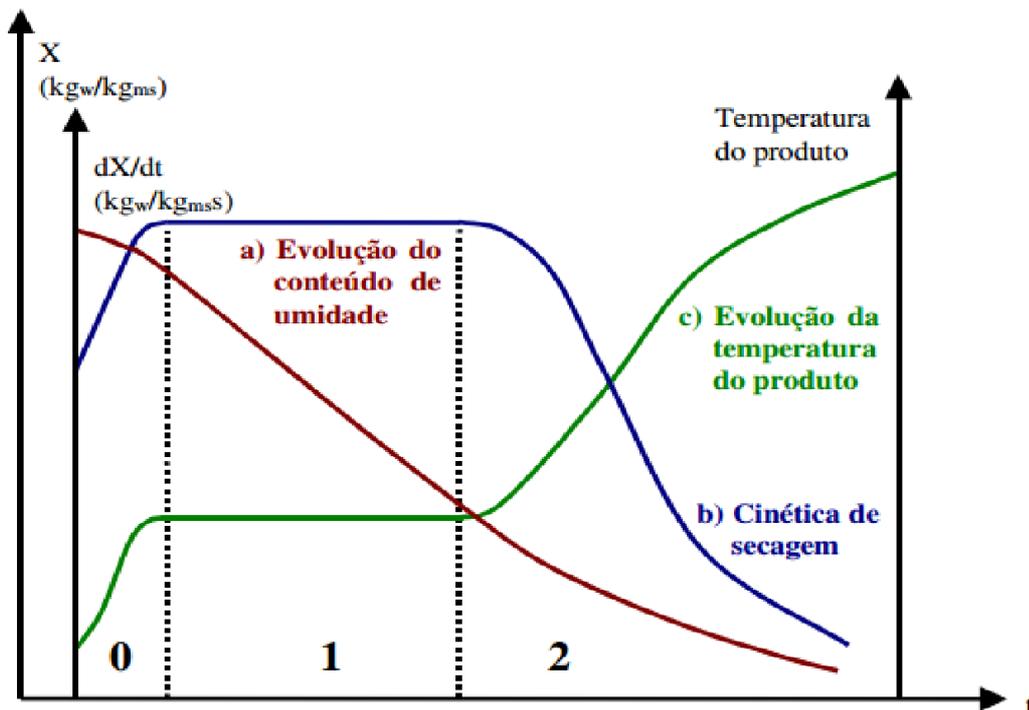
Quanto aos mecanismos, estes podem variar durante a operação, uma vez que são função da própria umidade interna do material, da estrutura física e da temperatura (KHORIDA; MARINOS-KOURS, 2003).

3.3.3 CINÉTICA DE SECAGEM

Um conhecimento preciso dos parâmetros cinéticos é essencial para prever o tempo de secagem, que representa um dado fundamental para o dimensionamento e a otimização do processo de secagem. As taxas de secagem podem ser estabelecidas mediante estudos de transferência de calor e massa, além de mecanismos de migração interna possíveis. Desta forma, obtém-se, para diversos produtos, uma curva de secagem que apresenta o comportamento do material inicial e final de umidade, da relação da água com a estrutura sólida e o transporte de água no interior do material até a sua superfície, possibilitando o conhecimento do processo de secagem (PARK et al., 2011).

Na cinética de secagem, a evolução das transferências simultâneas de calor e massa no decorrer da operação é dividida em três períodos, quando são analisadas as curvas de evolução da água, da temperatura do produto e sua taxa de secagem, com propriedades do ar constantes para o experimento (PARK et al., 2014). A Figura 3, por exemplo, demonstra uma típica curva de secagem.

Figura 3 - Curva de secagem



Fonte: PARK et al. (2014)

A curva (a) caracteriza a diminuição do teor de água do produto (X) em relação ao tempo (t) ao longo do processo de secagem. A curva (b) retrata a velocidade de secagem do produto, ou seja, a variação de umidade do produto por tempo, em relação ao tempo (t). Por fim, a curva (c) demonstra a variação da temperatura da amostra (T) com o tempo (t). Quanto aos períodos, o ciclo típico de uma secagem divide-se em três períodos distintos, conforme Park *et al.* (2014):

- *Período (0) - período de indução:* Trata-se da adequação do produto às condições de secagem. Nesse período o calor fornecido é destinado para uma elevação gradual de temperatura e da pressão de vapor da água. Esse processo continua até a transferência de calor compensar a transferência de massa (PARK et al., 2011);
- *Período (1) – período de taxa constante:* Tem-se uma grande quantidade de água disponível no interior do produto. A água evaporada do alimento é a que se encontra “livre”, ou seja, é a de fácil remoção. Na superfície do sólido a pressão de vapor da água mantém-se na temperatura de bulbo úmido e, conseqüentemente, a velocidade do processo é constante. Este período cessa quando a migração de água do interior até a superfície não consegue acompanhar a taxa de evaporação de água na superfície (PARK et al., 2011; PARK et al.,2014);

- *Período 2 – período de taxa decrescente:* Tem-se uma redução na quantidade de água na superfície do produto. Logo, a migração de umidade do interior para superfície do produto é mais lenta, reduzindo-se a transferência de massa. Deste modo, o fluxo de calor não é mais compensado pela transferência de massa consequentemente a velocidade de secagem começa a decrescer. Há um aumento da temperatura de superfície, tendendo a temperatura do ar de secagem. A secagem é encerrada quando o produto atinge a umidade de equilíbrio em relação ao ar de secagem (PARK et al., 2011; PARK et al., 2014);

3.3.4 FATORES QUE INFLUENCIAM A TAXA DE SECAGEM

De acordo com Azevedo e Alves (2013), vários parâmetros têm influência sobre o desempenho da taxa de secagem. Estes parâmetros estão relacionados com as condições do processo ou com a natureza do alimento submetido ao processo. É importante o conhecimento das variáveis do processo para um determinado produto, pois possibilita avaliar o tempo e o custo da operação.

No que diz respeito às condições dos processos, dentre os principais parâmetros da cinética de secagem estão a temperatura, a velocidade e a umidade relativa, que são as grandes variáveis a controlar esse processo (AZEVEDO; ALVES, 2013):

- *Temperatura:* Um aumento da temperatura diminui a umidade relativa do ar de secagem, aumentando o gradiente de umidade entre a superfície do produto e do ar e, em consequência, favorece o processo de secagem. É importante ressaltar, a elevação excessiva da temperatura pode ocasionar reações físicas ou químicas indesejáveis no produto (HELLDMAN; HARTEL, 1998);
- *Velocidade do ar:* Na secagem por convecção, um aumento da velocidade de escoamento do ar ocasiona um aumento da taxa de transferência de massa e, consequentemente, ocorre uma diminuição do período de taxa constante da secagem. Quanto ao período de taxa decrescente, como o fator limitante a taxa é a migração interna da umidade, não tem influência significativa (AZEVEDO; ALVES, 2013);
- *Umidade relativa:* Um aumento da umidade relativa do ar diminui a força do processo e, consequentemente, ocorre à redução da taxa de secagem (HELLDMAN; HARTEL, 1998).

Quanto à natureza do alimento, as variáveis mais importantes estão à espessura do sólido, a composição e estrutura do sólido. Segundo Azevedo e Alves (2013), quanto menor for à espessura do sólido, mais rápida será a velocidade de secagem. Isso acontece devido a distancia que a umidade deve percorrer para chegar à superfície do produto ser menor. Em relação à composição e estrutura do sólido, a orientação dos componentes e da microestrutura existente no interior do sólido influencia no mecanismo de remoção de umidade. A remoção da umidade é facilitada para sólidos de baixa concentração de solutos, tais como, açúcar, amido, proteína, e pelos espaços intercelulares dentro das células (GAVA et al., 2008).

3.4 Modelagem matemática da cinética de secagem

No estudo do processo de secagem, os modelos matemáticos nas simulações do processo possibilitam obter informações a respeito do comportamento do produto durante a remoção de água (RESENDE et al., 2008). O intuito principal destas análises é descrever os mecanismos (interno e externo) de transferência de energia e massa e seus efeitos. A simulação do processo é uma ferramenta importante para o dimensionamento de equipamentos, a otimização do processo e a viabilidade da aplicação (PARK *et al.*, 2014).

Para a modelagem do processo, a literatura fornece vários modelos matemáticos que representam satisfatoriamente a secagem de produtos, dentre eles estão: os teóricos, semiteóricos e empíricos. Nesse contexto, para caracterizar a cinética de secagem em camada fina de produtos agrícolas, a forma mais relevante consiste na abordagem matemática tendo como base os dados experimentais, nos quais possam ter informações dos tipos dos períodos de secagem: período à taxa constante e período à taxa decrescente (CORRÊA *et al.*, 2007).

3.4.1 MODELAGEM DO PERÍODO DE TAXA CRESCENTE

O fenômeno de transporte predominante em um período de taxa de secagem constante é a transferência de calor e massa na interface ar-produto. A estimativa deste é estabelecida via princípio da condutância de superfície, interpretada através do fenômeno da camada limite. Por sua vez, esta camada pode ser denominada como uma película fina do ar que apresenta um escoamento laminar ao redor da partícula. Nesse período, tem-se um equilíbrio da temperatura e umidade entre ao ar e a superfície desta partícula (PARK et al., 2014).

Durante este período, em decorrência de a temperatura do sólido ser igual à temperatura de bulbo úmido do ar, despreza-se a transferência por radiação e convecção. Além disso, a água evapora de acordo com o fornecimento de calor para o sólido úmido (AZEVEDO; ALVES, 2013; PARK et al., 2014). Como todo calor fornecido é convertido em calor latente, matematicamente, o período de taxa crescente pode ser representado pela seguinte equação (HALL, 2006):

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

Onde:

dX/dt : taxa de secagem;

A : área da superfície exposta (m²);

h : coeficiente de transferência de massa (W·(m²)⁻¹·°C⁻¹);

λ : calor de vaporização (J·mol⁻¹);

T_{amb} : temperatura ambiente (°C);

T_{bu} : temperatura de bulbo úmido do ar (°C).

3.4.2 MODELAGEM DO PERÍODO TAXA DECRESCENTE

Na secagem de produtos agrícolas e alimentícios, muitas vezes, tem-se observado apenas o período de taxa decrescente, devido à dificuldade que a água líquida no interior do sólido encontra para alcançar a superfície. Para descrever o processo de secagem no período de taxa decrescente, utilizam-se modelos teóricos e empíricos. Os modelos teóricos descrevem o processo de secagem baseados em leis físicas para a determinação do mecanismo de transferência de água no interior do produto. Já os modelos empíricos, baseiam-se em dados experimentais, análises adimensionais e condições externas sobre o transporte de água no interior do produto, como a temperatura, a umidade e a velocidade do ar de secagem, sendo bastante útil na simulação de camadas espessas do produto (CROVE et al., 2014; PARK et al., 2014).

3.4.2.1 Modelos empíricos empregados para a análise no período taxa decrescente

Os modelos empíricos são os mais adequados para ajustar o comportamento da taxa de secagem de produtos agrícolas por considerarem somente o efeito das resistências internas e externas do produto (BROOKER et al., 1992). Tal modelo é bastante útil para estimar a taxa de secagem decrescente em qualquer condição de umidade do material e o tempo deste processo (KARIM; HAWALER, 2005).

Modelos empíricos são baseados na lei de resfriamento de Newton para transferência de calor por convecção (HALL, 2006). Lewis (1921) introduziu um modelo exponencial que assume que a taxa de secagem é proporcional ao teor de água livre no material:

$$\frac{dX}{dt} = -K(X - X_e) \quad (4)$$

onde X corresponde ao teor de umidade média no tempo (g água/ g matéria seca), X_e é o teor de umidade de equilíbrio (g água/ g matéria seca) e K é denominado de constante de secagem (s^{-1}) (PARK et al., 2014).

A Equação 5 representa uma equação diferencial de primeira ordem, cuja solução pode ser obtida por separação de variáveis e posteriormente integrando, obtém-se o modelo exponencial:

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = e^{-Kt} \quad (5)$$

onde X_0 é a umidade inicial do material (g água/ g matéria seca) (PARK et al., 2014).

Page (1949) propôs uma modificação empírica sobre o método exponencial, a inclusão de um expoente b no termo tempo. Tal fato, permite obter uma equação mais precisa para descrever as mudanças de razão de umidade no processo de secagem em uma camada delgada de material (CORRÊA et al., 2003).

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = e^{-Kt^b} \quad (6)$$

3.4.2.2 Modelos teóricos empregados para a análise no período taxa decrescente

As difusões de líquido e vapor são mecanismos importantes de transferência de umidade que ocorrem durante a secagem de materiais biológicos. Os modelos teóricos utilizam os fundamentos da matemática e da difusão e da transferência de calor e massa para descrever o perfil de distribuição da água no interior de um determinado produto agrícola, desde que seja possível correlacionar sua forma à geometria de um sólido perfeito, além da exigência do estabelecimento da relação funcional entre o coeficiente de difusão, o teor de água e temperatura. O modelo teórico de difusão líquida, segundo a Lei de Fick, é um dos modelos teóricos mais utilizados para descrição da secagem de materiais alimentícios. Fick (1855) descreveu matematicamente a teoria da difusão em substância isotrópicas, baseado na hipótese de que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração (Equação 7):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \times (D_{ef} \times \nabla X) \quad (7)$$

Onde:

$\frac{\partial X}{\partial t}$: fluxo de massa de água em função do tempo;

D_{ef} : Difusividade efetiva;

X : concentração de água.

A fórmula proposta por Fick é simplificada, já que despreza a interdifusão, embora sua hipótese seja justificada, uma vez que a água migra dentro de uma matriz fixa. Clank (1975) calculou um grande número de soluções da equação de difusão para as condições iniciais e de contorno variadas. Estas soluções se aplicam aos sólidos de formas geométricas regulares (corpos semi-infinitos, placas, cilindros e esferas) e quando a difusividade é constante ou varia linearmente ou exponencialmente com a concentração de água. Em sistemas com formas geométricas regulares, onde a transferência de interna de umidade durante a secagem é radial, a difusividade efetiva pode ser determinada a partir da Equação 8.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{ef} \frac{\partial X}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{ef} \frac{\partial Y}{\partial y} \right) + \left(D_{ef} \frac{\partial Z}{\partial z} \right) \quad (8)$$

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Matéria-prima e preparação das amostras

Na presente pesquisa foi utilizada a batata-doce *in natura* (*Ipomeoea batatas*), adquirida de supermercado local da Região Metropolitana de São Luís do Maranhão. A batata-doce foi transportada em sacolas plásticas vedadas até o laboratório para a realização dos experimentos. Em seguida, foi realizado um procedimento de limpeza do material, através de lavagem com água potável corrente, e uma seleção do produto, para obter uma amostra mais homogênea possível. Por fim, para a realização dos ensaios de secagem foram cortadas em espessura de 10 mm.

4.2 Curvas de secagem da batata-doce

Para a realização do experimento de secagem da batata-doce, foi utilizado um secador de convecção forçada (modelo SL-100/A, Solab, Brasil) localizado no Laboratório de Engenharia de Produtos e Processos e, Biorrecursos da Universidade Federal do Maranhão. As temperaturas de secagem empregadas foram 30, 45 e 60 °C, na velocidade constante. Para isto, as amostras foram cortadas em círculos com diâmetro de 4,5 cm, e adequados em 3 bandejas de aço inox no equipamento de secagem (comprimento 20 cm, largura 15 cm e espessura que varia de 0,5 a 1,5 cm) cobrindo a área total destas. Acomodou-se as bandejas no secador onde foram tomados dados do peso (das três bandejas), primeiro em intervalos de 5 minutos durante o período de uma hora, depois em intervalos de 10 minutos por duas horas, e por fim em intervalos de 20 minutos, até não observar mais variação no peso das amostras entre os intervalos de tempo. Os resultados do peso da batata-doce para cada tempo de secagem foram expressos em base seca (b.s), multiplicando cada peso pela umidade inicial do produto em base seca (NAMSANGUAN et al., 2004; KALEEMULLAH; KAILAPPAN, 2006).

4.3 Modelagem e simulação do processo de secagem

Os modelos cinéticos de Weibull (Equação 9), Peleg (Equação 10), Henderson-Pabis (Equação 11), Lewis (Equação 12), Page (Equação 13), Wang-Sing (Equação 14), Logarítmico (Equação 15), Midilli et al. (Equação 16) e Aproximação por Difusão (Equação

17) foram utilizados para modelar e simular o comportamento das cinéticas de secagem da batata-doce, nos diferentes níveis de temperatura.

$$X = X_e + (X_0 - X_e) \exp\left(-\frac{t}{\beta}\right) \quad (9)$$

$$X = X_0 - \left(\frac{t}{k_1 + k_2 t}\right) \quad (10)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) a \times \exp(-kt) \quad (11)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) \exp(-kt) \quad (12)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) \exp(-kt^n) \quad (13)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) [kt^2 + nt + 1] \quad (14)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) a \times \exp(-kt) + c \quad (15)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) a \times \exp(-kt^n) + bt \quad (16)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) [a \times \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)] \quad (17)$$

Onde X é o teor de umidade (g/g, b.s); X_e é o teor de umidade de equilíbrio (g/g, b.s); X_0 é o teor de umidade inicial (g/g, b.s); t é o tempo de secagem (s); k , k_1 , k_2 são coeficientes de secagem (s^{-1}); a , b , c , n são constantes dos modelos.

O cálculo da difusividade da água através das curvas experimentais de secagem foi baseado a partir do modelo teórico da difusividade (Equação 8). Faz-se uso da Teoria Difusional, a baseada na equação da difusão líquida (Segunda Lei de Fick), onde o fluxo de massa é proporcional ao gradiente de concentração no interior da matriz sólida. Crank (1975), propôs uma solução analítica, considerando a distribuição de umidade inicial uniforme e ausência de qualquer resistência térmica para uma placa plana infinita. A Equação 18 foi utilizada para calcular a difusividade, baseada na Lei de Fick para geometria de placa plana.

$$Y = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp\left[-(2i+1)^2 \frac{\pi^2 D_{ef}}{4L^2} t\right] \quad (18)$$

onde, D_{ef} é a difusividade efetiva (m^2/s), i é o número de termos na série, t é o tempo de secagem (s) e, L é a meia espessura da amostra (m).

A variação do coeficiente de difusão (D_{ef} , m^2/s) com a temperatura de secagem foi analisada utilizando-se a relação de Arrhenius (Equação 19). É usual considerar-se o valor do coeficiente de difusão constante ou linearmente dependente da temperatura, podendo essa relação ser expressa por meio deste modelo, onde:

$$D_{ef} = D_o \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (19)$$

onde D_o é o fator pré exponencial (m^2/s), E_a é a energia de ativação (J/mol), R é a constante universal dos gases (8,314 J/mol/K) e T é a temperatura absoluta (K).

4.4 Estimativa dos parâmetros e análise estatística

Os parâmetros teóricos e empíricos dos modelos de ajuste das cinéticas de secagem e das isotermas de sorção foram estimados através das funções do programa Matlab® R2011b (The Mathworks Inc., Natick, MA, USA). Para as análises de regressão foram usadas as funções “nlinfit” e “nlparci” considerando a alternativa “robust” de análise. A função “nlinfit” utiliza o algoritmo Gauss-Newton com modificações de Levenberg-Marquardt para mensurar iterativamente os valores da resposta e recalculá-lo com base nos mínimos quadrados para um modelo não linear, enquanto a função “nlparci” estima os intervalos de confiança dos parâmetros do ajuste ($\alpha = 95\%$).

Uma vez estabelecido o melhor modelo de ajuste para os ensaios experimentais, análises estatísticas foram realizadas empregando as funções “regress”, “regstats” e “lillietest”. As funções “regress” e “regstats” foram empregadas para estimar os parâmetros na regressão e realizar um diagnóstico estatístico para os modelos, enquanto que a função “lillietest” foi usada para determinar, através do teste de Lilliefors se os resíduos seguem uma distribuição normal.

O coeficiente de determinação (R^2_{adj}) (Equação 20) e o erro médio relativo (MRE) (Equação 21) foram empregados para avaliar a precisão do modelo. O parâmetro estatístico R^2_{adj} , conhecido como a variação explicada, ajusta o coeficiente de determinação baseado no número de parâmetros do modelo, sendo um critério que define o sucesso do modelo ao mesmo tempo em que avalia a variação dos dados experimentais. Tem importante utilidade

quando se compara modelos com um número diferente de coeficientes embutidos. O parâmetro estatístico *MRE* avalia a precisão das estimativas (VILLA-VÉLEZ et al., 2012; CANO-HIGUITA et al., 2015).

$$R^2_{adj} = 1 - \left(\frac{n-1}{n-n_p} \right) (1-R^2) \quad (20)$$

$$MRE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|X_i - X_i^*|}{X_i^*} \quad (21)$$

onde, R^2 é o coeficiente de determinação entre os valores experimentais e calculados pelo melhor modelo de ajuste, X e X^* representam os valores experimentais e os valores calculados, n é o número de dados experimentais e n_p é o número de parâmetros do modelo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Cinética de secagem

A Tabela 4 apresenta os resultados experimentais para secagem da batata doce *in natura* obtidos através do acompanhamento do conteúdo de umidade das amostras para cada instante de tempo, em três temperaturas distintas. Os valores são expressos em termos da média e desvio padrão da triplicada das amostras estudadas.

Tabela 4 - Taxa secagem de batata doce em três temperaturas

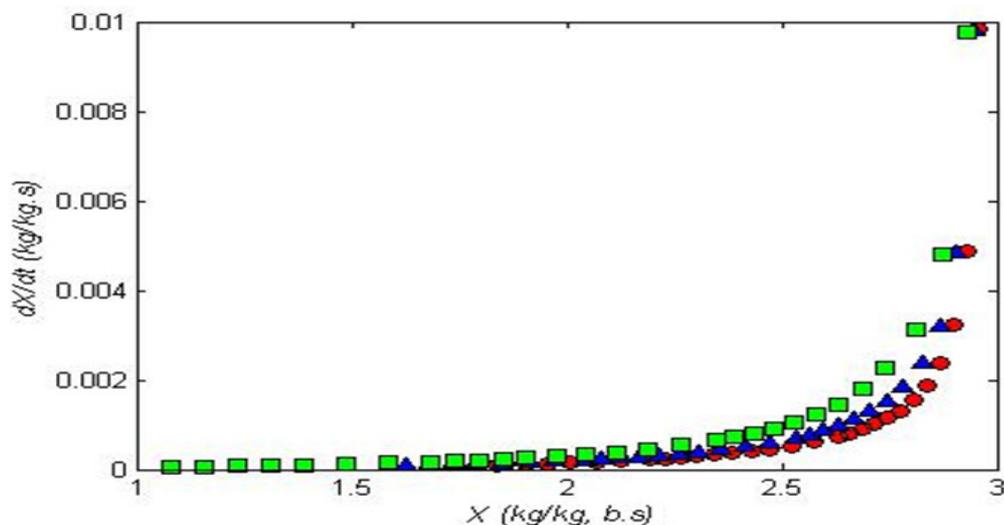
t (s)	X (g/g, b.s.)		
	T (30 °C)	T (45 °C)	T (60 °C)
0	2,977±0,000	2,977±0,000	2,977±0,000
300	2,955±0,001	2,945±0,003	2,928±0,004
600	2,928±0,002	2,905±0,007	2,875±0,016
900	2,897±0,004	2,870±0,011	2,813±0,025
1200	2,867±0,006	2,830±0,016	2,739±0,038
1500	2,838±0,008	2,783±0,020	2,689±0,040
1800	2,807±0,010	2,742±0,024	2,631±0,047
2100	2,774±0,012	2,702±0,028	2,578±0,051
2400	2,743±0,014	2,667±0,032	2,528±0,055
2700	2,715±0,014	2,631±0,034	2,480±0,058
3000	2,686±0,015	2,596±0,037	2,436±0,061
3300	2,655±0,014	2,562±0,039	2,390±0,065
3600	2,631±0,016	2,532±0,040	2,349±0,068
4200	2,575±0,018	2,470±0,042	2,268±0,076
4800	2,523±0,019	2,412±0,044	2,187±0,084
5400	2,474±0,019	2,360±0,046	2,116±0,091
6000	2,429±0,019	2,309±0,048	2,042±0,098
6600	2,384±0,019	2,259±0,049	1,975±0,103
7200	2,342±0,020	2,213±0,050	1,906±0,109
7800	2,302±0,020	2,167±0,052	1,854±0,115
8400	2,265±0,020	2,125±0,054	1,795±0,123
9000	2,230±0,020	2,077±0,064	1,739±0,129
9600	2,195±0,020	2,046±0,058	1,685±0,135
10800	2,128±0,020	1,970±0,060	1,583±0,147
12000	2,068±0,023	1,914±0,065	1,487±0,156
13200	2,009±0,024	1,849±0,072	1,390±0,172
14400	1,956±0,025	1,787±0,077	1,313±0,172
15600	1,906±0,027	1,733±0,082	1,234±0,179
16800	1,859±0,029	1,678±0,085	1,156±0,187
18000	1,836±0,029	1,628±0,089	1,081±0,192

* Média e desvio padrão da triplicata

Com base nos dados, pode-se observar uma diminuição do conteúdo de umidade das amostras com o incremento do tempo, para todas as temperaturas. A partir da análise entre as diferentes temperaturas de operação observa-se que, na medida em que ocorre um incremento dessa variável, mantendo-se todas as outras constantes, há uma redução no conteúdo de umidade final do material. Dessa maneira, a diminuição do conteúdo de umidade é mais acentuada no início do processo. Tal comportamento era esperado, pois, com o aumento da temperatura do meio do processo, ocorre maior diferença de temperaturas entre a amostra e o ar de secagem, ocasionando maior transferência de calor e massa (TONON; BRABET; HUBINGER, 2009). Diversos autores têm demonstrado esse comportamento em vários produtos alimentícios (MELO et al., 2015; SANTOS et al., 2010; SIMAL et al., 2005; TRIPATHY;KUMAR, 2008).

Para uma melhor visualização da faixa de variação da umidade do material durante o processo de secagem, foi possível determinar as taxas de secagem (Figura 4). Como se observa, a secagem da batata-doce ocorreu, especialmente, no período de taxa decrescente. Neste período, a difusão é o principal mecanismo físico que governa o movimento da umidade nas amostras (DOYMAZ, 2012). Segundo Park et al., (2007), esse comportamento pode ser observado na maioria dos produtos biológicos, pois as condições de secagem são tais que, a resistência de transferência de massa encontra-se essencialmente no interior do produto, fazendo com que a taxa de evaporação da superfície ao ambiente seja superior à taxa de reposição de umidade no interior à superfície do material.

Figura 4 - Taxa de secagem em função do conteúdo de umidade em base das amostras para o processo de secagem da batata-doce nas temperaturas de 30 (●), 45 (▲) e 60 (■) °C.



Fonte: Próprio Autor (2018)

Observa-se na Figura 4 que a elevação da temperatura resultou num efeito positivo sobre a taxa de secagem. De acordo com Viganó (2012), a cinética de secagem está diretamente relacionada com a temperatura do processo, o aumento na temperatura resulta em maior transferência de umidade. Tal fato pode ser observado quando a secagem é feita em temperatura de 60 °C. Essa transferência de umidade foi mais proeminente com a elevação da temperatura para 60 °C.

5.2 Modelagem da cinética de secagem

Na Tabela 5 estão apresentados os valores dos parâmetros dos modelos matemáticos, nas diferentes temperaturas. Enquanto que, na Tabela 6, encontram-se os resultados para variáveis utilizadas na avaliação estatística das cinéticas de secagem, sendo elas o coeficiente de determinação (R^2) e o erro médio relativo (MRE).

Tabela 5 - Valores dos parâmetros, dos modelos matemáticos, empregados para o ajuste da cinética de secagem da batata doce.

Modelos matemáticos	Parâmetros	Temperatura (°C)		
		30	45	60
Weibull	k	18273	14146	8223,1
Peleg	k_1	8888,5	6815,9	4838,9
	k_2	0,363	0,363	0,263
Henderson-Pabis	a	0,998	0,993	1,032
Logarítmico	k	$5,45 \times 10^{-5}$	$6,97 \times 10^{-5}$	$1,27 \times 10^5$
	a	0,852	0,915	1,295
Wang-Sing	k	$7,12 \times 10^{-5}$	$8,14 \times 10^{-5}$	$7,80 \times 10^{-5}$
	c	0,296	0,163	-0,574
Lewis	k	$1,18 \times 10^{-9}$	$1,64 \times 10^{-9}$	$2,29 \times 10^{-9}$
	n	$-5,56 \times 10^{-5}$	$-6,79 \times 10^{-5}$	$-9,50 \times 10^{-5}$
Page	k	$5,47 \times 10^{-5}$	$7,06 \times 10^{-5}$	$1,21 \times 10^5$
	n	$7,35 \times 10^{-5}$	$1,02 \times 10^5$	$3,07 \times 10^{-5}$
Midilli et al.	k_1	0,967	0,959	1,155
		$3,92 \times 10^{-5}$	$8,59 \times 10^{-5}$	$1,45 \times 10^5$

	k_2	1,055	0,979	0,943
	k_3	$1,36 \times 10^{-5}$	$4,77 \times 10^{-5}$	$-1,94 \times 10^{-5}$
Aproximação por Difusão	a	0,999	0,993	1,062
	k	$5,62 \times 10^{-5}$	$7,25 \times 10^{-5}$	$1,3121 \times 10^5$
	b	-4,645	-1,565	4,346

Fonte: Próprio Autor (2018)

Tabela 6 - Valores do coeficiente de determinação (R^2) e do erro médio relativo (MRE, %), dos modelos matemáticos, empregados para o ajuste da cinética de secagem, por convecção forçada, da batata-doce

Modelo matemático	Temperatura (°C)	R^2	MRE (%)
Weibull	30	0,998	0,507
	45	0,999	0,570
	60	0,991	3,132
Peleg	30	0,993	0,359
	45	0,999	0,205
	60	0,999	0,366
Handerson-Pabis	30	0,998	0,509
	45	0,998	0,508
	60	0,988	2,812
Lewis	30	0,998	0,507
	45	0,999	0,570
	60	0,991	3,132
Page	30	0,998	0,409
	45	0,999	0,268
	60	0,993	2,196
Logarítmico	30	0,999	0,156
	45	0,999	0,280
	60	0,999	0,616
Wang-Sing	30	0,999	0,253
	45	0,998	0,668
	60	0,997	1,417
Midilli et al.	30	0,999	0,176
	45	0,999	0,265
	60	0,999	0,323
Aproximação por Difusão	30	0,998	0,505
	45	0,998	0,486
	60	0,988	2,768

Fonte: Próprio Autor (2018)

Na análise do comportamento matemático descrito teoricamente por um modelo, é utilizado o parâmetro estatístico denominado coeficiente de determinação (R^2), que avalia o que de fato o que ocorre na prática. Conforme observado na Tabela 6, verifica-se que os

modelos analisados, apresentaram excelente ajuste dos dados experimentais, visto que foram obtidos valores para o coeficiente de determinação acima de 0,98, independentemente do modelo e da temperatura do ar de secagem. De acordo com Madamba et al., (1996) e Martinazzo et al. (2007), os valores do coeficiente de determinação (R^2) quanto mais próximo de 1, denotam um bom ajuste dos modelos para representação do fenômeno de secagem.

Quanto ao parâmetro estatístico denominado erro médio relativo (MRE , %), este representa a proximidade entre os valores experimentais e os calculados, ou seja, o erro na estimativa. Para a adequabilidade do modelo na descrição da secagem, o erro médio relativo deve apresentar os menores valores percentuais, inferiores ou ligeiramente superiores a 10%. Dessa maneira, em segunda análise da Tabela 6, verifica-se os modelos que apresentaram os menores valores percentuais para o MRE , foram os de Peleg (0,359 - 0,366), Logarítmico (0,156 - 0,616) e Midilli et al. (0,176 - 0,323), sendo assim, dentre os modelos testados no presente trabalho, os que obtiveram melhores resultados estatísticos para a modelagem do processo de secagem convectiva da batata-doce.

Para os três modelos, são mostrados nas Figuras 5 a 7, as respectivas curvas de secagem, que demonstram a variação do conteúdo de umidade, em base seca, em função do tempo. As curvas decrescentes indicam um bom ajuste aos valores calculados experimentalmente, enquanto que os pontos na reta representam os valores teóricos através de cada modelo. Observa-se que os pontos se encontram precisamente sobre as retas, indicando que os valores teóricos e experimentais são bem próximos. Tal fato indica que os parâmetros desses modelos são adequados para descrever as curvas de secagem da batata doce.

Figura 5 - Curvas de secagem da batata doce pelo modelo Peleg nas temperaturas 30 (●), 45 (▲) e 60 (■) °C e dos resíduos entre os valores calculados e experimentais

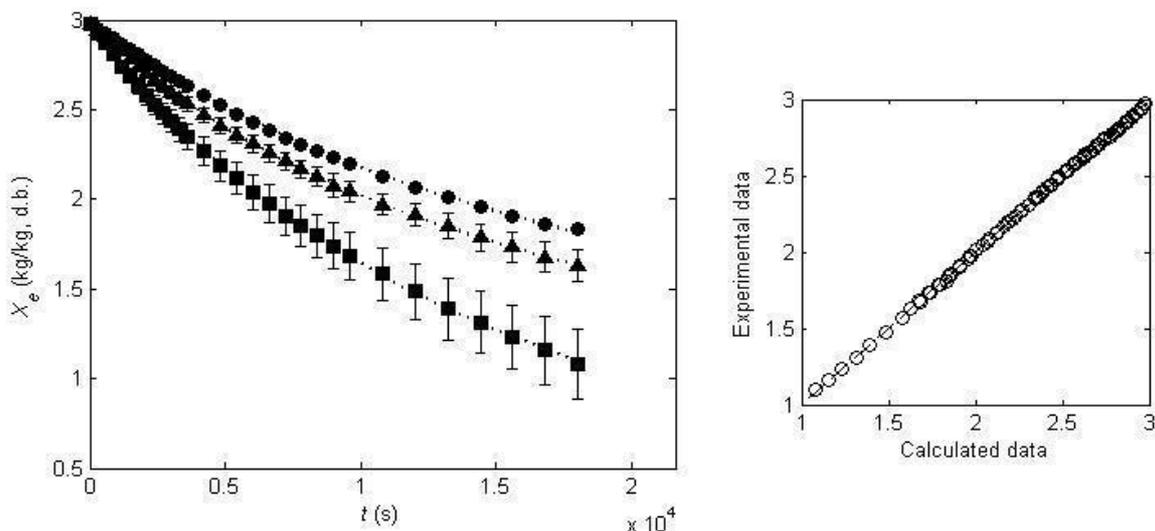


Figura 6 - Curvas de secagem da batata doce pelo modelo Logarítmico nas temperaturas 30 (●), 45 (▲) e 60 (■) °C e dos resíduos entre os valores calculados e experimentais

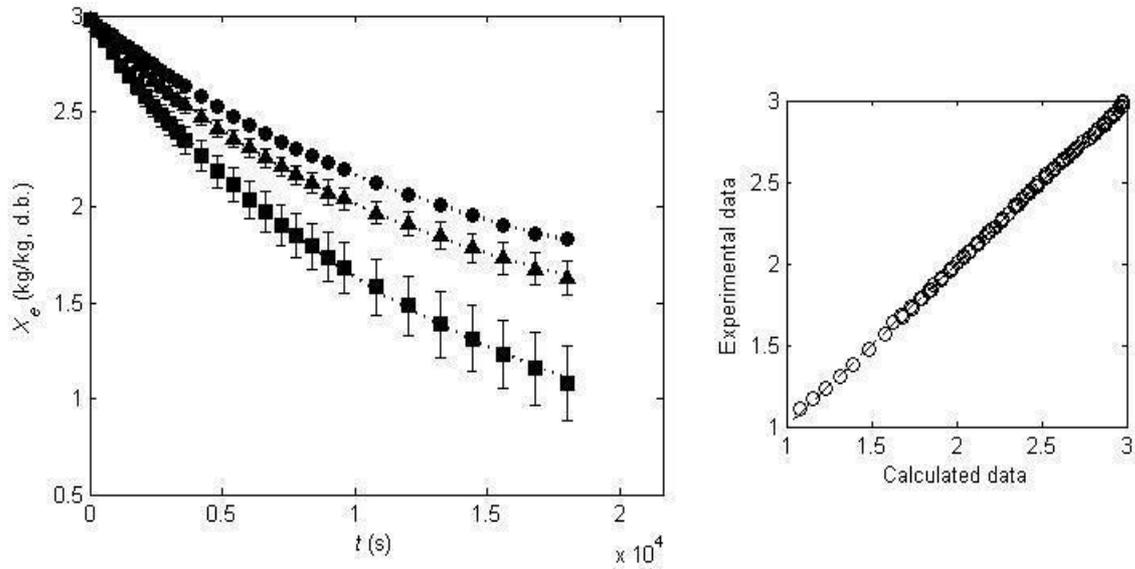
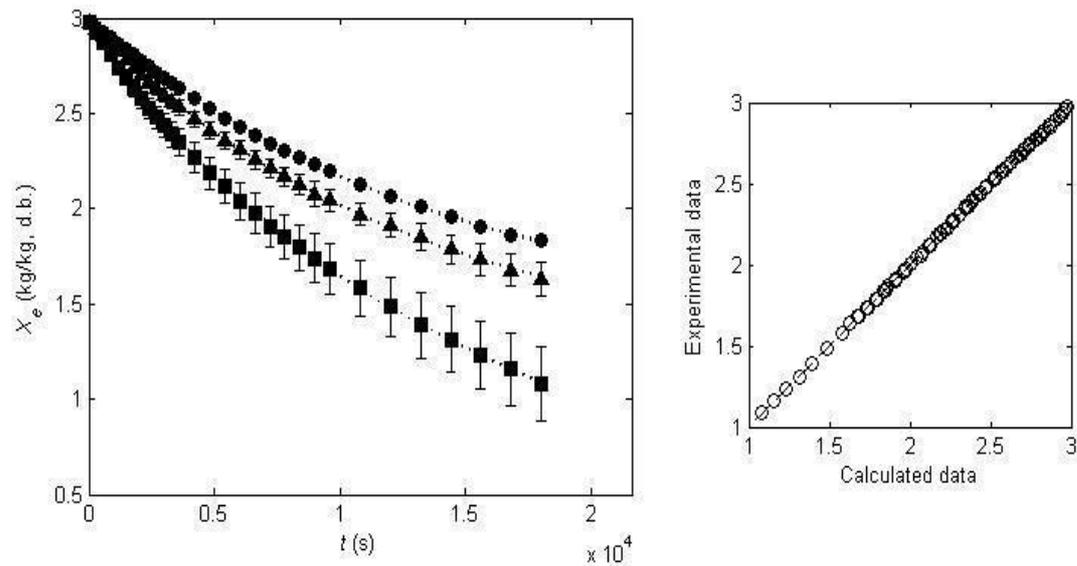


Figura 7 - Curvas de secagem da batata doce pelo modelo Midilli et al. nas temperaturas 30 (●), 45 (▲) e 60 (■) °C e dos resíduos entre os valores calculados e experimentais



É possível encontrar na literatura, trabalhos semelhantes de modelagem matemática do processo de secagem em vários materiais biológicos, no qual foram testados diferentes modelos empíricos e utilizados as mesmas variáveis para a análise estatística. Doymaz (2011) e Onwude (2018) observaram ao analisar a cinética de secagem de batata-doce em diferentes temperaturas e formas de processamento, que os resultados encontrados se assemelham com os do presente trabalho no que se refere ao modelo que melhor ajustou os dados e aos valores de R^2 e MRE . Também, estes resultados de secagem em camada fina corroboram com Dandamrongrak et al. (2002), Ertekin e Yaldiz (2004), Akpinar (2003), Lisbôa et al. (2015), Taheri-Garavand et al. (2011) e Toğrul e Pehlivan (2004) ao avaliarem secagem da banana, berinjela, batata, grãos de alpiste, tomate, uva ameixa e damasco, respectivamente.

5.3 Difusividade efetiva da secagem da batata-doce

Os valores da difusividade efetiva (D_{ef}) obtidos do modelo teórico difusivo para os diferentes tratamentos estão apresentados na Tabela 7, como também os resultados do ajuste.

Tabela 7 - Valores da difusividade efetiva (D_{ef}) obtidos para a batata-doce em diferentes temperaturas do ar de secagem

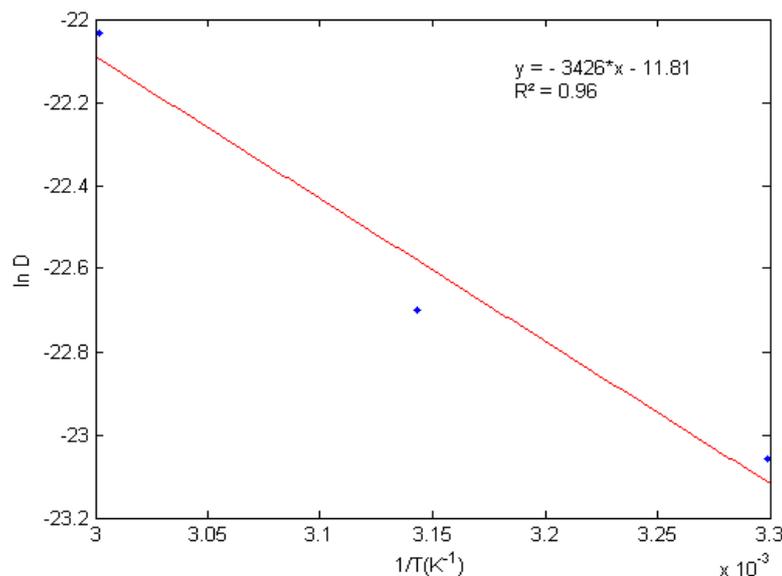
Temperatura (°C)	Batata-doce	
	D_{ef} ($m^2 s^{-1}$)	R^2
30	$9,705 \times 10^{-11}$	0,980
45	$1,395 \times 10^{-10}$	0,986
60	$2,705 \times 10^{-10}$	0,987

Fonte: Próprio Autor (2018)

Observa-se que os valores de difusividade efetiva aumentaram com a elevação da temperatura de secagem, variando de $9,7 \times 10^{-11}$ a $2,70 \times 10^{-10} m^2 s^{-1}$, demonstrando a diminuição das resistências internas da secagem. Segundo Rizvi (1995), a difusividade efetiva depende das características do ar de secagem e das demais propriedades físico-químicas do material que se relacionam a espécie e variedade; para Zogzas et al. (1996), os valores de difusividade efetiva para produtos alimentícios se encontram na faixa de 10^{-11} a 10^{-10} . Estes resultados são condizentes com Gouveia et al. (1999), Park et al., (2001), Goyal et al., (2006), Almeida et al. (2009), Doymaz (2010) ao avaliarem a secagem de gengibre, pêra, manga, feijão e batata-doce.

Os valores calculados de D_{ef} para cada temperatura estão apresentados na Figura 8 na forma de “ln D” plotados em função da temperatura absoluta ($1/T$). Observa-se que o ajuste linear obtido indica que houve uniformidade de variação da difusividade com a temperatura, sendo que o valor obtido do coeficiente de difusividade a 60 °C, foi um pouco superior em relação às temperaturas de 30 e 45 °C. De acordo com Goneli (2007), este comportamento pode ser explicado em razão da vibração molecular da água, pois a variação do coeficiente difusivo se dá com o aumento da temperatura, o que aumenta o nível de vibração molecular das moléculas da água contribuindo para uma difusão mais rápida. Desse modo, pode-se afirmar que houve uma difusão maior na temperatura de 60 °C.

Figura 8 - Representação da equação Arrhenius para a relação entre a difusividade efetiva e a temperatura absoluta na secagem de batata-doce



Fonte: Próprio Autor (2018)

A partir da inclinação da reta representada graficamente na Figura 8, pode-se ajustar por meio de regressão linear os parâmetros do modelo de Arrhenius para obter a energia de ativação (E_a). A energia de ativação para a secagem da batata-doce foi 28,48 kJ/mol. Segundo Kashaninejad et al. (2007), a energia de ativação indica a barreira a ser vencida para que ocorra a difusão de água através no produto. Nos processos de secagem, quanto menor a energia de ativação maior será a difusividade de água no produto (Goneli, 2007). Zogzas et al., (1996) ressalta que a energia de ativação para produtos agrícolas varia entre 12,7 a 110 kJ/mol. Alguns autores estudaram a energia de ativação para diversos produtos agrícolas, a exemplo de Doymaz (2005), que verificou o valor de 28,4 kJ/mol para cenouras, Ramesh

(2003) que encontrou o valor de 36,4 kJ/mol para o arroz cozido, Resende et al. (2007) que obtiveram o valor de 6,748 kJ/mol para o feijão, e Onwude et al. (2018) reportam valores 12,83 a 34,64 kJ/mol para a batata-doce. Destaca-se, por fim, que a energia de ativação da cinética de secagem para a batata-doce foi equivalente aos valores observados na literatura.

6 CONCLUSÃO

A partir da secagem por convecção forçada, é possível diminuir consideravelmente o conteúdo de umidade da batata-doce, o que viabiliza, sob o ponto de vista da conservação, diversas aplicações industriais para esse tubérculo.

Observou-se que para a secagem da batata-doce os modelos matemáticos de Peleg, Logarítmico e Midilli et al, foram os que apresentaram os menores valores de erro médio relativo e alto valor do coeficiente de determinação e, portanto, os melhores parâmetros de ajuste para as cinéticas de secagem da batata-doce.

Os valores da difusividade efetiva apresentaram um aumento de acordo com a elevação da temperatura do ar de secagem, apresentando os resultados na ordem de grandeza entre $9,705 \times 10^{-11}$ a $2,705 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Isto implica que a temperatura de secagem tem a capacidade de influenciar difusividade efetiva, e assim, na velocidade de secagem. Além disso, foi demonstrada através da equação de Arrhenius a dependência do coeficiente de difusão em relação à temperatura, notou-se que a energia de ativação se encontra dentro da faixa para produtos agrícolas de 12,7 a 110 kJ mol^{-1} .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKPINAR, E.; MIDILLI, A.; BICER, Y. Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modelling. **Energy Conversion and Management**, v.44, n.10, p.1689–1705, 2003.

ALMEIDA, D. P.; RESENDE, O.; COSTA, L. M.; MENDES, U. C.; SAL, J. F. Cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Global Science Technology**, v.2, p.72 - 83, 2009.

ALVES, A. U.; OLIVEIRA, A. P.; ALVES, E. U.; OLIVEIRA, A. N. P.; CARDOSO, E. A.; MATOS, B. F.; 554 ALVES, A. U Manejo da adubação nitrogenada para a batata-doce: fontes e parcelamento de aplicação. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v. 33, n. 6, p. 1554-1559, nov./dez., 2009.

ANDRADE JR, V. C.; VIANA, D. J. S; PINTO, N. A. V. D.; RIBEIRO, K. G.; PEREIRA, R. C.; NEIVA, I. P.; AZEVEDO, A. M.; ANDRADE, P. C. R. Características produtivas e qualitativas de ramas e raízes de batata-doce. **Horticultura Brasileira**, v. 30, n. 4, p. 584-589, out./dez. 2012.

ANDRADE JÚNIOR, V. C.; GOMES, J. A. A; OLIVEIRA, C. M. ; AZEVEDO, A. M.; FERNANDES, J. S. C.; GOMES, L. A. A. ; MALUF, W. R. 2016. Resistência de clones de batata-doce a *Meloidogyne javanica*. **Horticultura Brasileira**, v. 34, n. 1, p 130-136, 2016.

ARAÚJO, C. S. P.; ANDRADE, F. H. A.; GALDINO, P. O.; PINTO, M. S. C. *Desidratação de batata-doce para produção de farinha*. **Agropecuária Científica do Semiárido**, Campina Grande, v. 11, n. 4, p. 33-41, 2015.

AZEVEDO, E.D.; ALVES, A.M. **Engenharia de Processos de Separação**. Lisboa: IST Press, 2013. 820 p.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. et al. Water activity in foods: fundamentals and applications. **Ames: Blackwell Publishing Professional**, 2007.

BEUCHAT, L. R. Microbial stability as affected by water activity. **Cereal Foods World**, v. 26, n.7, p. 345-349, 1981.

BOBBIO, P. A.; BOBBIO, F. O. **Química do processamento de alimentos**. 3. ed. revisada e atualizada. São Paulo: Livraria Varela, 2001.

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

BROOKER, D.B.; BAKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. Drying and storage of grains and oil seeds. **Springer Science & Business Media**, New York: AVI Book Publisher, 1992. 450p.

CANO-HIGUITA, D. M.; VILLA-VÉLEZ, H. A.; TELIS-ROMERO, J.; VÁQUIRO, H. A.; TELIS, V. R. N. Influence of alternative drying aids on water sorption of spray dried mango mix powders: A thermodynamic approach. **Food and Bioprocess Technology**, v. 93, p. 19-28, 2015.

CASTRO, L. A. S. de; ROCHA, N. E. M.; ABRANTES, V. L. Avaliação biológica de biroses em plantas matrizes e mudas de batata-doce (*Ipomoea batatas*). Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2008, 12 p. **Circular Técnica** 75. ISSN 1981-5999.

CEREDA, M. P., WOSIACKI, G., CONCEIÇÃO, F. D. A. Características físico-químicas e reológicas de cultivares de batata doce (*Ipomoea batatas*). **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, Campinas, v.5, p.61-70, 1985.

CONAB, **Companhia Nacional de Abastecimento: Prohort - Programa Brasileiro de Modernização do Mercado de Hortigranjeiro**, 2018. Disponível em: <<http://www.ceasa.gov.br/precos.php?TIP=1&P00=HPB&P01=1&P02=1&P03=0>> Acesso em: 30 abr. 2018.

CECCHI, H. M. **Fundamentos teóricos e práticos em análise de alimentos**. Edição revisada. Campinas: Ed. da UNICAMP, 2003.

CORRÊA, P. C.; ARAÚJO, E. F.; JÚNIOR AFONSO, P. C.; Determinação dos parâmetros de secagem em camada delgada de sementes de milho doce (*Zeamays* l.) **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.2, n.2, p.110-119, 2003.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A.P.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, p.501-507, 2007.

COVRE, V. R.; LIRA, T. S.; BACELOS, M. S. Investigação de modelos semi-empíricos de cinética de secagem de pimenta-do-reino seca sob convecção natural. X Congresso Brasileiro de Engenharia Química Iniciação Científica. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v 1, n. 1, dezembro de 2014.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 1 ed. New York: Oxford University Press, 1975. 411 p.

DANDAMRONGRAK, R., YOUNG, G., MASON, R. (2002). Evaluation of various pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models. **Journal of Food Engineering**, v.55, p.139-146, 2002.

DIAS, Joaquim. **A Importância da Actividade da Água nos Alimentos**. 2006. Disponível em: < http://www.hipersuper.pt/2006/12/08/A_importancia_da_actividade_da_/>. Acesso em: 03 mai. 2018.

EDMOND, J. B.; AMMERMAN, G. R. *Sweet potatoes: production processing marketing*. **Wesport: The Air Publishing Company**, 1971. 58 p.

DOYMAZ, I. Drying behaviour of green beans. **Journal of food Engineering**, London, v.69, n.1, p.161-5, 2005.

DOYMAZ, I. Thin-layer drying characteristics of sweet potato slices and mathematical modelling. **Heat Mass Transfer**, v.47, n.3, 2777-285, 2010.

DOYMAZ, I. Infrared drying of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) slices. **Journal of Food Science and Technology**. V 49 (6), p. 760-766, 2012.

EMBRAPA HORTALIÇAS. **Sistemas de produção**, v 6, Jun. 2008. Disponível em <https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Batata-doce/Batata-doce_Ipomoea_batatas/composicao_uso.html>. Acesso em 23 mar.2018.

EMBRAPA – **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema de produção de batata-doce**. 2008. Disponível em: <https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Batata-doce/Batata-doce_Ipomoea_batatas/origem.html> Acesso em 11 abr.2018.

ERTEKIN, C., YALDIZ, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer-drying model. **Journal of Food Engineering**, v.63, p.349–359, 2004.

IEGGLI, C. V. S.; BOHRER, D.; DO NASCIMENTO, P. C.; DE CARVALHO, L. M.; GARCIA, S. C. Determination of sodium, potassium, calcium, magnesium, zinc, and iron in emulsified egg samples by flame atomic absorption spectrometry. **Talanta**, v. 80, n. 3, p. 1282-1286, 2010.

FAOSTAT. **Food and Agriculture Organization of the United Nations - Statistics Division**. Disponível em:

<http://fenix.fao.org/faostat/beta/en/?#rankings/countries_by_commodity>. Acesso em: 23 mar. 2018.

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

FELTRAN, J. C.; FABRI, E. G. Batata-doce uma cultura versátil, porém sub-utilizada. **Nosso Alho**, n. 6, p. 28–31, 2010.

FIGUEROA, ROMÉO. **Princípios de Secagem de Produtos Biológicos**. João Pessoa: Editora Universitária, 2003.

GONÇAVES NETO, A. C.; MALUF, W. R.; GOMES, L. A. A.; GONÇALVES, R. J. de S.; SILVA, V. de F.; LASMAR, A.; Aptidões de genótipos de batata-doce para consumo humano, produção de etano e alimentação animal. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.46, n.11, p.1513-1520, nov. 2011.

GOUVEIA, J. P. G.; ALMEIDA, F. A. C.; MURR, F. E. X. Estudo da difusividade e do encolhimento do gengibre (*Zingiber officinale*, Roscoe) durante a secagem. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.1, n.1, p.51-58, 1999.

GOYAL, R. K.; KINGSLEY, A. R. P.; MANIKANTAN, M. R.; ILYAS, S. M. Thin-layer Drying Kinetics of Raw Mango Slices. **Biosystems Engineering**. v.95, p.43-49, 2006.

HALL, C. W. **Handbook of industrial drying**. Montreal: Taylor & Francis Group, 2006. 110p.

HELLDMAN, D. R.; HARTEL, R. W. **Principles of Food Processing**. Gaithersburg, Maryland: Aspen Publishers, 1998.

HUAMÁN, Z. Systematic botany and morphology of the sweetpotato plant. Lima: **CIP Technical Information Bulletin**, p. 25, (1992).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Produção agrícola municipal: culturas temporárias e permanentes. - Rio de Janeiro, 2016. v. 43.

INTERNATIONAL POTATO CENTER. CIP sweet potato facts. Disponível em: <<https://cipotato.org/es/sweetpotato/>>. Acesso em: jan. 2018.

JAY, James M., **Microbiologia de Alimentos** – 6ª edição. Editora ARTMED, 2005.

KALEEMULLAH, S.; KAILAPPAN, R. Modelling of thin-layer drying kinetics of red chillies. **Journal of Food Engineering**, v. 76, n. 4, p. 531-537, 2006.

KARIM, M. A.; HAWLADER, M. N. A. Mathematical modelling and experimental investigation of tropical fruits drying. **International Journal of Heat and Transfer**. v.48, p.4914–4925. 2005.

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

KASHANINEJAD, M. et al. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v. 78, n. 1, p. 98-108, 2007.

LEWIS, L.W. The rate of drying of solid materials. **Industrial Engineering Chemistry**, v.13, n. 1, p. 427, 1921.

LISBÔA, J. F.; SILVA, J. N.; CALVALCANTI, M. T.; SILVA, E. M. C. A.; GONÇALVES, M. C. Análise da hidratação de grãos de alpiste. **Revista Brasileira de Engenharia agrícola e Ambiental**, v.19, n.3, p.218–223, 2015.

MADAMBA, P. S.; Driscoll, R. H.; Buckle, K. A. **Thin layer drying characteristics of garlic slices**. **Journal of Food Engineering**, Davis, v.29, n.1, p.75-97, 1996.

MALUF, Wilson Roberto; “A batata-doce e seu o potencial na alimentação huana, na alimentação animal, e na produção de etanol biocombustível.” **Cultura**, 2003.

MALTINI, E.; TORREGIANI, D.; VENIR, E.; BERTOLO, G. Water activity and the preservation of plant foods. **Food Chemistry**, v.82, p.79-86, 2003.

MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O. E MELO, E. DE C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11(3), p. 301–306, 2007.

MELO, J. C. C.; PEREIRA, E. D.; OLIVEIRA, K. P.; COSTA, C. H. C.; FEITOSA, R. M. Estudo da cinética de secagem da pimenta de cheiro em diferentes temperaturas. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Paraíba, v.10, n.2, p.09, 2015.

MIRANDA, J.E.C. de; FRANCA, F.H.; CARRIJO, O.A.; SOUZA, A.F.; AGUILAR, J.A.E. Cultivo de batata-doce (*Ipomea batatas* (L.)). Brasília, DF, **EMBRAPA-CNPB**, 1987. 7p. (EMBRAPA- CNPH. Instruções Técnicas, 7).

NAMSANGUAN, Y.; TIA, W.; DEVAHASTIN, S.; SOPONRONNARIT, S. Drying kinetics and quality of shrimp undergoing different two-stage drying process. **Drying Technology**, v. 22, n. 4, p. 759-778, 2004.

NODA, T.; TAKAHATA, Y.; NAGATA, T.; Properties of sweet potato starches from different tissue zones. **Starch/Stärke**, v.44, n.10, p. 365-368, 1992.

ORDÓÑEZ, J. A. Tecnologia de alimentos: componentes dos alimentos e processos. **Trad. F. Murad**. Porto Alegre, 2005. v. 1, 294p.

OLIVEIRA, A. C. B.; SEDIYAMA, M. A. N.; SEDIYAMA, T.; FINGER, F. L.; CRUZ, C. D. Variabilidade genética em batata-doce com base em marcadores isoenzimáticos. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 20, n. 4, p. 576-582, dezembro 2002.

OLIVEIRA, A.P.; OLIVEIRA, M.R.T.; BARBOSA, J.A.; SILVA, G.G.; NOGUEIRA, D.H.; MOURA, M.F.; BRAZ, M.S.S. Rendimento e qualidade de raízes de batata-doce adubada com níveis de uréia. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.23, n.4, p.925-928, 2005.

OLIVEIRA, A. P.; SILVA, J. E. L.; PEREIRA, W. E.; BARBOSA, L. J. N.; OLIVEIRA, A. N.; Características produtivas da batata-doce em função de doses de P_2O_5 de espaçamentos e de sistemas de plantio. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v. 30, n. 4, p. 611-617, jul./ago., 2006.

OLIVEIRA, A. P.; GONDIM, P. C.; SILVA, O. P. R.; OLIVEIRA, A. N. P.; GONDIM, S. C.; SILVA, J. A. Produção e teor de amido da batata-doce em cultivo sob adubação com matéria orgânica. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v.17, n.8, p.830-834, 2013.

ONWUDE, D. I.; HASHIM. N.; ABDAN,K.; JANIUS, R.; CHEN; G. Modelling the mid-infrared drying of sweet potato: kinetics, mass heat transfer parameters, and energy consumption. **Heat and Transfer**. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.007/s0023-108-2338-y>> Acesso em 10 jun. 2018.

PAGE, C. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. 1949. **MS Thesis – Purdue University**, West Lafayette, 1949.

PARK, K. B.; YADO, M. K. M.; BROD, F. P. R. Estudo de secagem de pêrabarlett(*Pyrus* sp.). **Ciênc. Tecnol. Alimentos**, Campinas, 21(3): 288-292, 2001.

PARK, K. B.; PARK, K. J.; ALONSO, L. F. T.; CORNEJO, F. E. P.; FABBRO, I. M. D. Secagem: Fundamentos e equações. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.16, n.1, p.93-127, 2014.

RAJAPAKSE, S.; NILMALGODA, S.D.; MOLNAR, M.; BALLARD, R.E.; AUSTIN, D.F.; BOHAC, J.R. Phylogenetic relationships of the sweet potato in *Ipomoea* series *Batatas* (Convolvulaceae) based on nuclear beta-amylase gene sequences. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, Elsevier, v.30, p.623-632, 2004.

RAMALHO, R. A.; FLORES, H.; SAUNDERS, C.; Hipovitaminose A no Brasil: um problema de saúde pública. *Rev Panam Salud Publica/Pan Am J Public Health* 12(2), p. 117-123, 2002.

RAMESH, M. N. Moisture transfer properties of cooked rice during drying. *Journal of Food Science*, v. 36, n. 2, p. 245-255, 2003.

Resende, O.; Corrêa, P. C.; Jarén, C.; Moure, A. J. Bean moisture diffusivity and drying kinetics: a comparison of the liquid diffusion model when taking into account and neglecting grain shrinkage. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v.5, p.51-58, 2007.

RIBEIRO, E. P., SERAVALLI, E. A. G. **Química de alimentos**. São Paulo: Edgard Blücher, Instituto Mauá de Tecnologia, 2004.

RIZVI, S.S.H. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In: Rao, M.A.; **Engineering properties of foods**. New York, 1995.

ROESLER, P. V. S. O.; GOMES, S. D.; MORO, E.; KUMMER, A. C. B.; CEREDA, M. P. Produção e qualidade de raiz tuberosa de cultivares de batata-doce no oeste do Paraná. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 30, n. 1, p. 117-122, 2008.

RÓS, A. B.; NARITA, N.; HIRATA, A. C. S.; Produtividade de batata-doce e propriedades físicas e químicas de solo em função de adubação orgânica mineral. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 35, n.1, p. 205-214, jan./fev. 2014.

SANTOS, P. dos; SILVA, F. S.; PORTO, A. G.; SILVA, F. T. C. da; FURTADO, G. F. Influência de pré-tratamentos na cinética de secagem em diferentes temperaturas de banana na variedade terra (*Musa Sapientum*, Linneo). **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, Paraná, v. 4, n.2, p. 218-234, 2010.

SILVA, J. B. C. da; LOPES, C. A.; FRANCA, F. H.; CARRINJO, O. A.; SOUZA, A. F.; PEREIRA, W.; Cultivo da batata-doce (*Ipomoea batatas* (L.) Lam). Brasília: EMBRAPA-CNPQ. **Instruções Técnicas da Embrapa Hortaliças**, n. 7, 1995.

Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/753382>> Acesso em: 13 mar. 2018.

SILVA, J. B. C.; LOPES, C. A.; MAGALHÃES, J. S. Cultura da Batata-doce. In: MarneyPascoliCereda. (Org.). **Agricultura: tuberosas amiláceas latino americanas**. São Paulo: Fundação Cargill, 2002, v. 4, p. 448- 504.

SILVEIRA, Márcio Antônio. Batata doce: uma nova alternativa para a produção de etanol. In: **ÁlcoolCombustível**. InstitutoEvaldo Lodi: Brasília, 2008. 15p.

SIMAL, S.; FEMENIA, A.; GARAU, M. C.; ROSSELL, C. Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. **Journal of FoodEngineering**, v. 66, p. 323-328, 2005.

SINGH, N. J.; PANDEY, R. K. Convective air drying characteristics of sweet potato cube (*Ipomoea batatas* L.). **Food Bioprod Process**, v.90, n.2, p.317–322, 2012.

TAHERI-GARAVAND, A.; RAFIEE, S.; KEYHANI, A. Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of tomato influence of air dryer conditions. **International Transaction Journal of Engineering, Management & Applied Sciences & Technologies**, v. 2, n. 2, 2011.

TOĞRUL, İ. T.; PEHLIVAN, D. Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. **JournalofFoodEngineering**, v. 65, n. 3, p. 413-425, 2004.

TONO, R. V.; BRABET, C.; HUBINGER, M. D. Influência da temperatura do ar de secagem e da concentração de agente carreador sobre as propriedades físico-químicas do suco de açaí em pó. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.29, 444-450, 20.

TRAVAGLINI, D.A.; AGUIRRE, J.M.; SILVEIRA, E.T. Desidratação de frutas. In: **Desidratação de frutas e hortaliças – Manual técnico**. Campinas: ITAL, 2001. p.31-34.

TRIPATHY, P. P.; KUMAR, S. Determination of temperature dependent drying parameters for potato cylinders and slices during solar drying. **Energy Conversion and Management**, v.49, p. 2941-2948, 2008.

VIGANÓ, J. **Propriedades termodinâmicas de adsorção de água e cinética de secagem de subprodutos da industrialização de abacaxi (ananás comosus L.) – casca e cilindro central.** Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos. São José do Rio Preto, 2012.

VILLA-VÉLEZ, H. A.; VÁQUIRO, H. A.; BON, J.; TELIS-ROMERO, J. Modelling thermodynamic properties of banana waste by analytical derivation of desorption isotherms. **International Journal of Food Engineering**, v. 8, n. 1, p. 1-19, 2012.

ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. **Drying Technology**, v.14, p.2225-2253, 1996.

APÊNDICE A – RESULTADOS PARA A MODELAGEM DA CINÉTICA DE SECAGEM DA BATATA-DOCE E DEMAIS MODELOS ESTUDADOS

Figura 9 - Curvas de secagem da batata-doce pelo modelo de Aproximação por Difusão

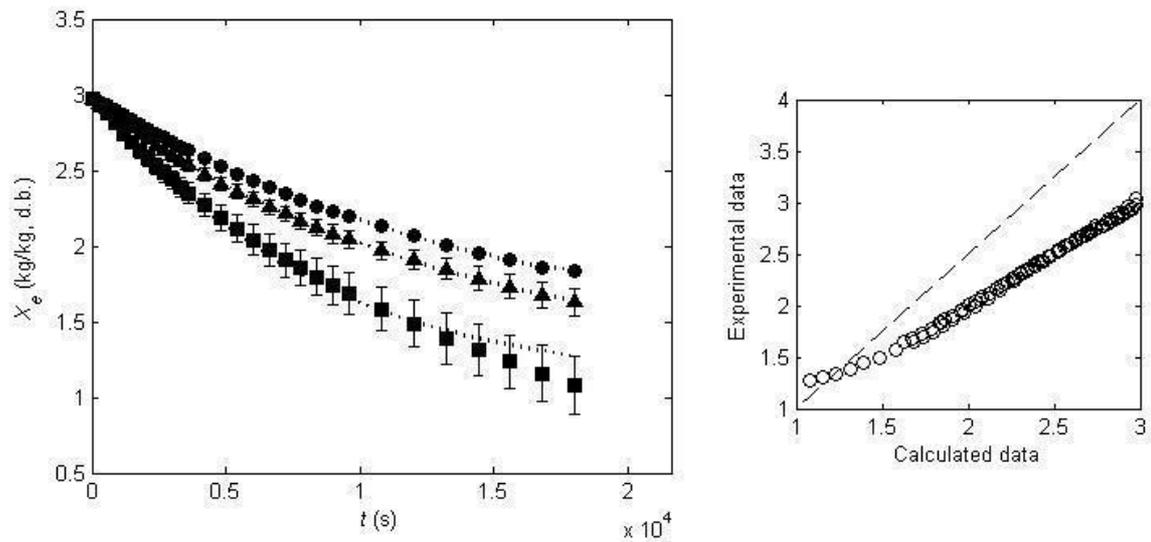


Figura 10 - Curvas de secagem da batata-doce pelo modelo de Dois Termos

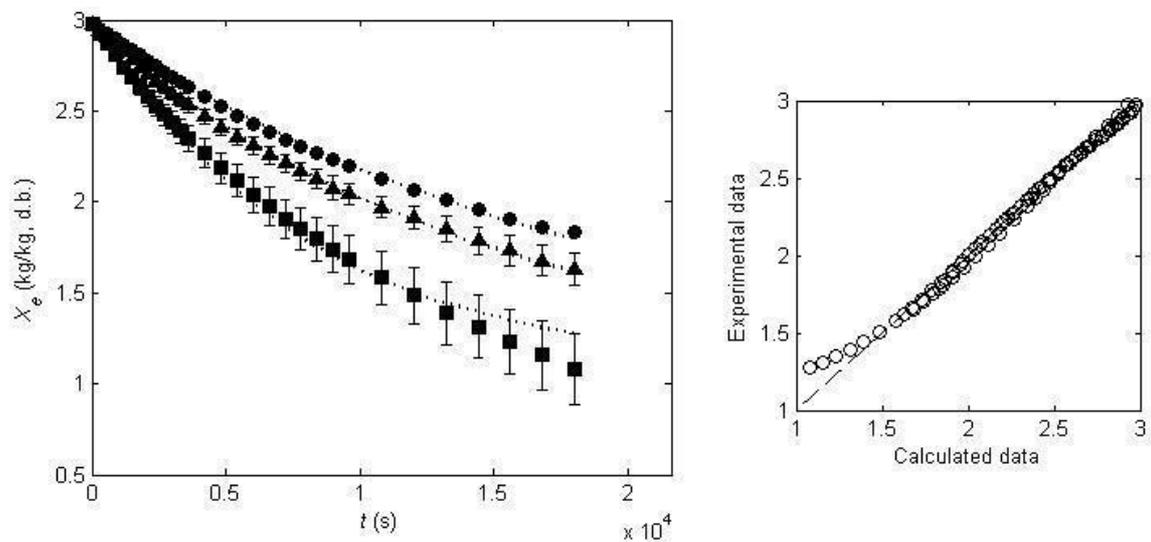


Figura 11 - Curvas secagem da batata-doce pelo modelo de Henderson-Pabis

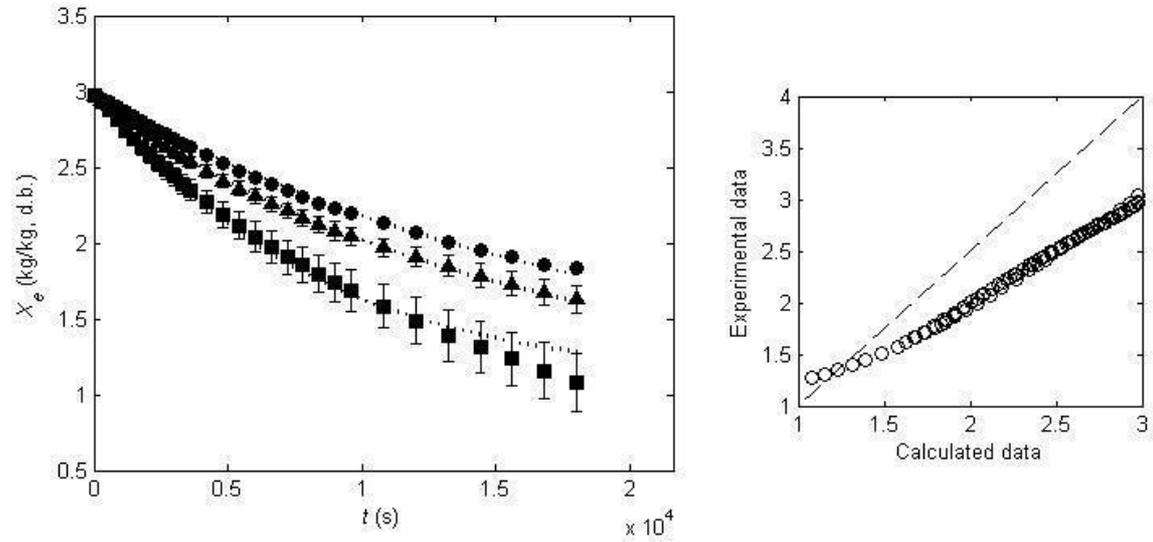


Figura 12 - Curvas de secagem da batata-doce pelo modelo Lewis

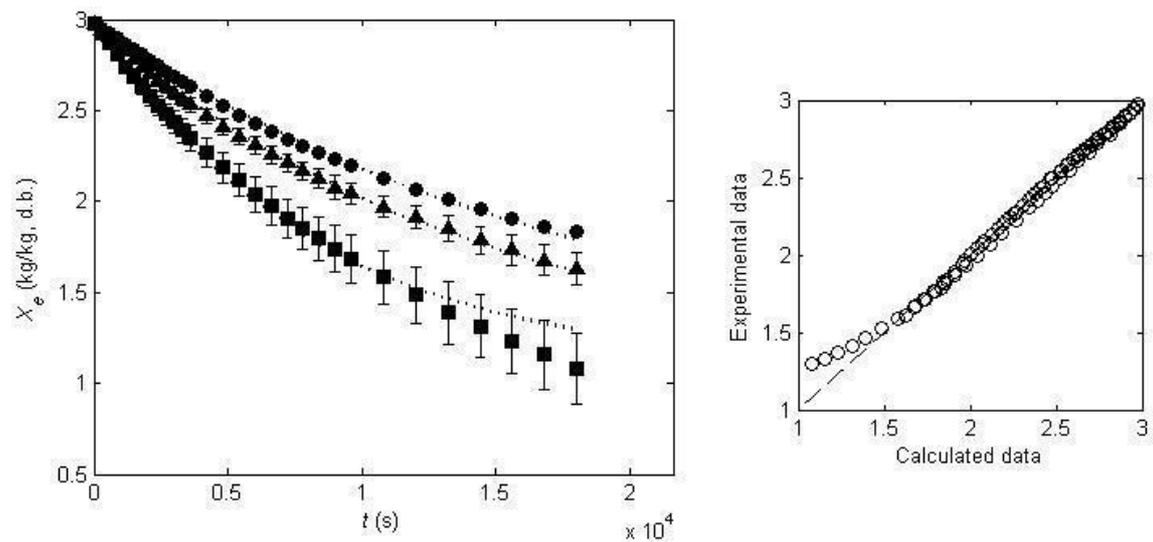


Figura 13 - Curvas de secagem da batata-doce pelo modelo de Wang-Sing

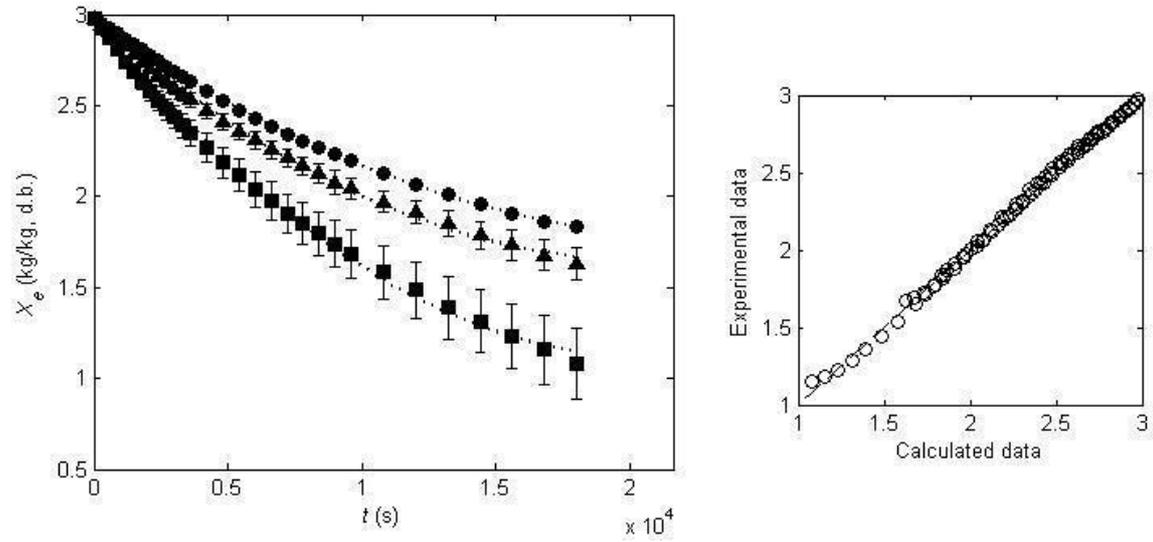
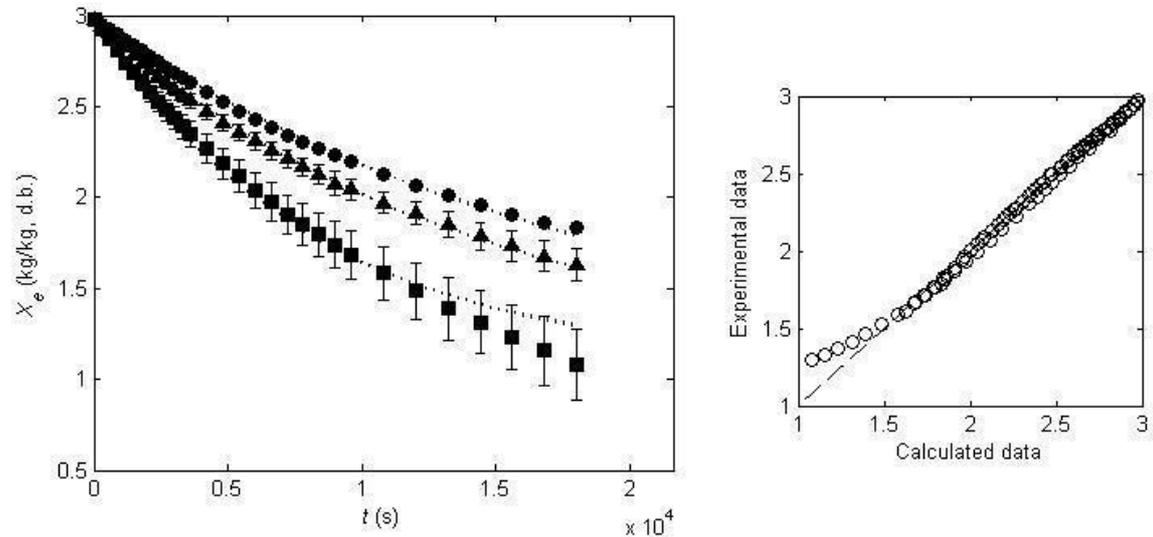


Figura 14 - Curvas de secagem da batata-doce pelo modelo de Weibull



APÊNDICE B – CÓDIGOS COMPUTACIONAIS UTILIZADO PARA MODELAGEM E SIMULAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

```

functionsecagem_batatadoce

format short g, format compact, warning ('off'), clc, clear all, close all;

globalmodel
model='AproDif';
                                % Weibull...

% Peleg...
% Henderson-Pabis...
%Logaritmico...
%WangSing...
% Lewis...
% Page...
                                % Midilli...
                                % DoisTerm...
                                % AproDif...

amostra='Batatadoce';
eval(['load(''Dados_' amostra '.mat'')']);

%=====
%                DISCRIMINANDO OS VALORES DE X0 E XE
%=====
x=x;
t=t;
T=T;
sd=sd;
x30=x(1:30,:);
x45=x(31:60,:);
x60=x(61:90,:);
t30=t(1:30,:);
t45=t(31:60,:);
t60=t(61:90,:);
T30=T(1:30,:);
T45=T(31:60,:);
T60=T(61:90,:);
sd30=sd(1:30,:);
sd45=sd(31:60,:);
sd60=sd(61:90,:);

for T=30;
ifstrcmp(model,'Weibull')
    beta0 =10560.34;
elseifstrcmp(model,'Peleg')
    beta0 =[1238.6    0.0084712];
elseifstrcmp(model,'Henderson-Pabis')
beta0 =[23994.3    0.0007];
elseifstrcmp(model,'Logaritmico')
    beta0 =[23994.3    0.0007    2.456];
elseifstrcmp(model,'WangSing')
    beta0 =[23994.3    0.0007];
elseifstrcmp(model,'Lewis')
    beta0 =0.00124;
elseifstrcmp(model,'Page')

```

```

        beta0 =[0.00012167      1.0678];
elseifstrcmp(model,'Midilli')
beta0 =[0.00034357      0.99379  -1.1739e-05];
elseifstrcmp(model,'DoisTerm')
beta0 =[0.00034357      0.99379  2.345 -1.1739e-05];
elseifstrcmp(model,'AproDif')
beta0 =[2.0046  0.00001914      0.23];
end
fprintf([model ' *****\n'])
%=====
%           FUNÇÕES DE MATLAB EMPREGADAS NA SIMULAÇÃO E MODELAGEM
%=====
beta30=nlinfit(t30,x30,'modelosbatatadoce',beta0);
    %[beta40,resid,J,sigma]=
nlinfit(t40,x40,'dryingmodels',beta0);%statset('Robust','off','WgtFun','log
istic','TolFun',1e-3,'TolX',1e-3,'Display','off','MaxIter',1e3);
    %beta40,alpha=0.05;ci =
nlparci(beta40,resid,'covar',sigma,'alpha',alpha);
xec=modelosbatatadoce(beta30,t30);beta30,
xec30=xec;
resid30=x30-xec30;
%=====
% PARÂMETROS ESTATÍSTICOS
%=====
    R30=min(min(corrcoef(x30,xec30).^2));
ndata=length(x30);
ifstrcmp(model,'Weibull')
nparam=1;
elseifstrcmp(model,'Peleg')
nparam=2;
elseifstrcmp(model,'Henderson-Pabis')
nparam=2;
elseifstrcmp(model,'Logaritmico')
nparam=3;
elseifstrcmp(model,'WangSing')
nparam=2;
elseifstrcmp(model,'Lewis')
nparam=1;
elseifstrcmp(model,'Page')
nparam=2;
elseifstrcmp(model,'Midilli')
nparam=3;
elseifstrcmp(model,'DoisTerm')
nparam=4;
elseifstrcmp(model,'AproDif')
nparam=3;
end
    R2adj30=1-(1-R30)*(ndata-1)/(ndata-nparam)
MRE30=100*sum(abs(x30-xec30)./x30)./length(x30)
    RMSE30=sqrt(mean(x30-xec30).^2);
MSE30=sum(abs(x30-xec30))/ndata
end;

for T=45;
ifstrcmp(model,'Weibull')
    beta0 =10560.34;
elseifstrcmp(model,'Peleg')
    beta0 =[1238.6  0.0084712];
elseifstrcmp(model,'Henderson-Pabis')
beta0 =[23994.3  0.0007];
elseifstrcmp(model,'Logaritmico')

```

```

        beta0 =[23994.3    0.0007    2.456];
elseifstrcmp(model,'WangSing')
    beta0 =[23994.3    0.0007];
elseifstrcmp(model,'Lewis')
    beta0 =0.00124;
elseifstrcmp(model,'Page')
beta0 =[0.00012167    1.0678];
elseifstrcmp(model,'Midilli')
beta0 =[0.00011508    0.91001  -2.0505e-05];
elseifstrcmp(model,'DoisTerm')
beta0 =[0.00034357    0.99379  2.345  -1.1739e-05];
elseifstrcmp(model,'AproDif')
beta0 =[212    0.00374  1.78];
end
fprintf([model ' *****\n'])
%=====
%           FUNÇÕES DE MATLAB EMPREGRADAS NA SIMULAÇÃO E MODELAGEM
%=====
beta45=nlinfit(t45,x45,'modelosbatatadoce',beta0);
% [beta56,resid,J,sigma]=
nlinfit(t50,x50,'modelos',beta0,statset('Robust','off','WgtFun','logistic',
'TolFun',1e-3,'TolX',1e-3,'Display','off','MaxIter',1e3));
% beta56,alpha=0.05;ci =
nlparci(beta50,resid,'covar',sigma,'alpha',alpha);
xec=modelosbatatadoce(beta45,t45);beta45,
xec45=xec;
resid45=x45-xec45;
%=====
% PARÂMETROS ESTATÍSTICOS
%=====
R45=min(min(corrcoef(x45,xec45).^2));
ndata=length(x45);
ifstrcmp(model,'Weibull')
nparam=1;
elseifstrcmp(model,'Peleg')
nparam=2;
elseifstrcmp(model,'Henderson-Pabis')
nparam=2;
elseifstrcmp(model,'Logaritmico')
nparam=3;
elseifstrcmp(model,'WangSing')
nparam=2;
elseifstrcmp(model,'Lewis')
nparam=1;
elseifstrcmp(model,'Page')
nparam=2;
elseifstrcmp(model,'Midilli')
nparam=3;
elseifstrcmp(model,'DoisTerm')
nparam=4;
elseifstrcmp(model,'AproDif')
nparam=3;
end
R2adj45=1-(1-R45)*(ndata-1)/(ndata-nparam)
MRE45=100*sum(abs(x45-xec45)./x45)./length(x45)
RMSE45=sqrt(mean(x45-xec45).^2);
MSE45=sum(abs(x45-xec45))/ndata
end;

for T=60;
ifstrcmp(model,'Weibull')

```

```

        beta0 =10560.34;
elseifstrcmp(model,'Peleg')
    beta0 =[1238.6    0.0084712];
elseifstrcmp(model,'Henderson-Pabis')
beta0 =[23994.3    0.0007];
elseifstrcmp(model,'Logaritmico')
    beta0 =[23994.3    0.0007    2.456];
elseifstrcmp(model,'WangSing')
    beta0 =[23994.3    0.0007];
elseifstrcmp(model,'Lewis')
    beta0 =0.00124;
elseifstrcmp(model,'Page')
beta0 =[0.00012167    1.0678];
elseifstrcmp(model,'Midilli')
beta0 =[0.00011508    0.91001    -2.0505e-05];
elseifstrcmp(model,'DoisTerm')
beta0 =[0.00034357    0.99379    2.345    -1.1739e-05];
elseifstrcmp(model,'AproDif')
beta0 =[0.0104    0.000002374    0.008];
end
fprintf([model ' *****\n'])
%=====
%           FUNÇÕES DE MATLAB EMPREGRADAS NA SIMULAÇÃO E MODELAGEM
%=====
beta60=nlinfit(t60,x60,'modelosbatatadoce',beta0);
% [beta60,resid,J,sigma]=
nlinfit(t60,x60,'dryingmodels',beta0,statset('Robust','off','WgtFun','logis
tic','TolFun',1e-3,'TolX',1e-3,'Display','off','MaxIter',1e3));
% beta60,alpha=0.05;ci =
nlparci(beta60,resid,'covar',sigma,'alpha',alpha);
xec=modelosbatatadoce(beta60,t60);beta60,
xec60=xec;
resid60=x60-xec60;
%=====
% PARÂMETROS ESTATÍSTICOS
%=====
R60=min(min(corrcoef(x60,xec60).^2));
ndata=length(x60);
ifstrcmp(model,'Weibull')
nparam=1;
elseifstrcmp(model,'Peleg')
nparam=2;
elseifstrcmp(model,'Henderson-Pabis')
nparam=2;
elseifstrcmp(model,'Logaritmico')
nparam=3;
elseifstrcmp(model,'WangSing')
nparam=2;
elseifstrcmp(model,'Lewis')
nparam=1;
elseifstrcmp(model,'Page')
nparam=2;
elseifstrcmp(model,'Midilli')
nparam=3;
elseifstrcmp(model,'DoisTerm')
nparam=4;
elseifstrcmp(model,'AproDif')
nparam=3;
end
R2adj60=1-(1-R60)*(ndata-1)/(ndata-nparam)
MRE60=100*sum(abs(x60-xec60)./x60)./length(x60)

```

```

        RMSE60=sqrt (mean (x60-xec60) .^2);
MSE60=sum(abs (x60-xec60))/ndata
end;

%=====
%           GRAFICO DOS DADOS EXPERIMENTAIS E DA SUPERFÍCIE DE RESPOSTA
%=====

xect=[xec30; xec45; xec60];
tet=[t30; t45; t60];
xet=[x30; x45; x60];
Tet=[T30; T45; T60];
sdt=[sd30; sd45; sd60];
resid=[resid30; resid45; resid60];

figure1 = figure('Color',[1 1 1],'Position',[400 200 700 350]);
colormap('gray');

% Create axes
axes1 = axes('Parent',figure1,...
    'Position',[0.0603060306030603 0.08666666666666667 0.465408255111225
0.8577777777777778]);
view(axes1,[42.5 36]);
box(axes1,'on');
hold(axes1,'all');

%Criar mesh
tt1=floor(min(min(tet))):500.0:max(max(tet));
tt2=floor(min(min(Tet))):2.0:max(max(Tet));
[Tg,xg]=meshgrid(tt1,tt2);
Yg=griddata(tet, Tet, xect, Tg,xg,'Linear');
mesh(Tg,xg,Yg,'Parent',axes1);
hold on
hidden all
plot3(tet,Tet,xet,'Parent',axes1,'MarkerFaceColor',[0 0 0],'Marker','o',...
    'LineStyle','none',...
    'Color',[0 0 0]);
%Createzlabel
zlabel({'{\itx} (kg/kg, d.b.)'});
% Create textbox
annotation(figure1,'textbox',...
    [0.413522670877004 0.05777777777777778 0.0964773291229959
0.0546815434681541],...
    'String',{'{\itT} (^{o}C)'},...
    'FitBoxToText','off',...
    'LineStyle','none');
% Create textbox
annotation(figure1,'textbox',...
    [0.00613764998868016 0.0828571428571429 0.108148064297034
0.062259414225941],...
    'String',{'{\itt} (s)'},...
    'FitBoxToText','off',...
    'LineStyle','none');

%===== Grafico de residuais anexo figure 1
=====
% Create axes

```

```

axes2 = axes('Parent',figure1,...
    'Position',[0.636997962417931 0.265873015873015 0.284430609010641
0.543333333333333]);
box(axes2,'on');
hold(axes2,'all');
plot(xet,xect,'ok',[floor(min(xet)) ceil(max(xet))],[floor(min(xect))
ceil(max(xect))],'--k');
%Createxlabel
xlabel('Calculated data','FontName','Helvetica');
% Createylabel
ylabel('Experimental data','FontName','Helvetica');

%=====
%=====
%
%                               Criar o grafico de residuais separado
%
%=====
%=====

figure2 = figure('Color',[1 1 1],'Position',[400 200 400 350]);
colormap('gray');
% Create axes
axes3 = axes('Parent',figure2);
box(axes3,'on');
hold(axes3,'all');
% Create axes
plot(xet,xect,'ok',[floor(min(xet)) ceil(max(xet))],[floor(min(xect))
ceil(max(xect))],'--k');
%Createxlabel
xlabel('Calculated data','FontName','Helvetica');
% Createylabel
ylabel('Experimental data','FontName','Helvetica');

%=====
%
%
%                               GRAFICO DOS DADOS EXPERIMENTAIS 2D E RESIDUAIS
%
%=====
%

% Create figure
figure3 = figure('Color',[1 1 1],'Position',[400 200 750 350]);
% Create axes
axes4 = axes('Parent',figure3,...
    'Position',[0.0793333333333332 0.125714285714286 0.4753333333333334
0.805714285714286]);
xlim(axes4,[0 21600]);
box(axes4,'on');
hold(axes4,'all');
%Createerrorbar
errorbar(t30,x30,sd30,'MarkerFaceColor',[0 0 0],'MarkerEdgeColor',[0 0
0],...
    'Marker','o',...
    'LineStyle','none',...
    'Parent',axes4,...
    'Color',[0 0 0]);
hold on

```

```

errorbar(t45,x45,sd45,'MarkerFaceColor',[0 0 0],'MarkerEdgeColor',[0 0
0],...
    'Marker','^',...
    'LineStyle','none',...
    'Parent',axes4,...
    'Color',[0 0 0]);
hold on
errorbar(t60,x60,sd60,'MarkerFaceColor',[0 0 0],'MarkerEdgeColor',[0 0
0],...
    'Marker','square',...
    'LineStyle','none',...
    'Parent',axes4,...
    'Color',[0 0 0]);
hold on
% Create plot
plot(t30,xec30,t45,xec45,t60,xec60,'Parent',axes4,'MarkerFaceColor',[0 0
0],...
    'MarkerEdgeColor',[0 0 0],...
    'LineWidth',2,...
    'LineStyle',': ',...
    'Color',[0 0 0,]);
%Createxlabel
xlabel('\itt} (s)','FontName','Helvetica');
%Createylabel
ylabel('\itX_{e}} (kg/kg, d.b.)');

%===== Grafico de residuais anexo figure 3
=====

% Create axes
axes5 = axes('Parent',figure3,...
    'Position',[0.6573333333333331 0.241428571428571 0.2826666666666668
0.547142857142857]);
box(axes5,'on');
hold(axes5,'all');
% Create axes
plot(xet,xect,'ok',[floor(min(x)) ceil(max(x))],[floor(min(xec))
ceil(max(xec))],'--k');
%Createxlabel
xlabel('Calculated data','FontName','Helvetica');
%Createylabel
ylabel('Experimental data','FontName','Helvetica');

%=====
%          Superficie de resposta +residuais + histograma          %
%=====
figure4 = figure('Color',[1 1 1],'Position',[100 200 1000 350]);
colormap('gray');
% Create axes
axes6 = axes('Parent',figure4,...
    'Position',[0.0603060306030603 0.08666666666666667 0.35769396939694
0.8577777777777778]);
view(axes6,[34.5 32]);
box(axes6,'on');
hold(axes6,'all');

%Crear mesh

```

```

tt1=floor(min(min(tet))):500.0:max(max(tet));
tt2=floor(min(min(Tet))):2.0:max(max(Tet));
[Tg,xg]=meshgrid(tt1,tt2);
Yg=griddata(tet, Tet, xect, Tg,xg,'Linear');
mesh(Tg,xg,Yg,'Parent',axes6);
hold on
hidden all
plot3(tet,Tet,xect,'Parent',axes6,'MarkerFaceColor',[0 0 0],'Marker','o',...
      'LineStyle','none',...
      'Color',[0 0 0]);

% Create title
% title({' '});
%Createzlabel
xlabel({'{\itX} (kg/kg, d.b.)'});

% Create textbox
annotation('figure4','textbox',...
          [0.0297265964480929 0.0481318681318682 0.108148064297034
0.062259414225941],...
          'String',{'{\itt} (s)'},...
          'FitBoxToText','off',...
          'LineStyle','none');

% Create textbox
annotation('figure4','textbox',...
          [0.36339141008253 0.094920634920635 0.0964773291229959
0.0546815434681541],...
          'String',{'{\itT} (^{o}C)'},...
          'FitBoxToText','off',...
          'LineStyle','none');

% Create textbox
annotation('figure4','textbox',...
          [0.923244406196214 0.859049906425451 0.035 0.08],'String',{'A'},...
          'LineStyle','none');

%===== Criar o grafico de residuais =====%
% Create axes
axes7 = axes('Parent',figure4,...
            'Position',[0.507464283661453 0.246092796092795 0.186535716338547
0.468192918192919]);
% ylim(axes7,[0 4]);
box(axes7,'on');
hold(axes7,'all');
plot(xet,xect,'ok',[floor(min(xet)) ceil(max(xet))],[floor(min(xect))
ceil(max(xect))],'--k');
%Createxlabel
xlabel('Calculated','FontName','Helvetica');
%Createylabel
ylabel('Experimental','FontName','Helvetica');

%===== Criar o histograma dos residuos =====%
% Create axes
axes8 = axes('Parent',figure4,...
            'Position',[0.76479391589679 0.236434216643421 0.18120608410321
0.475653695444491],...
            'CLim',[1 2]);
box(axes8,'on');

```

```

hold(axes8,'all');
[muhat,sigmahat] = normfit(resid);
numbins =12;
[n,xout]=hist(resid,numbins);
barh(xout,n,'histc');
box on
hold all
[bincounts,binpositions] = hist(resid,numbins,'MarkerFaceColor','w',...
    'FaceColor',[1 1 1]);
binwidth = binpositions(2) - binpositions(1);
histarea = binwidth*sum(bincounts);
x = linspace(-max(abs(binpositions)),max(abs(binpositions)),50);
y = normpdf(x,muhat,sigmahat);
plot(histarea*y,x,'Parent',axes8,'LineWidth',2,'Color',[0 0 0]); % linha de
tendência
%Createxlabel
xlabel('Frequency','FontName','Helvetica');
%Createylabel
ylabel('Residual','FontName','Helvetica');

%=====
%                               ANALISE DE RESIDUAIS                               %
%=====
figure5 =figure('Color',[1 1 1],'Position',[200 300 1000 250]);
%===== Criar o grafico de valores estimados vs calculados =====
% Create subplot1
subplot1 = subplot(1,3,1,'Parent',figure5,'FontName','Helvetica');
box(subplot1,'on');
hold(subplot1,'all');
plot(xet,xect,'ok',[floor(min(xet)) ceil(max(xet))],...
    [floor(min(xect)) ceil(max(xect))],'--k');
xlabel('Calculated data','FontName','Helvetica');
%Createylabel
ylabel('Experimental data','FontName','Helvetica');
%===== Criar o grafico de residuais =====
% Create subplot2
subplot2 = subplot(1,3,2,'Parent',figure5,'FontName','Helvetica');
plot(resid,'Marker','o','LineStyle','none',...
    'Color',[0 0 0]);
holdon,plot([0 length(resid)],[0 0],'--k') % Linha media do grafico
box(subplot2,'on');
hold(subplot2,'all');
%Createxlabel
xlabel('Datum','FontName','Helvetica');
%Createylabel
ylabel('Residual','FontName','Helvetica');
%===== Criar o histograma dos residuos =====
% Create subplot3
[muhat,sigmahat] = normfit(resid);
numbins =12;
[n,xout]=hist(resid,numbins);
subplot3 = subplot(1,3,3,'Parent',figure5,'FontName','Helvetica','CLim',[1
2]);
h=barh(xout,n,'histc');
set(h,'FaceColor','none','LineWidth', 1, 'LineStyle','-','EdgeColor',[0 0
0]), hold on
box(subplot3,'on');
hold(subplot3,'all');
[bincounts,binpositions] = hist(resid,numbins,'MarkerFaceColor','w',...
    'FaceColor',[0 0 0]);

```

```

binwidth = binpositions(2) - binpositions(1);
histarea = binwidth*sum(bincounts);
x = linspace(-max(abs(binpositions)),max(abs(binpositions)),50);
y = normpdf(x,muhat,sigmahat);
subplot(1,3,3),plot(histarea*y,x,'k','LineWidth',2); % linha de tendência
%Createtxlabel
xlabel('Frequency','FontName','Helvetica');
%Createylabel
ylabel('Residual','FontName','Helvetica');

```

```

% Create textbox
annotation(figure5,'textbox',...
[0.923244406196214 0.859049906425451 0.035 0.08],'String',{'A'},...
'LineStyle','none');

```

```

%===== Teste de distribuição normal dos residuos =====%
[h,p]=lillietest(resid)
end

```

```

unctiongrafico_taxa

```

```

clc, clear all, close all

```

```

amostra='Batatadoce';
eval(['load(''Dados_' amostra '.mat'')']);

```

```

%=====
%                DISCRIMINANDO OS VALORES DE X0 E XE
%=====

```

```

x=x;
t=t;
T=T;
sd=sd;
x30=x(1:30,:);
x45=x(31:60,:);
x60=x(61:90,:);
t30=t(1:30,:);
t45=t(31:60,:);
t60=t(61:90,:);
T30=T(1:30,:);
T45=T(31:60,:);
T60=T(61:90,:);
sd30=sd(1:30,:);
sd45=sd(31:60,:);
sd60=sd(61:90,:);

```

```

dxdt30=x30./t30;
dxdt45=x45./t45;
dxdt60=x60./t60;

```

```

%=====
%
%                Criar o grafico de residuais separado
%
```

```

%=====
=====
figure1 = figure('Color',[1 1 1],'Position',[400 200 500 350]);
colormap('gray');
% Create axes
axes1 = axes('Parent',figure1);
box(axes1,'on');
hold(axes1,'all');

% Create plot
plot(x30,dxdt30,'MarkerFaceColor','r','Marker','o','LineStyle','none',...
     'Color',[0 0 0]);
% Create plot
plot(x45,dxdt45,'MarkerFaceColor','b','Marker','^','LineStyle','none',...
     'Color',[0 0 0]);
% Create plot
plot(x60,dxdt60,'MarkerFaceColor','g','Marker','square','LineStyle','none',
     ...
     'Color',[0 0 0]);

%Createxlabel
ylabel('\it{dX/dt} (kg/kg.s)','FontName','Helvetica');
%Createylabel
xlabel('\it{X_{e}} (kg/kg, b.s)','FontName','Helvetica');
end

% Valor inicial para el parámetro del modelo
clc, clear all, close all, format long

D0=1e-12;

% IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS USANDO fminsearch
D=fminsearch('Error',D0,optimset('Display','iter'));D,

load('data30.mat');

nparam=1;
R2=min(min(corrcoef(data(:,2),Modelo(D,data(:,1),data(:,2))))))^2
% R2adj=1-(1-R2)*(data(:,2)-1)/(data(:,1)-nparam)
% MRE=100*sum(abs(Xexp-Xcal)./Xexp)./length(Xexp)

% Valor inicial para el parámetro del modelo
clc, clear all, close all, format long

D0=1e-12;

% IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS USANDO fminsearch
D=fminsearch('Error',D0,optimset('Display','iter'));D,

load('data45.mat');

nparam=1;
R2=min(min(corrcoef(data(:,2),Modelo(D,data(:,1),data(:,2))))))^2
% R2adj=1-(1-R2)*(data(:,2)-1)/(data(:,1)-nparam)
% MRE=100*sum(abs(Xexp-Xcal)./Xexp)./length(Xexp)

```

```
% Valor inicial para el parámetro del modelo
clc, clear all, close all, format long

D0=1e-12;

% IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS USANDO fminsearch
D=fminsearch('Error',D0,optimset('Display','iter'));D,

load('data60.mat');

nparam=1;
R2=min(min(corrcoef(data(:,2),Modelo(D,data(:,1),data(:,2))))))^2
% R2adj=1-(1-R2)*(data(:,2)-1)/(data(:,1)-nparam)
% MRE=100*sum(abs(Xexp-Xcal)./Xexp)./length(Xexp)
```

