

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

PAULA PRISCILA DE SOUZA MACHADO GUMZ

**MODELAGEM MATEMÁTICA E DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DIFUSIVO
DO PROCESSO DE SECAGEM DE FOLHAS DE *MALVA SYLVESTRIS* L.**

FRANCISCO BELTRÃO

2021

PAULA PRISCILA DE SOUZA MACHADO GUMZ

**MODELAGEM MATEMÁTICA E DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DIFUSIVO
DO PROCESSO DE SECAGEM DE FOLHAS DE *MALVA SYLVESTRIS* L.**

**Mathematical modeling and determination of the diffusion coefficient of the
drying process of *Malva sylvestris* L.**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação,
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Camila Nicola Boeri Di
Domenico

Coorientador: Prof. Dr. Douglas Junior Nicolin

FRANCISCO BELTRÃO

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

PAULA PRISCILA DE SOUZA MACHADO GUMZ

**MODELAGEM MATEMÁTICA E DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DIFUSIVO
DO PROCESSO DE SECAGEM DE FOLHAS DE *MALVA SYLVESTRIS* L.**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 06/dezembro/2021

Camila Nicola Boeri Di Domenico
Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Douglas Junior Nicolin
Doutorado em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

André Zuber
Doutorado em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

“A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”

FRANCISCO BELTRÃO

2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por estar ao meu lado todos os dias, me fortalecendo.

Agradeço a minha família, por estarem sempre me incentivando e motivando a nunca desistir. Especialmente aos meus pais por terem sido os maiores influenciadores nos estudos.

A minha orientora Camila Nicola Boeri Di Domenico pela orientação, paciência e ensinamentos. Devo muito por todos os ensinamentos durante a graduação e no presente trabalho. Espero ser orientada novamente por você.

Ao meu coorientador Douglas Junior Nicolin, por ter aceitado a coorientação deste trabalho, pela disponibilidade, contribuição e dedicação. Obrigada por ter contribuído de forma excepcional para a minha formação profissional.

Ao professor André Zuber, por ter aceitado o convite para ser banca do trabalho, adicionando sempre comentários que resultaram na melhoria do estudo e por ser um excelente professor.

A professora Irede Angela Lucini Dalmolin, por me auxiliar em todo o trabalho, tornando essa etapa do curso mais tranquila.

Ao meu namorado Guilherme Tuni, por estar comigo desde o início da jornada acadêmica, compartilhando conhecimentos, sempre com amor e carinho.

Aos demais amigos, colegas, professores e todas as pessoas que de uma maneira ou outra contribuíram na minha vida acadêmica.

RESUMO

Uma das operações a fim de aumentar a durabilidade e manter a qualidade de diferentes tipos de produtos é a secagem e essa técnica se faz ainda mais necessária quando se trata de plantas medicinais. Dentre as plantas terapêuticas, encontra-se a espécie *Malva sylvestris* L., popularmente conhecida como Malva. Nativa da Europa, norte da África e Ásia, a planta se destaca por seu uso em diferentes patologias, principalmente em inflamações. Devido à necessidade de informações sobre o processo de secagem nas folhas da planta, o presente trabalho objetivou avaliar a cinética de secagem nas folhas de Malva, bem como determinar seu coeficiente difusivo e ajustar sete modelos matemáticos aos valores experimentais de razão de umidade. As folhas foram submetidas à secagem sob condições controladas (30, 40, 50 e 60 °C) até que atingissem o teor de umidade de equilíbrio. Os ajustes dos modelos aos dados experimentais foram feitos pelo método de Levenberg Marquardt, com o auxílio do software SciDAVis versão 2.4.0. A escolha do modelo que melhor descreveu os dados experimentais da secagem se deu com a análise do coeficiente de determinação (R^2), erro médio relativo (P), erro médio estimado (SE) e com o teste de Qui-quadrado (X^2). Os resultados evidenciam que o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais de secagem das folhas de Malva padronizadas foi o de Wang & Singh. Observou-se que, com o incremento da temperatura do ar de secagem, o coeficiente de difusão efetivo aumentou, possibilitando uma taxa de secagem maior. Por meio do uso da equação de Arrhenius, foi possível avaliar a influência da temperatura no coeficiente de difusão efetivo e, a partir da regressão linear, foi obtida uma energia de ativação de 38,001 kJ mol⁻¹ para o processo de secagem de folhas de malva.

Palavras-chave: *Malva sylvestris*; coeficiente difusivo; modelagem matemática.

ABSTRACT

Drying is one of the ways to increase durability and preserve the quality of several types of products. This technique is particularly relevant regarding plants used for medicinal purposes. *Malva sylvestris* L., also known as mallow, is an example of such therapeutic plants originally native from Europe, Northern Africa, and Asia. Mallow is used in different pathologies, especially for the treatment of inflammations. Due to the lack of information on the process of drying the mallow leaves, the present work aims at evaluating the kinetics of mallow leaves drying. Its diffusion coefficient was determined and seven mathematical models were fitted to experimental data on the moisture ratio. The leaves were dried under controlled conditions (i.e. at 30, 40, 50, and 60 °C) until reaching the equilibrium moisture. The fit of models to experimental data were performed according to Levenberg Marquardt method with the software SciDAVis 2.4.0. The best fitted model was inferred via analysis of the explanation coefficient (R^2), mean relative error (P), standard error (SE), and Qui-square test (χ^2). The results show that Wang & Singh was the model that best fitted the experimental data of leaf drying. It was observed that, with the increases in the temperature of drying air, the effective diffusion coefficient increased, which allowed better drying. Using Arrhenius equation in a linear equation, it was possible to evaluate the influence of the temperature on the effective diffusion coefficient. The amount of 38 001 kJ mol⁻¹ was obtained as activation energy for the drying process of mallow.

Keywords: *Malva sylvestris*; diffusion coefficient; mathematical modelling.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelos matemáticos de secagem	28
Tabela 2 - Dados de umidade inicial e umidade de equilíbrio	31
Tabela 3 - Análises estatísticas para os seis modelos ajustados às curvas de secagem na temperatura de 30 °C de folhas de malva.....	32
Tabela 4 - Análises estatísticas para os seis modelos ajustados às curvas de secagem na temperatura de 40 °C de folhas de malva.....	33
Tabela 5 - Análises estatísticas para os seis modelos ajustados às curvas de secagem na temperatura de 50 °C de folhas de malva.....	33
Tabela 6 – Análises estatísticas para os seis modelos ajustados às curvas de secagem na temperatura de 60 °C de folhas de malva.....	34
Tabela 7 - Parâmetros do modelo de Wang & Singh, para diferentes temperaturas de secagem de folhas de malva padronizadas	37
Tabela 8 - Coeficiente de difusão efetivo e determinação (R^2) durante a secagem de folhas de malva, em diferentes temperaturas.....	37
Tabela 9 - Parâmetros do modelo de Exponencial de Dois Termos para diferentes temperaturas de malva.....	52
Tabela 10 - Parâmetros do modelo de Page, para diferentes temperaturas de secagem de folhas de malva.....	52
Tabela 11 - Parâmetros do modelo de Henderson e Pabis, para diferentes temperaturas de secagem de folhas de malva.....	52
Tabela 12 - Parâmetros do modelo de Dois Termos, para diferentes temperaturas de secagem de folhas de malva.....	53
Tabela 13 -Parâmetros do modelo de Silva et al., para diferentes temperaturas de secagem de folhas de malva.....	53

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Folhas de <i>Malva Sylvestris</i> L.	15
Figura 2- Flores de Malva	15
Figura 3 - Secagem por convecção com reciclo de ar	18
Figura 4 - Etapas do processo da modelagem matemática	21
Figura 5 - Folhas de malva padronizadas em placa de Petri	25
Figura 6 - Fluxograma com etapas da realização do experimento de secagem no estudo	26
Figura 7 - Razão do teor de umidade das folhas de Malva padronizada em função do tempo	31
Figura 8 - Valores de razão de umidade (RU) experimentais e correlacionados, pelo modelo de Wang e Singh, para o processo de secagem das folhas de malva	36
Figura 9 - Curvas de secagem experimentais e simuladas pelo modelo Difusivo para geometria placa plana nas temperaturas em estudo.....	38
Figura 10 - Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo em função da temperatura do ar de secagem, durante a secagem das folhas de malva	39
Figura 11- Modelos ajustados à cinética de secagem de 30 °C.....	50
Figura 12- Modelos ajustados à cinética de secagem de 40 °C.....	50
Figura 13- Modelos ajustados à cinética de secagem de 50 °C.....	51
Figura 14- Modelos ajustados à cinética de secagem de 60 °C.....	51

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS.....	13
2.1	Objetivos gerais	13
2.2	Objetivos específicos	13
3	REVISÃO DE LITERATURA	14
3.1	Malva (<i>Malva sylvestris</i> L.)	14
3.1.1	Características botânicas	14
3.1.2	Características nutricionais	15
3.1.3	Utilização	15
3.1.4	Outras informações sobre a <i>Malva sylvestris</i>	16
3.2	Processo de secagem.....	16
3.2.1	Tipos de secagem	17
3.2.2	Secagem convectiva	17
3.2.3	Variáveis do processo de secagem	18
3.2.4	Coeficiente de difusão efetivo.....	19
3.3	Modelagem matemática	20
3.3.1	Caracterização dos Modelos Matemáticos de secagem	21
3.3.2	Estado da arte dos modelos matemáticos para secagem de folhas...22	
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	24
4.1	Matéria-prima.....	24
4.2	Preparo da amostra	24
4.3	Experimentos de secagem	25
4.3.1	Determinação da umidade inicial.....	26
4.3.2	Determinação da umidade de equilíbrio	27
4.3.3	Adimensionalização do teor de umidade	27
4.4	Modelagem matemática.....	27
4.4.1	Validação dos modelos matemáticos.....	28
4.5	Coeficiente de difusão efetivo	29
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	41
	REFERÊNCIAS.....	42
	APÊNDICES	49
	APÊNDICE A – Modelos matemáticos ajustados à cinética de secagem.....	50
	A.1 Modelos ajustados à cinética de secagem de 30 °C.....	50

A.2 Modelos ajustados à cinética de secagem de 40 °C	50
A.3 Modelos ajustados à cinética de secagem de 50 °C	51
A.4 Modelos ajustados à cinética de secagem de 60 °C	51
APÊNDICE B – Constantes de secagem e coeficientes dos modelos matemáticos.	52
B.1 Parâmetros do modelo de Exponencial de Dois Termos para diferentes temperaturas de malva	52
B.2 Parâmetros do modelo de Page, para diferentes temperaturas de secagem de folhas de malva	52
B.3 Parâmetros do modelo de Henderson e Pabis, para diferentes temperaturas de secagem de folhas de malva	52
B.4 Parâmetros do modelo de Dois Termos, para diferentes temperaturas de secagem de folhas de malva	53
B.5 Parâmetros do modelo de Silva et al., para diferentes temperaturas de secagem de folhas de malva	53

1 INTRODUÇÃO

O uso popular de plantas medicinais e a fitoterapia fazem parte de umas das mais antigas práticas terapêuticas da humanidade. Na busca por uma melhoria na qualidade de vida e pela perspectiva econômica, a utilização de plantas medicinais e seus produtos fitoterápicos na saúde pública têm aumentado consideravelmente no Brasil (CHECHINEL, 2020).

Entre essas plantas terapêuticas, encontra-se a *Malva sylvestris* L. que é uma espécie da família Malvaceae conhecida popularmente por Malva, destaca-se pelo seu uso tradicional em diferentes patologias, principalmente em inflamações. Em geral, todas as partes da Malva são utilizadas, mas seus efeitos farmacológicos são atribuídos principalmente às folhas e flores, em razão da sua composição ser abundante em mucilagens e flavonoides. Além de possuir um elevado teor de mucilagens, também foram detectados nutrientes essenciais na espécie (FARINA *et al.*, 1995; GASPARETTO *et al.*, 2012).

Apesar da Malva ter a sua eficácia comprovada e ser uma planta reconhecida pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), verificou-se, em literatura consultada, que as informações sobre o processo de secagem são limitadas.

Nesse sentido, é fundamental um estudo para controlar as condições do processo de secagem, pois esta operação pode danificar o produto e os níveis de energia podem se tornar inviáveis (NICOLIN *et al.*, 2017).

O processo de secagem é uma operação que envolve a transferência de massa e de energia entre o produto e o ar de secagem. Essa técnica é utilizada para aumentar a durabilidade do produto, mantendo a sua estabilidade e qualidade, visto que diminui a atividade biológica e as mudanças físicas e químicas que ocorrem durante o armazenamento (CORRÊA, 2007). Existem diferentes maneiras de ocorrer este processo, dentre eles há a secagem convectiva.

Na secagem convectiva, o agente de secagem é o ar aquecido que entra em contato com o produto realizando a evaporação da umidade. Para que esse fenômeno ocorra é necessário que exista uma diferença da pressão parcial de vapor da superfície do produto com a pressão parcial de vapor do ar de secagem (BOERI, 2012).

O coeficiente de difusão (D_{ef}) indica a facilidade em que o soluto consegue se

deslocar no meio, englobando os efeitos de todos fenômenos que podem intervir sobre a migração da água e seu valor é sempre obtido através do ajuste de dados experimentais (REIS *et al.*, 2011). Este ajuste de dados pode ser feito por meio da modelagem matemática.

A modelagem matemática da secagem pode ser empregada em ambos os procedimentos descritos. Ela descreve principalmente como otimizar o processo, quantificando em relação a umidade e temperatura, possibilitando prever a taxa de secagem do produto, dimensionar secadores, melhorar as condições de secagem e avaliar a qualidade do processo (NASCIMENTO *et al.*, 2015).

Diversos autores realizaram estudos destes processos citados acima em diversas plantas, analisando a secagem em folhas e ajustando os dados a diferentes modelos matemáticos (GOLLNER-REIS, 2019; GONELI *et al.*, 2014; REIS *et al.*, 2012; MARTINS *et al.*, 2015).

Nesse contexto, o objetivo da presente pesquisa foi realizar a secagem e modelar matematicamente os dados experimentais do processo das folhas da *Malva sylvestris* nas temperaturas de 30, 40, 50 e 60 °C, como também estimar o coeficiente de difusividade efetiva (D_{ef}).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

Ajustar modelos matemáticos ao processo de secagem convectiva de folhas da *Malva sylvestris* L., para diferentes temperaturas e determinar o seu coeficiente de difusão efetivo.

2.2 Objetivos específicos

- Secar as folhas da Malva em laboratório, para obter os dados experimentais do processo de secagem;
- Modelar o processo de secagem das folhas da Malva, nas temperaturas estudadas, utilizando diferentes modelos matemáticos e estimando seus parâmetros;
- Comparar os dados experimentais aos simulados pelos modelos matemáticos;
- Analisar, estatisticamente, a comparação entre dados experimentais e simulados, a fim de identificar o modelo que obteve o melhor ajuste;
- Determinar o coeficiente de difusão efetivo das folhas da *Malva sylvestris* L.;

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Malva (*Malva sylvestris* L.)

Malva é o nome popular que se refere a espécie da família Malvaceae, a *Malva sylvestris*. Ela se destaca devido a suas propriedades terapêuticas, sendo indicada para diferentes tipos de inflamações. Em razão disso, suas propriedades antimicrobianas e anti-inflamatórias vêm sendo estudadas (GASPARETTO *et al.*, 2012).

Dentre várias plantas medicinais, a Malva tem o seu consumo descrito em 3000 a.C, quando arqueólogos encontraram vestígios em fósseis humanos que podem comprovar a existência de sementes da *Malva sylvestris* na arcada dentária. Os pesquisadores concluíram que ela é uma planta que vem sendo utilizada há muito tempo (GASPARETTO *et al.*, 2012; HENRY e PIPERNO, 2007).

A Malva é uma planta medicinal reconhecida pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), por meio da resolução RDC N° 10, de 09 de março de 2010.

3.1.1 Características botânicas

A *Malva sylvestris* é originária e amplamente distribuída na Europa, no Norte da África e Ásia, sendo uma espécie encontrada com frequência em terrenos abandonados, campos e caminhos (COSTA, 2002; LIM, 2014).

É uma planta ereta, pubescente, com sua raiz principal perpendicular, grossa, fusiforme, branca, carnuda e de raízes secundárias finas. O seu caule é ereto ou ascendente, de 60 a 90 cm de altura. Suas folhas são verdes, moles, com cinco a sete lóbulos pouco profundos (Figura 1). As flores têm uma corola de cinco pétalas livres, chanfradas, coradas de rosa-violáceo, raiadas de vermelho, (Figura 2) prefloração contorcida e estames numerosos. As folhas e flores são inodoras e possuem sabor mucilaginoso (COSTA, 2002).

A Malva é uma espécie nitrófila que se adapta a solos úmidos, bem drenados, com diferentes níveis de pH e é resistente ao sol (LIM, 2014).

3.1.2 Características nutricionais

As espécies da família Malvaceae são conhecidas por sua composição ser abundante em mucilagens, nas folhas da Malva o teor de mucilagens encontrado é de 6% a 7,2%, nas flores (3,8 a 7,3%) e nas raízes (7,5%). Essas mucilagens têm em sua constituição principalmente ácido D-galacturônico, D-galactose, xilose, L-arabinose e –ramnose, frutose, glicose, sacarose. Ao determinar seus componentes, também foram detectados na planta taninos, vitaminas A, B1, B2, C, flavonoides, antocianidinas, leucoantocianidinas e terpenóides, ácidos graxos (FARINA *et al.*, 1995; GASPARETTO *et al.*, 2012).

A composição de flavonoides na planta é 210,8; 46,6; 25,4 e 143,4 mg/g nas folhas, flores, frutos imaturos e caules, respectivamente (BARROS, 2010).

Figura 1- Folhas de *Malva Sylvestris*



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 2- Flores de Malva



Fonte: Gasparetto *et al.* (2012)

3.1.3 Utilização

Todas as partes da *Malva sylvestris* têm sido utilizadas para fins terapêuticos. Entretanto, as mais amplamente aplicadas para o consumo oral e uso externo são as folhas, flores e frutos (RUPPELT *et al.*, 2015; BALLERO *et al.*, 2001). A literatura

exemplifica alguns usos tradicionais da espécie, principalmente contra gengivite e dor dentária (GASPARETTO *et al.*, 2012).

Além disso, a planta se mostrou eficaz ao tratar distúrbios específicos de várias partes do corpo, como o sistema digestivo, o respiratório, o sistema muscular, doenças dermatológicas, dores menstruais, distúrbios urológicos, distúrbios vaginais e doenças bucais (GASPARETTO *et al.*, 2012; BARROS *et al.*, 2010).

Gasparetto *et al.* (2012) relataram que com os estudos avançados da Malva, o papel da planta na forma farmacêutica começou a ser reivindicado, gerando então patentes como antisséptico bucal, alopecia e outros distúrbios capilares, antiinflamatório, antioxidante, inseticida, integridade da pele, clareamento de pele e fator de crescimento.

3.1.4 Outras informações sobre a *Malva sylvestris*

Prudente (2010) avaliou a aplicação da Malva em modelos inflamatórios de pele e comprovou sua eficácia em camundongos, através do extrato da planta. Além disso, o autor sugeriu um estudo mais abrangente da espécie, utilizando outras metodologias a fim de verificar sua segurança para o uso clínico.

Posteriormente, a *Malva sylvestris* não apresentou malefícios à saúde, pois em estudos a planta não indicou causar riscos microbiológicos. (ECKER *et al.*, 2016). Entretanto, algumas propriedades da Malva são laxantes, por este motivo quando ingerida em excesso, a espécie é considerada laxativa e pode causar náuseas (RUPPELT *et al.*, 2015).

3.2 Processo de secagem

Aumentar a durabilidade de diferentes produtos têm sido uma técnica que a humanidade vem aprimorando ao longo dos anos. Entre essas técnicas, destaca-se o processo de secagem.

O processo de secagem é definido como uma operação unitária, que consiste na transferência de massa e energia. A execução envolve a retirada de líquido de um determinado sólido através da vaporização térmica a uma temperatura inferior à

temperatura de ebulição do líquido. Essa operação é governada pela difusão líquida, difusão de vapor e fluxo de líquido e de vapor (MATOS, 2015).

A secagem contribui para evitar a deterioração do produto, diminuindo a atividade da água que está associada à quantidade de água livre, a qual mensura a disponibilidade para participar de reações, favorecendo o crescimento de microrganismos (MATOS, 2015; TADINI *et al.*, 2016).

A técnica de secagem pode ser aplicada a folhas de plantas com o objetivo de aumentar sua estabilidade. Alibas (2007) ressalta que a secagem de folhas tem se mostrado eficaz, pois além de estender o período de uso da planta, seus valores nutricionais podem ser mantidos dependendo da temperatura em que ela foi exposta.

3.2.1 Tipos de secagem

A operação de secagem pode ser classificada de várias maneiras, sendo dependente do método de operação, da natureza da substância a ser desidratada e ainda do modo de transferência de calor (TADINI *et al.*, 2016).

Os sistemas de secagem são divididos em duas categorias, como natural e artificial. A natural é aquela que consiste somente na utilização da radiação solar e do vento para a remoção da umidade e artificial a que implica o uso de secadores (PORTELLA e EICHELBERGER, 2001).

Além disso, de acordo com Matos (2015), os métodos para essa operação podem ser classificados como secagem por convecção, por condução, radiação e ainda por liofilização. Dessa forma, o processo se divide em três grandes grupos: secagem por contato com o ar à pressão atmosférica, secagem a vácuo e secagem por congelamento.

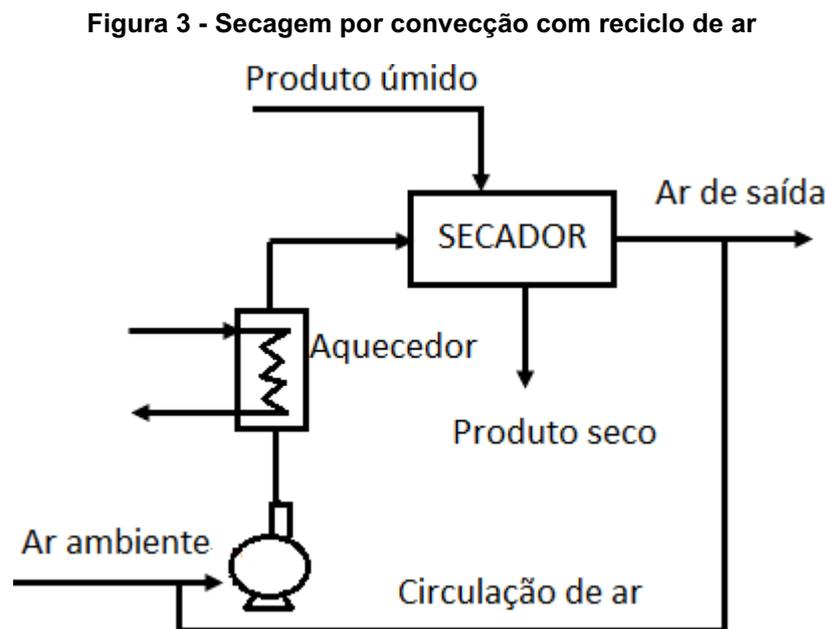
Em geral, o método de secagem por convecção é muito utilizado para a secagem dos alimentos e produtos de origem vegetal.

3.2.2 Secagem convectiva

O método de secagem convectiva é caracterizado pelo calor sendo transferido para o produto através da convecção, ocorrendo o contato do ar quente com o

produto. Este ar aquecido passa sobre ou através do produto, evaporando a umidade e transferindo para fora do secador o vapor de água formado neste processo (PARK *et al.*, 2007). Para ocorrer esse fenômeno é fundamental que a pressão parcial de vapor de água na superfície do produto seja maior que a pressão parcial de vapor do ar (BOERI, 2012). Do ponto de vista termodinâmico, esta diferença de pressão parcial é conhecida como uma diferença de potencial químico. Sabe-se também, que a secagem ocorre em um condição longe do equilíbrio líquido-vapor. Assim, o potencial químico na fase líquida deve ser maior que o potencial químico na fase vapor. Nessa diferença, há uma transferência de massa da fase com maior potencial para a menor, favorecendo o processo de secagem.

Visando a economia de energia e o aumento da eficiência térmica, pode-se reciclar o ar de saída (Figura 3), inserindo-o no início do processo para que ele participe da técnica novamente (PARK *et al.*, 2007).



Fonte: Adaptado de Park *et al.* (2007)

3.2.3 Variáveis do processo de secagem

Para otimizar o processo de secagem, é necessário simplificar e reduzir as dificuldades dos modelos matemáticos dessa operação avaliando as principais variáveis que o controlam (NICOLIN *et al.*, 2017). Em seu estudo, Boeri (2012) destaca

as principais variáveis que regem esse processo, citando a temperatura, velocidade do ar e umidade relativa.

Quando o ar de um ambiente está com a quantidade máxima que pode haver de umidade, diz-se que ele está saturado. Nesse caso, os vapores realizam uma pressão conhecida como pressão de vapor saturado (P_{VS}). Entretanto, se o volume de ar contido no ambiente não é considerado máximo, têm-se que o ar está insaturado e os vapores exercem uma pressão parcial de vapor (P_v) (CELESTINO, 2010).

A umidade relativa (UR) do ar pode ser determinada pela Equação (1), relacionando essas duas pressões, representando a razão entre a quantidade do vapor de água no ar, ao que ele estaria se estivesse saturado naquela temperatura (DELGADO, 2007).

$$UR = \frac{P_v}{P_{VS}} \cdot 100 \quad (1)$$

A temperatura influencia diretamente no tempo de secagem. Quanto maior a temperatura, menor será a umidade relativa do ar de secagem e o tempo que ocorre a difusão do interior do produto para a superfície será reduzido (BOERI, 2012). Diversos autores estudaram a influência da temperatura na secagem (ROCHA *et al.*, 2012; VASCONCELOS *et al.*, 2005; TONON *et al.*, 2009; MAZZUCO *et al.*, 2002).

Uma considerável influência da velocidade do ar no processo de secagem é verificada na transferência do calor à superfície do produto, e na transferência da massa de vapor da água da superfície para o meio secante (SEVERO, 1989). Observou-se em diferentes estudos que quanto maior a velocidade do ar empregada no processo, mais rapidamente ocorreu a operação de secagem.

3.2.4 Coeficiente de difusão efetivo

A transferência de massa é um fenômeno de transporte originado devido à diferença de concentração de uma espécie química em uma mistura, essa massa em trânsito ocorre da maior concentração para a menor. A difusão acontece de diferentes maneiras nas espécies, sendo dependente da temperatura, pressão e da composição do sistema (WELTY, 2017; BERMAN, 2019).

A constante de proporcionalidade na lei de Fick é denominada coeficiente de

difusão que indica a mobilidade do soluto no meio. Pode-se dizer que devido a movimentação das moléculas a transferência ocorre mais facilmente nos gases do que em líquidos e nos líquidos do que em sólidos, conseqüentemente os coeficientes em sólidos serão os menores, com os valores entre 10^{-14} e 10^{-10} m²/s (WELTY, 2017).

Existem diversas formas para calcular este coeficiente apresentadas da literatura. Cremasco (2016) demonstrou as equações mais aplicadas empiricamente, na qual a primeira lei de Fick descreve uma difusão em estado estacionário conforme Equação (2).

$$J_{A,z} = -D_{ef} \cdot \frac{dC_A}{dz} \quad (2)$$

Em que: $J_{A,z}$ representa o fluxo difusivo da espécie química A na direção z; D_{ef} é o coeficiente de difusão e C_A a concentração molar da espécie química A.

O autor complementa exibindo a segunda lei de Fick, que consiste em uma Equação (3) para uma difusão em estado transiente, visto que o perfil de concentração muda com o tempo (CREMASCO, 2016).

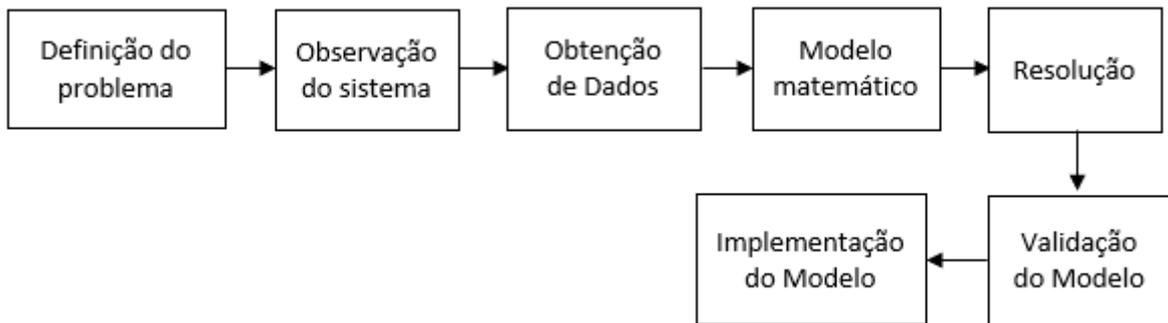
$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{ef} \cdot \nabla^2 \cdot C_A \quad (3)$$

3.3 Modelagem matemática

Pode-se compreender a modelagem matemática como um processo que consiste em descrever ou quantificar, a partir de modelos matemáticos, problemas do nosso cotidiano, transformando-os em problemas numéricos, interpretando-os e por fim os resolvendo, proporcionando uma facilidade maior de entendimento (BASSANEZI, 2002; CORRÊA *et al.*, 2007).

Para aplicar essa técnica, Moretti (2010) exemplifica (Figura 4) as etapas do processo:

Figura 4 - Etapas do processo da modelagem matemática



Fonte: Adaptado de Moretti (2010); Sperandio et al. (2014, apud GOLLNER-REIS, 2019)

Após a definição do problema, deve-se observar o sistema real (analisando os parâmetros do processo juntamente com as variáveis dependentes e independentes), coletar dados de forma precisa, ajustar os dados ao modelo matemático, resolvê-lo, analisando-o estatisticamente para validá-lo, ocorrendo então a implementação do modelo.

3.3.1 Caracterização dos Modelos Matemáticos de secagem

A modelagem matemática da secagem além de envolver a transferência de massa e calor, considera o formato do produto e o tipo de secagem. O estudo desses modelos é imprescindível para prever a taxa de secagem do produto, dimensionar secadores, melhorar as condições de secagem e avaliar a qualidade do processo (NASCIMENTO *et al.*, 2015). Segundo Albuquerque (2013), modelo determinístico é um modelo matemático que, a partir de um conjunto de condições iniciais, determina um conjunto de saída. Estes modelos podem ser empíricos, semi-empíricos e fenomenológicos.

Os modelos empíricos baseiam-se nos ajustes estatísticos de dados obtidos através de experimentação. Estes modelos assumem a umidade e temperatura constantes para todo o produto em diferentes temperaturas, não considerando os processos que acontecem na secagem (resistência interna à transferência de massa e calor). Deste modo, não podem dar uma percepção clara dos processos que ocorrem durante a secagem (BOERI, 2012; ALBUQUERQUE, 2013).

De acordo com Brooker *et al.* (1992), um modelo é considerado semi-empírico

quando existe a combinação da teoria com a aplicação. De modo geral, esses modelos são baseados na lei de Newton do resfriamento aplicada à transferência de massa, considerando que as condições do sistema sejam isotérmicas e que a resistência à transferência de umidade aconteça apenas entre a superfície do produto e o ar. Em vista disso, esse método não reflete toda complexidade do fenômeno (*apud* BOERI, 2012).

Os modelos fenomenológicos são modelos mais complexos e representam o processo físico de forma mais consistente. Baseiam-se na lei da conservação da massa, de energia, movimento e em equações já conhecidas como a segunda lei de Fick (Equação 3) descrevendo a difusão em estado não-estacionário (SILVA, 2013). Entretanto, sua utilização requer o conhecimento de algumas propriedades termofísicas dos produtos, juntamente com a sua dependência em função da temperatura e do teor de umidade contido neles. O que diversas vezes dificulta a utilização destes modelos (PARK *et al.*, 2007).

3.3.2 Estado da arte sobre modelos matemáticos para secagem de folhas

Reis *et al.* (2012) avaliaram a cinética de secagem de folhas de manjeriço nas temperaturas 50, 60, 70 e 80°C e com os dados experimentais ajustaram o processo a oito modelos matemáticos. Do estudo concluiu-se que o modelo proposto por Midilli foi o que melhor se ajustou e o coeficiente de difusão variou entre $9,10 \times 10^{-12}$ a $2,92 \times 10^{-11}$ m²/s.

Goneli *et al.* (2014) realizaram uma modelagem matemática do processo de secagem das folhas da aroeira para determinar o seu coeficiente de difusão efetivo. Os autores modelaram o processo com seis modelos matemáticos, entretanto, pôde-se concluir que os modelos de Henderson & Pabis modificado e Midilli foram os que obtiveram o melhor ajuste. As folhas foram submetidas às temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C e os coeficientes difusivos encontrados foram $0,1476 \times 10^{-11}$, $0,3265 \times 10^{-11}$, $1,1429 \times 10^{-11}$ e $1,5811 \times 10^{-11}$, respectivamente.

Martins *et al.* (2015) estudaram o processo de secagem de folhas de timbó, ajustando os dados coletados a dez modelos matemáticos. As temperaturas utilizadas foram 40, 50, 60 e 70 °C. Com base nos resultados o modelo que melhor representa o ajuste é o de Midilli com os coeficientes difusivos entre $0,6630 \times 10^{-11}$ a $12,0712 \times 10^{-11}$

¹¹ m²/s.

Gollner-Reis (2019) propôs um estudo da planta *Ora-pro-nobis*, modelando o processo de secagem convectiva e as isothermas de dessecção das suas folhas em umidades relativas variando entre 29 e 83%, e temperaturas entre 40 e 60°C. Os dados experimentais foram analisados e ajustados a diferentes modelos de dessecção. O modelo de Peleg obteve a melhor concordância aos resultados para as isothermas de dessecção. Posteriormente, para determinar a cinética de secagem, o autor ajustou os dados experimentais a diferentes modelos empíricos e semi-teóricos, obtendo as melhores previsões com o modelo de Dois-Termos.

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os ensaios de secagem da folhas da *Malva* foram conduzidos no Laboratório de Pesquisa vinculado à Diretoria de Pesquisa e Pós-graduação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – *campus* Francisco Beltrão/PR.

4.1 Matéria-prima

Para a obtenção de folhas da *Malva sylvestris* foram coletadas manualmente amostras com diâmetro entre 8 e 12 cm, de uma planta localizada em uma propriedade rural da cidade de Francisco Beltrão-PR nas primeiras horas da manhã. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos hermeticamente fechados e imediatamente levadas para o laboratório para realizar o processo de secagem convectiva.

4.2 Preparo da amostra

As amostras foram preparadas de acordo com o método que Gollner-Reis (2019) utilizou em folhas de *Ora-pro-nobis*. Foram selecionadas folhas que não apresentassem partes danificadas. Após a seleção das folhas, elas foram higienizadas iniciando-se pela lavagem em água destilada, na sequência as folhas foram imersas em solução de hipoclorito de sódio ($250 \frac{\mu L}{L}$) por aproximadamente 10 minutos. Posteriormente, as amostras foram enxaguadas com água destilada e por fim secas com papel toalha.

Em seguida, foram retirados os pecíolos e as folhas foram padronizadas em tamanho uniforme de comprimento e largura (3,5 cm x 1,5 cm) com auxílio de uma tesoura e régua. Após serem padronizadas, as amostras foram separadas em três porções de aproximadamente 15 g e colocadas cada uma em placas de Petri com massas previamente aferidas (Figura 5).

Figura 5 - Folhas de malva padronizadas em placa de Petri



Fonte: Autoria própria (2021)

4.3 Experimentos de secagem

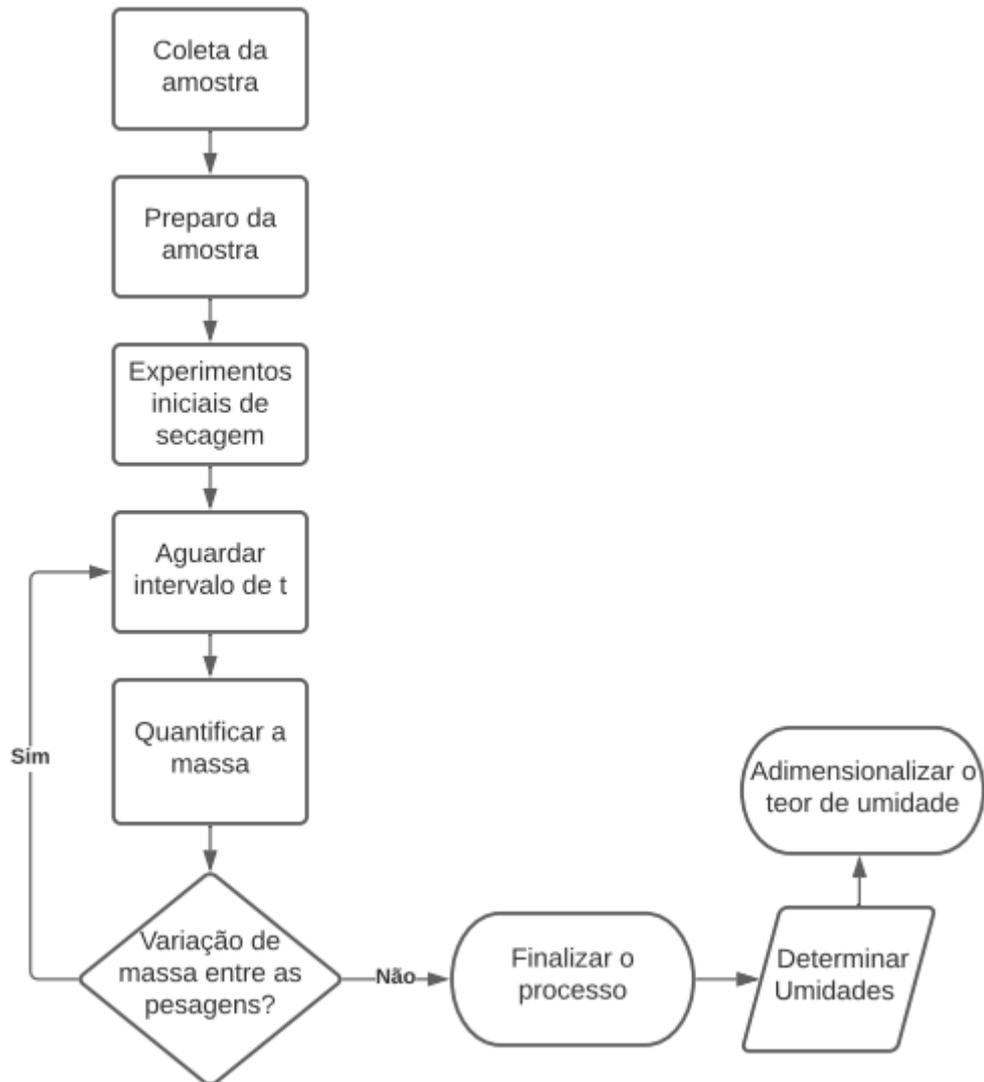
As etapas para a realização do experimento de secagem podem ser vistas em forma de fluxograma na Figura 6.

Os principais equipamentos utilizados para determinação das umidades foram uma estufa de secagem e esterilização, com circulação natural de ar, da marca SOLAB, modelo SL-100, com controle de temperatura por microprocessador digital e sensor de temperatura PT 100, e uma balança semi analítica.

Este procedimento foi feito em triplicata para Umidade inicial (U_0) e em quatro diferentes temperaturas de secagem: 30, 40, 50 e 60 °C.

Após o preparo das amostras como descrito no item 4.2, a massa de cada conjunto de amostra preparada (amostra e placa de Petri), foi aferida a fim de se obter a massa inicial das folhas (m_0), sendo esta a diferença entre a massa do conjunto e a massa da placa de Petri.

Figura 6 - Fluxograma com etapas da realização do experimento de secagem no estudo



Fonte: Autoria própria (2021)

4.3.1 Determinação da umidade inicial

Após a determinação da massa inicial das folhas, o conjunto foi colocado em estufa por 24 horas a uma temperatura de 105 °C para a determinação da umidade inicial. No dia seguinte, as amostras e placas de Petri foram colocadas no dessecador para resfriamento e logo após submetidas a três medidas de massa consecutivas, obtendo-se a massa final da análise (m_f) (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 2008).

De acordo com as técnicas descritas por Celestino (2010), a umidade inicial e a umidade de equilíbrio (U_e) podem ser expressas pela equação (4) de teor de

umidade em porcentagem (% U) e em base úmida (b.u.):

$$\%U = \frac{m_0 - m_f}{m_0} \cdot 100 \quad (4)$$

4.3.2 Determinação da umidade de equilíbrio

O método gravimétrico utilizado para determinar a umidade de equilíbrio nas folhas da Malva foi similar ao procedimento citado acima, modificando apenas a temperatura em que as amostras estavam expostas, sendo elas 30, 40, 50 e 60 °C. O conjunto teve sua massa medida em intervalos de tempo para acompanhar a redução de umidade da folha, retornando para a estufa até que a massa do conjunto apresentasse massa constante durante três pesagens consecutivas. Definindo a massa final do experimento (m_f).

4.3.3 Adimensionalização do teor de umidade

Após o processo de secagem, para a modelagem das curvas de secagem das folhas da Malva foi determinada a razão de teor de água adimensional (RU), conforme equação 5:

$$RU = \frac{U_i - U_e}{U_0 - U_e} \quad (5)$$

Sendo: U_i o teor instantâneo de água no produto em b.u.

4.4 Modelagem matemática

Para fins de modelagem matemática, analisando que o teor de umidade (b.u.) recomendado para armazenagem segura de plantas medicinais é entre 8-14%, considerou-se para os ajustes matemáticos que o final da secagem seria quando as folhas de Malva estivessem com aproximadamente 11% b.u. (BRASIL, 2010).

A modelagem matemática foi realizada com o auxílio do software SciDAVis

versão 2.4.0 e empregada com diferentes modelos, que frequentemente são utilizados por autores em estudos com plantas, apresentados na Tabela 1, onde: t representa o tempo de secagem; k , k_0 , k_1 constantes de secagem e a , b , n são coeficientes dos modelos.

Tabela 1 - Modelos matemáticos de secagem

Modelo	Equação
Page	$RU = \exp(-k \cdot t^n)$
Wang & Singh	$RU = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$
Exponencial de Dois Termos	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 + a) \cdot \exp(-k \cdot a \cdot t)$
Henderson e Pabis	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t)$
Dois Termos	$RU = a \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$
Silva et al.	$RU = \exp(-a \cdot t - b \cdot \sqrt{t})$

Fonte: Adaptado de Soares (2019); Madamba *et al.* (1996)

4.4.1 Validação dos modelos matemáticos

A análise do grau de ajuste dos modelos foi verificada considerando as magnitudes do coeficiente de determinação (R^2), do erro médio relativo (P), erro médio estimado (SE) e o teste de Qui-quadrado (X^2). Os valores do erro médio relativo, estimado e o teste de Qui-quadrado foram calculados conforme equações 6, 7 e 8 respectivamente:

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (6)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (7)$$

$$X^2 = \sum \frac{(Y - \hat{Y})^2}{GLR} \quad (8)$$

Em que: n é o número de observações experimentais; Y o valor experimental;

\hat{Y} o valor estimado pelo modelo; e GLR: graus de liberdade do modelo.

4.5 Coeficiente de difusão efetivo

O coeficiente de difusão efetivo foi obtido por meio do ajuste ao modelo matemático de difusão líquida, descritos pela Equação 9, aos dados experimentais da secagem das folhas da *Malva sylvestris*. Essa equação representa uma solução analítica para a segunda lei de Fick (equação 3), assumindo a forma geométrica de uma placa plana, com aproximação de oito termos (BROKER *et al.*, 1992; CRANK, 1975).

$$RU = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^8 \frac{1}{(16 + 1)^2} \exp \left[- \frac{(16 + 1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{ef} \cdot t}{4} \cdot \left(\frac{S}{V} \right)^2 \right] \quad (9)$$

Em que: n é o número de termos; t o tempo em h; S é área da superfície do produto em m^2 e V é o volume do produto em m^3 .

O volume (V) foi calculado através da Equação 10, que relaciona a espessura (e) das folhas da Malva com a área da superfície (S). Foram realizadas 5 medições de partes diferentes da planta com o auxílio de um paquímetro digital, em que a média dessas espessuras foi utilizada na Equação 10.

$$V = S \cdot e \quad (10)$$

A influência da temperatura no coeficiente difusivo foi analisada com a equação de Arrhenius, descrita na Equação 11.

$$D_{ef} = D_o \exp \left(\frac{-E_a}{R \cdot T_a} \right) \quad (11)$$

Em que: D_o é o fator pré-exponencial; E_a é a energia de ativação (kJ mol^{-1}); R é a constante universal dos gases ($8,314 \text{ kJ kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$); e T_a é a temperatura absoluta (K).

A Equação 11 foi linearizada com a aplicação do logaritmo, para a partir da

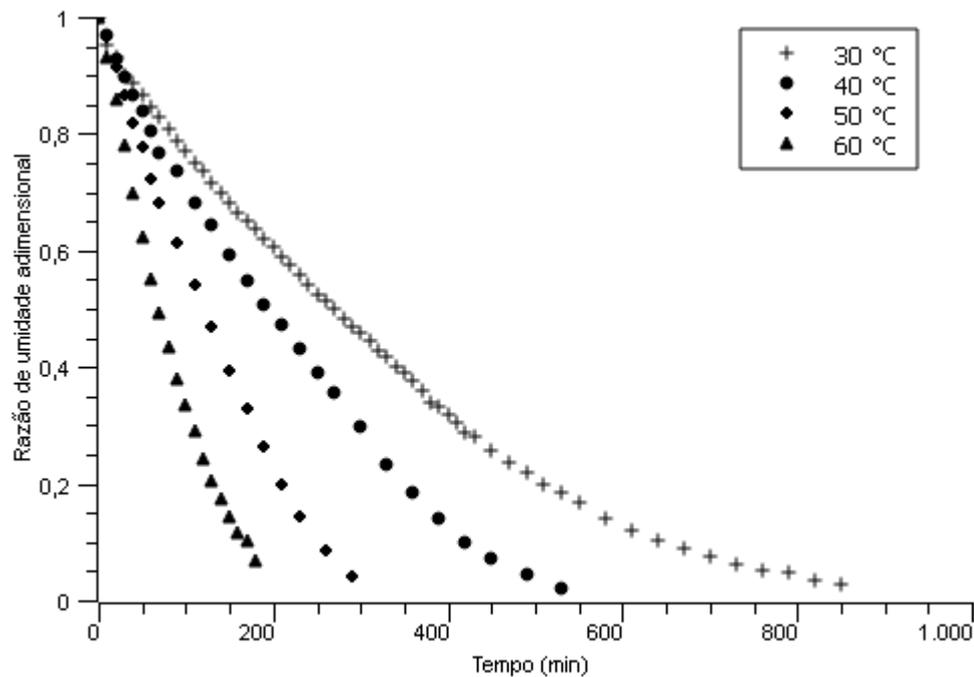
regressão linear encontrar a energia de ativação e o fator pré-exponencial (Equação 12).

$$\ln D_{ef} = \ln D_o - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T_a} \quad (12)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nota-se através dos dados (Figura 7), que ao incrementar a temperatura em que a planta é exposta, a taxa de secagem aumenta o que, conseqüentemente, resulta em menor tempo de secagem, fenômeno também observado por autores em estudos com outras espécies de plantas medicinais (GONELI *et al.*, 2014; MARTINAZZO *et al.*, 2010; REIS *et al.*, 2012).

Figura 7 - Razão do teor de umidade das folhas de Malva padronizada em função do tempo



Fonte: Autoria própria (2021)

Além disso, a cinética de secagem permitiu avaliar que para que as folhas de malva atingissem o teor de umidade de aproximadamente, 11% b.u., foram necessários 850, 530, 290, e 180 min, para as temperaturas 30, 40, 50 e 60 °C.

Tabela 2 - Dados de umidade inicial e umidade de equilíbrio

Temperatura (°C)	Umidade inicial (b.u.)	Umidade de equilíbrio (b.u.)
30	75,639	10,492
40	76,831	8,586
50	76,075	7,123
60	75,606	6,821

Fonte: Autoria própria (2021)

A Tabela 2 apresenta os dados de umidade inicial de umidade de equilíbrio para as folhas de Malva em suas respectivas temperaturas. Sendo que ambas umidades foram calculadas com a média das triplicatas do experimento.

O tempo necessário para as folhas de Malva atingirem o peso constante (equilíbrio higroscópico) foi de 920, 580, 380 e 300 minutos, respectivamente para as temperaturas 30, 40, 50 e 60 °C.

Sabe-se que a temperatura certamente influencia nas mudanças físicas e químicas do produto exposto. Em relação a estas propriedades da malva, no decorrer do processo de secagem percebeu-se encolhimento, enrugamento e uma perda de cor gradativamente conforme o aumento da temperatura e o tempo da planta padronizada na estufa.

As análises estatísticas ocorreram de acordo com as equações 6, 7 e 8 como descrito anteriormente. Nas tabelas 3 a 6 são apresentados os valores do erro médio estimado ou desvio padrão da estimativa (SE, decimal), erro médio relativo (P, porcentagem), coeficiente de determinação (R^2 , decimal) e o Qui-quadrado (X^2 , decimal) para os seis modelos matemáticos ajustados aos dados de secagem das folhas de malva para todas temperaturas estudadas.

Tabela 3 - Análises estatísticas para os seis modelos ajustados às curvas de secagem na temperatura de 30 °C de folhas de malva

Modelos	SE (decimal)	P (%)	R^2 (decimal)	X^2
30 °C				
Page	0,0222	9,3407	0,9933	0,0302
Wang & Singh	0,0123	1,7991	0,9979	0,0091
Exponencial de Dois Termos	0,0338	20,0778	0,9847	0,0686
Henderson e Pabis	0,0330	17,0209	0,9853	0,0662
Dois Termos	0,0313	16,6896	0,9855	0,0656
Silva et al.	0,0288	14,0076	0,9888	0,0506

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 4 - Análises estatísticas para os seis modelos ajustados às curvas de secagem na temperatura de 40 °C de folhas de malva

Modelos	SE (decimal)	P (%)	R ² (decimal)	X ²
40 °C				
Page	0,0318	22,2296	0,9902	0,0243
Wang & Singh	0,0129	4,7740	0,9984	0,0039
Exponencial de Dois Termos	0,0477	38,8404	0,9781	0,0546
Henderson e Pabis	0,0464	37,5480	0,9793	0,0516
Dois Termos	0,0452	36,0023	0,9798	0,0489
Silva et al.	0,0407	32,0373	0,9840	0,0398

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 5 - Análises estatísticas para os seis modelos ajustados às curvas de secagem na temperatura de 50 °C de folhas de malva

Modelos	SE (decimal)	P (%)	R ² (decimal)	X ²
50 °C				
Page	0,0254	12,5210	0,9940	0,0101
Wang & Singh	0,0095	3,8884	0,9992	0,0012
Exponencial de Dois Termos	0,0533	27,4805	0,9735	0,0452
Henderson e Pabis	0,0490	25,3784	0,9775	0,0382
Dois Termos	0,0452	24,2376	0,9789	0,0367
Silva et al.	0,0374	19,2543	0,9870	0,0222

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 6 – Análises estatísticas para os seis modelos ajustados às curvas de secagem na temperatura de 60 °C de folhas de malva

Modelos	SE (decimal)	P (%)	R ² (decimal)	X ²
60 °C				
Page	0,0086	3,5512	0,9992	0,0012
Wang & Singh	0,0092	1,8743	0,9991	0,0014
Exponencial de Dois Termos	0,0395	15,7179	0,9835	0,0264
Henderson e Pabis	0,0344	13,7235	0,9875	0,0201
Dois Termos	0,0332	12,5853	0,9882	0,0183
Silva et al.	0,0190	8,0049	0,9962	0,0062

Fonte: Autoria própria (2021)

Os ajustes dos seis modelos matemáticos aos dados obtidos de secagem de folhas de malva para cada temperatura em estudo podem ser vistos no Apêndice A.

Observou-se que, os modelos matemáticos se ajustaram em todas temperaturas com coeficiente de determinação (R²) superior a 95%, fato que segundo Kashaninejad *et al.* (2007) indica uma excelente representação desses modelos para o processo de secagem estudado. Entretanto, o uso do coeficiente de determinação como único critério para análise do grau de ajuste dos modelos matemáticos não lineares não é um bom parâmetro para a seleção de modelos para representar o processo de secagem, tornando-se necessária a análise de outros parâmetros estatísticos (MADAMBA *et al.*, 1996).

Analisando o comportamento matemático do ajuste dos modelos com relação ao erro estimado (SE), verifica-se que o modelo de Wang & Singh apresentou o menor valor, para as temperaturas 30, 40 e 50 °C e o modelo de Page, representou melhor os dados da secagem de folhas de malva na temperatura de 60°C. De acordo com a literatura, um processo físico é inversamente proporcional ao valor do desvio padrão da estimativa, sendo então, quanto menor o valor do SE melhor o ajuste do modelo aos dados observados (SOUSA *et al.*, 2011; DRAPER E SMITH, 1998).

O parâmetro estatístico denominado erro médio relativo (P) representa a proximidade dos valores observados com os estimados pelo modelo. Conforme

descrito por Mohapatra e Rao (2005), para que o modelo seja considerado adequado aos dados experimentais, ele deve apresentar os menores valores percentuais ou valores próximos de 10%. Nota-se que apenas o modelo Wang & Singh apresentou valores do erro médio relativo abaixo dos 10%, para todas as temperaturas. Enquanto, que o modelo de Silva *et al.* apresentou um erro médio relativo de 8,0049 para os dados da temperatura de 60°C e o modelo de Page apresentou 9,3407, 12,5210 e 3,5512, respectivamente para as temperaturas 30, 50 e 60 °C.

Com relação ao coeficiente de determinação (R^2), verifica-se nas tabelas de 3 a 6 que todos os modelos obtiveram valores relativamente bons. Observa-se também, que o modelo de Wang & Singh foi o que melhor se ajustou nas temperaturas de 30, 40 e 50 °C, apresentando os valores mais próximos de 1, 0,9979; 0,9984; 0,9992, respectivamente. No entanto, o modelo que apresentou o melhor ajuste com base neste parâmetro na temperatura de 60 °C foi o de Page, com R^2 de 0,9992. Além disso, o modelo que obteve o pior ajuste em todas temperaturas estudadas foi o de Exponencial de Dois Termos.

De acordo com Gunhan *et al.* (2005), os modelos que apresentam os menores valores do teste Qui-quadrado (X^2) são os que melhor se ajustam aos dados experimentais. Ao analisar as tabelas 3, 4 e 5 observa-se que o modelo de Wang & Singh representou melhor os dados nas temperaturas de 30, 40, e 50 °C, com exceção do modelo de Page que, ao se verificar a tabela 6, pode-se perceber que ele representa melhor aos dados obtidos na temperatura de 60 °C.

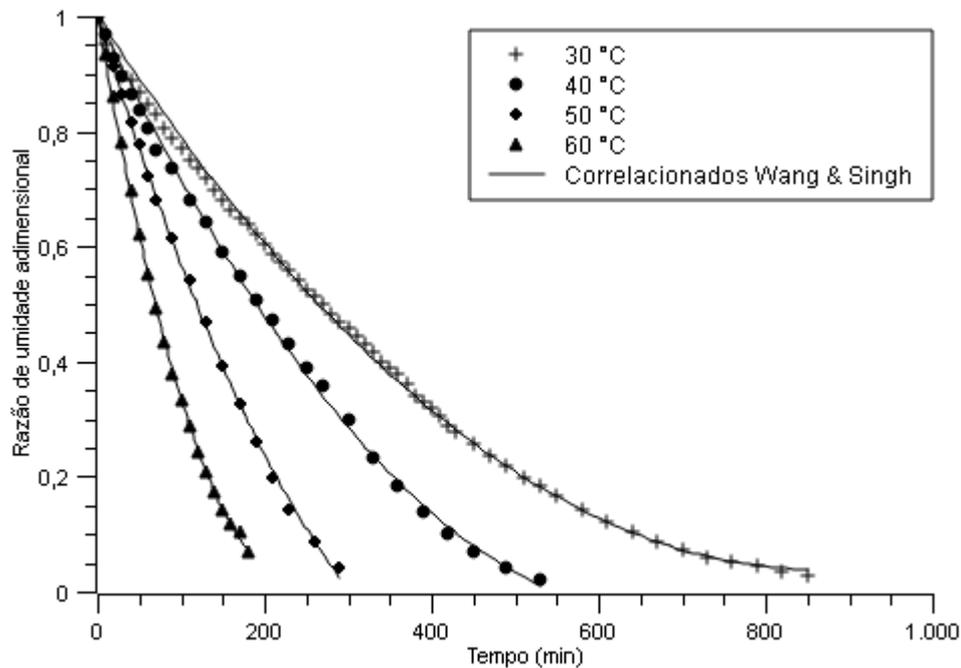
Dentre os parâmetros estatísticos utilizados no ajuste de modelos em dados observados na secagem de folhas de malva padronizadas, pôde-se analisar que os modelos de Wang & Singh e Page apresentaram o melhor ajuste para todas as temperaturas do ar de secagem estudadas neste trabalho, sendo ambos indicados para representar a cinética de secagem de folhas de malva. Entretanto, ao avaliar todos os parâmetros estatísticos analisados entre os modelos, nota-se que o modelo de Wang e Singh é o mais adequado para representar o processo de secagem de folhas da planta, sendo então, o modelo selecionado para estimar o processo de secagem deste produto.

Na literatura encontra-se diversos outros estudos que encontraram o modelo de Wang & Singh como melhor ajuste aos dados experimentais, sendo recomendado para a cinética de grãos de soja (PEREIRA *et al.*, 2018), de bagaço de malte (SOUSA

et al., 2016), de grãos de urucum (NETO *et al.*, 2018) e resíduos de jaca (SOUSA *et al.*, 2021).

O modelo de Wang & Singh é um modelo empírico que, como descrito anteriormente, não representa o processo de maneira física e sim em relações empíricas entre as variáveis (BOERI, 2012).

Figura 8 - Valores de razão de umidade (RU) experimentais e correlacionados, pelo modelo de Wang e Singh, para o processo de secagem das folhas de malva



Fonte: Autoria própria (2021)

As curvas de secagem das folhas de Malva estimadas pelo modelo de Wang & Singh estão apresentadas na Figura 8, é possível observar a proximidade entre valores observados e os estimados por este modelo, reforçando que Wang e Singh representa os dados de secagem de folhas de Malva de maneira satisfatória no intervalo de temperatura estudado.

Com relação aos coeficientes do modelo de Wang & Singh (Tabela 7), ajustados aos dados observados da cinética de secagem das folhas de Malva, para as diferentes temperaturas, observou-se que os parâmetros "a" e "b" do modelo de Wang & Singh apresentaram variação da magnitude de seus valores em função da temperatura do ar de secagem.

As constantes de secagem e os coeficientes dos demais modelos em estudo podem ser vistas no Apêndice B.

Tabela 7 - Parâmetros do modelo de Wang & Singh, para diferentes temperaturas de secagem de folhas de malva padronizadas

Temperatura (°C)	a (min ⁻¹)	b (min ⁻²)
30	-0,0022	1,3005 x 10 ⁻⁶
40	-0,0030	2,2365 x 10 ⁻⁶
50	-0,0048	4,9906 x 10 ⁻⁶
60	-0,0084	1,8489 x 10 ⁻⁵

Fonte: Autoria própria (2021)

A determinação do coeficiente difusivo e da energia de ativação foi realizada conforme descrito no item 4.5. Os valores obtidos nesta etapa para as diferentes temperaturas são apresentados na tabela 8, juntamente com os coeficientes de determinação (R^2) do coeficiente difusivo. Nota-se que ocorre o aumento do coeficiente difusivo efetivo com a temperatura, o que indica a diminuição das resistências internas do processo de secagem. Isso pode ser explicado através do aumento da temperatura que diminuiu a pressão do líquido e sua resistência à evaporação, facilitando a difusão das moléculas no produto (RIZVI, 2005).

Tabela 8 - Coeficiente de difusão efetivo e determinação (R^2) durante a secagem de folhas de malva, em diferentes temperaturas

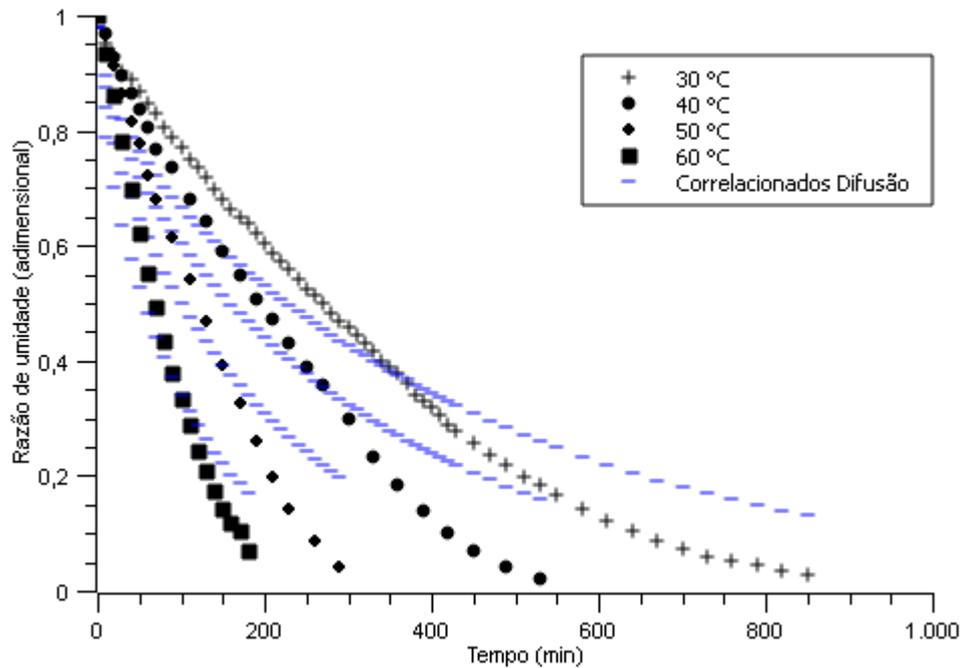
T (°C)	D_{ef} (m ² s ⁻¹)	R^2	ln (D_{ef})	1/T (K ⁻¹)
30	1,1365 x 10 ⁻¹²	0,9614	-27,50	0,00330
40	1,6670 x 10 ⁻¹²	0,9535	-27,12	0,00319
50	2,5618 x 10 ⁻¹²	0,9402	-26,69	0,00309
60	4,5836 x 10 ⁻¹²	0,9553	-26,11	0,00300

Fonte: Autoria própria (2021)

Para a secagem das folhas de malva foram encontrados os coeficientes de difusão com as magnitudes 1,1364 a 4,5836 x 10⁻¹² m² s⁻¹. Estes resultados são condizentes com os obtidos por estudiosos em estudos com folhas de outras

espécies. Martins *et al.* (2015) observaram, estudando as folhas de timbó valores entre $0,6630 \times 10^{-11}$ e $12,0712 \times 10^{-11}$. Gomes *et al.* (2017) secando folhas de *Cymbopogon citratos* encontraram uma variação do coeficiente difusivo efetivo entre $2,20 \times 10^{-12}$ a $1,56 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para uma faixa de temperatura de 30 a 60 °C.

Figura 9 - Curvas de secagem experimentais e simulados pelo modelo Difusivo para geometria placa plana nas temperaturas em estudo



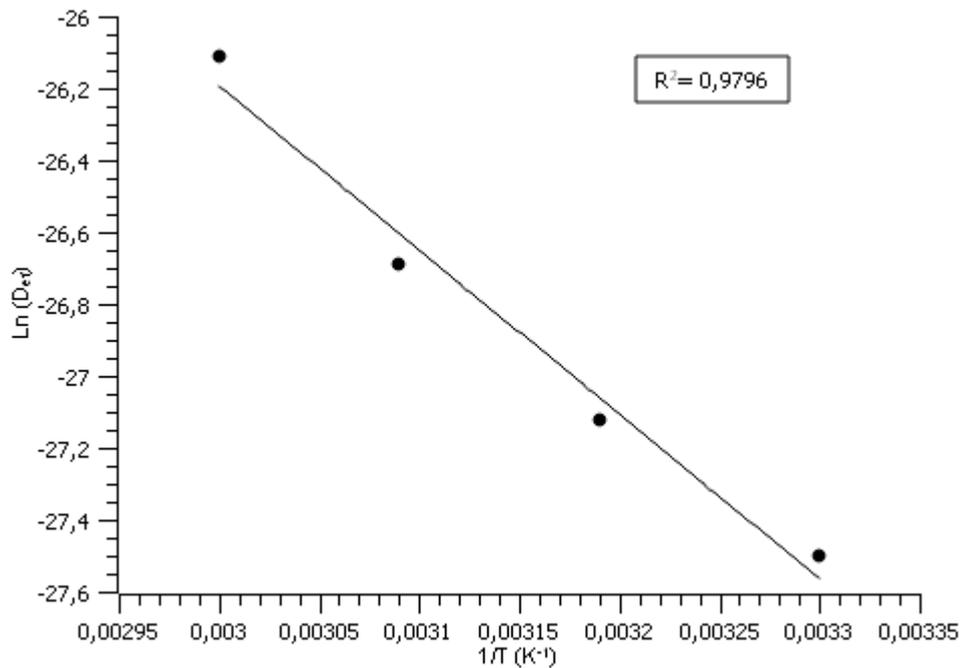
Fonte: Autoria própria (2021)

Na modelagem (Figura 9), pode ser visto os dados experimentais com os dados estimados pelo modelo de difusão líquida para placa plana. Apesar do coeficiente de determinação ter demonstrado um ajuste bom, observa-se que as curvas não se caracterizam tão próximo ao esperado, devido à falta de comportamento exponencial em toda cinética de secagem das folhas de malva nas temperaturas estudadas. Existindo uma incompatibilidade com o que a curva prevê (comportamento exponencial). Isso pode ser justificado, a partir da análise onde a resistência à transferência de massa que a espessura da folha está impondo ao processo é baixa. Além disso, quanto menor o teor de umidade na planta maior o gradiente de concentração.

Rodrigues (2018) ao estudar a cinética da castanha do Maranhão encontrou valores dos coeficientes de determinação para o coeficiente difusivo de 0,962; 0,942;

0,941 para as temperaturas de 30, 45 e 60 °C. Já Guilherme (2018), considerou a variação do raio em seu estudo com grãos de soja e encontrou um coeficiente de determinação do coeficiente difusivo de 0,998 para uma faixa de temperatura de 60 a 80 °C.

Figura 10 - Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo em função da temperatura do ar de secagem, durante a secagem das folhas de malva



Fonte: A autoria própria (2021)

A Figura 10 apresenta a dependência do coeficiente difusivo de folhas de malva com relação à temperatura de secagem, por meio da equação de Arrhenius.

O coeficiente angular gerado a partir do gráfico de $\ln(D_{ef})$ em função do inverso da temperatura absoluta ($1/K$), fornece a relação E_a/R , enquanto que o coeficiente linear indica o valor de D_0 (GONELI *et al.*, 2014).

O ajuste do coeficiente da equação de Arrhenius para os coeficientes de difusão efetiva das folhas de malva, são apresentados na Equação 13, calculado de acordo com a Equação 12.

$$D_{ef} = 3,8011 \cdot 10^{-6} \cdot \exp\left(-\frac{38000,5754}{R \cdot T_a}\right) \quad (13)$$

Analisando a Equação 13, pode-se observar que a energia mínima necessária para que o processo difusivo inicie nas folhas de malva foi de 38,001 kJ mol⁻¹. De acordo com Zogzas *et al.* (1996), a faixa de energia de ativação para produtos agrícolas varia de 12,7 a 110 kJ mol⁻¹, estando o resultado encontrado no estudo em conformidade com os autores.

Carvalho *et al.* (2015), estudando a cinética de secagem de folhas de *Moringa oleífera*, encontraram um valor de energia de ativação próximo aos encontrados no presente trabalho, sendo ele 37,21 kJ mol⁻¹. Enquanto que os encontrados por Martinazzo *et al.* (2007), para folhas de capim-limão (63,47 kJ mol⁻¹) diferem do resultado encontrado.

Martins *et al.* (2015) relatam que os valores distintos de energia de ativação podem ser explicados pela diferença das características físicas e biológicas dos produtos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos experimentos de secagem, observou-se que a temperatura apresentou uma forte influência no processo de secagem da malva, aumentando a taxa de secagem, o que conseqüentemente reduziu o tempo do processo necessário.

Dentre os modelos analisados, o modelo de Wang & Singh foi o que melhor se ajustou aos dados observados para descrição da cinética de secagem da espécie *Malva sylvestris* L.

O coeficiente de difusão efetivo aumentou com a elevação da temperatura do ar de secagem com magnitudes de 1,1364 a 4,5836 x 10⁻¹² m² s⁻¹, a equação de Arrhenius pode descrever esta relação, que apresentou energia de ativação para a difusão líquida durante a secagem, de 38,001 kJ mol⁻¹ para as folhas de malva.

Para trabalhos futuros, sugere-se que sejam realizados estudos avaliando outros modelos matemáticos e em como as propriedades físicas e químicas se comportam durante a cinética de secagem, em especial o encolhimento, enrugamento e a cor.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, E. L. de. **Análise de processos: Introdução a modelagem de processos**. 2013. Pesquisador do IFBA. Disponível em: %20AnaliseProc/ENG%20514_Cap1_2014.1.pdf . Acesso em 14 jul. 2021.

ALIBAS, I.; **Energy consumption and colour characteristics of nettleleaves during microwave, vacuum and convective drying**. 2007; Biosystems Engineering, 96(4), 495-502. <http://dx.doi.org/10.1016/j.Biosystemseng.2006.12.011> Acesso em: 8 jul. 2021.

BALLERO, M.; POLI, F.; SACCHETTI, G.; LOI, M. C.; **Pesquisa etnobotânica no território de Fluminimaggiore (sudoeste da Sardenha)**. Fitoterapia. 2001 Nov;72(7):788-801. doi: 10.1016/s0367-326x(01)00334-3. 11677018. Acesso em: 7 jul. 2021.

BARROS, L.; CARVALHO, AM.; FERREIRA, IC. **Folhas, flores, frutas imaturas e hastes floradas frondosas de Malva sylvestris: um estudo comparativo do potenciale composição nutracêuticas**. Food Chem Toxicol. 2010 Jun;48(6):1466-72. doi:10.1016/j.fct.2010.03.012. Epub 2010 Mar 15. 20233600. Disponível em: Folhas, flores, frutas imaturas e hastes floradas frondosas de Malva sylvestris: um estudo comparativo do potencial e composição nutracêuticas - PubMed (nih.gov). Acesso em: 8 jul. 2021.

BASSANEZI, R.C. **Ensino–aprendizagem com modelagem matemática**. São Paulo: Contexto, 2002.

BERMAN, T. L. **Incropera : fundamentos de transferência de calor e de massa**. Rio de Janeiro: LTC, 2019. ISBN 9788521636595. Disponível em: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsmib&AN=edsmib.000015230&lang=pt-br&site=eds-live&scope=site>. Acesso em: 13 jul. 2021.

BOERI, C. N. **Secagem convectiva de produtos alimentares: otimização e controle**. [s. l.], 2012. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10773/9306>. Acesso em: 9 jul. 2021.

BRASIL. **Farmacopéia Brasileira**. 5. ed., v. 2. Brasília, DF. 2010. Disponível em: <https://www2.fcfar.unesp.br/Home/Instituicao/Departamentos/principiosativo/snaturaisetoxicologianovo/farmacognosia/5-edicao---volume-2.pdf> Acesso em: 20 ago. 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Ciência, Tecnologia e Insumos Estratégicos. Departamento de Assistência Farmacêutica. **Política nacional de plantas medicinais e fitoterápicos** / Ministério da Saúde, Secretaria de Ciência, Tecnologia e Insumos Estratégicos, Departamento de Assistência Farmacêutica. – Brasília: Ministério da Saúde, 2006. 60 p. – (Série B. Textos Básicos de Saúde)

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport: The AVI Publishing Company, 1992. 450 p.

CARVALHO, Y. O.; SILVA, B. R. S.; SOUZA, M. F.; ANDRADE, L. C. T.; SILVA, G. F.; **cinética de secagem das folhas de *moringa oleífera* Lam. (2015) 1339-1747.105151/ENEMP2015-SE-635**. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/c7fd/3e1d34ab04299fda4c26ef2f0281b6378780.pdf> Acesso 11 nov. 2021.

CELESTINO, S. M. C. **Princípio de Secagem de Alimentos** – Embrapa Cerrados, 2010. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/77765/1/doc-276.pdf> . Acesso em 11 jul. 2021

CORRÊA, Paulo C et al. **Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas**. Engenharia Agrícola, v. 27, n. 2, p. 501–510, 2007.

COSTA, A. F. Farmacognosia, Fundação Caloust Gulbekian, **Manuais Universitários**, v. 2, Lisboa, 2002

CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion**. 2. ed. Oxford: Clarendon Press, 414p., 1975.

CREMASCO, M. A. **Fundamentos de transferência de massa**. São Paulo: Blucher, 2016. ISBN 9788521209041. Disponível em: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsmib&AN=edsmib.000015445&lang=pt-br&site=eds-live&scope=site>. Acesso em: 13 jul. 2021.

DELGADO, R. C.; **Avaliação de modelos físico-matemáticos para estimativa da umidade relativa do ar e déficit de pressão de vapor a partir de dados de temperatura do ar**. UFV, 2007. Disponível em: <http://locus.ufv.br/handle/123456789/5289>. Acesso em 20 jul 2021

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis** 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1998

ECKER, Ana Carolina Locatelli et al. Efeitos benéficos e maléficos da malva sylvestris. **Journal of Oral Investigations**, Passo Fundo, v. 4, n. 1, p. 39-43, abr. 2016. ISSN 2238-510X. Disponível em: <http://seer.imed.edu.br/index.php/JOI/article/view/1243/798>. Acesso em: 06jul. 2021.

FARINA, A.; DOLDO, A., COTICHINI, V., RAJEVIC, M., QUAGLIA, M. G., MULINACCI, N.; VINCIERI, F. F. HPTLC and reflectance mode densitometry of anthocyanins in *Malva sylvestris* L.: a comparison with gradient-elution reversed-phase HPLC. **Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis**, v. 14, p. 203-211, 1995. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0731708595016325?vi>

a%3Dihub. Acesso em 7 jul. 2021.

GASPARETTO, J. C.; MARTINS, A. F. C.; HAYASHI, S. S.; OTUKY, M. F.; PONTAROLO, R.; Aspectos etnobotânicos e científicos de *Malva sylvestris* L.: um medicamento à base de plantas milenar, **Revista de Farmácia e Farmacologia**, Volume 64, Edição 2, Fevereiro de 2012, Páginas 172-189, <https://doi.org/10.1111/j.2042-7158.2011.01383.x> acesso em: 6 jul.2021

GOLLNER-REIS, J. P.; **Modelagem matemática da secagem convectiva e dessecção das folhas de *Ora-pro-nobis* (*Pereskia* sp.)**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Métodos Matemáticos Aplicados) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2019.

GOMES, N. H. F.; SILVA NETO, H. C.; ALVES, J. J. L.; RODOVALHO, R. S.; SOUSA, C. M. Cinética de secagem de folhas de *Cymbopogon citratus*. **Evangelista**, v. 19, n. 2, p. 328-338, 2017

GONELI, A. L. D.; VIEIRA, M. do. C.; VILHASANTI, H. da. C. B.; GONÇALVES, A. A. **Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem**. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1983-40632014000100005>. Acesso em 14 jul. 2021.

GUILHERME, G. L. **Modelagem da secagem de grãos de soja utilizando modelos de contornos móveis**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2018. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10379/1/FB_COENQ_2018_1_12.pdf Acesso: 08 nov. 2021.

GUNHAN, T.; DEMIR, V.; HANCIOGLU, E.; HEPBASLI, A. Mathematical modelling of drying of bay leaves. **Energy Conversion and Management**, v. 46, n. 11/12, p. 1667-1679, 2005.

HENRY, A. G.; PIPERNO, D. R.; **Using plant microfossils from dental calculus to recover human diet: a case study from Tell al-Raqā'i, Syria. *J Archaeol Sci*** 2008; 35: 1943–1950. Disponível em: doi:10.1016/j.jas.2007.12.005 (sciencedirectassets.com) Acesso em 7 jul. 2021

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

KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L. G. **Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts**. *Journal of Food Engineering*, v.78, p.98-108, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.09.007>

LIM, T. K.; **Malva sylvestris**. United States, North America: Springer Netherlands, 2014. ISBN 978-94-017-8747-5. DOI 10.1007/978-94-017-8748-2_28. Disponível em: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsbas&AN=edsbas.78441FAE&lang=pt-br&site=eds->

live&scope=site. Acesso em: 6 jul. 2021.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. The Thin-layer Drying Characteristics of Garlic Slices. **Journal of Food Engineering**, v.29, p.75-97, 1996. [http://dx.doi.org/10.1016/0260-8774\(95\)00062-3](http://dx.doi.org/10.1016/0260-8774(95)00062-3)

MARTINAZZO, A. P. *et al.* Modelagem matemática e parâmetros qualitativos da secagem de folhas de capim-limão [*Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf]. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, Botucatu, v. 12, n. 4, p. 488-498, 2010

MARTINS, E. A. S.; LAGE, E. Z.; GONELI, A. L. D.; FILHO, C. P. H.; LOPES, J. G. **Cinética de secagem de folhas de timbó (*Serjania marginata* Casar)**. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n3p238-244>. Acesso em 10 nov. 2021.

MATOS, S. P. de. **Operações unitárias: fundamentos, transformações e aplicações dos fenômenos físicos e químicos**. São Paulo: Erica, 2015. ISBN 9788536510835. Disponível em: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsmib&AN=edsmib.000010201&lang=pt-br&site=eds-live&scope=site>. Acesso em: 9 jul. 2021.

MAZZUCO, H.; PORTELLA, J. A.; JUNIOR, W. B.; ZANOTTO, D. L.; MIRANDA, M. Z. de.; AVILA, V. S. de.; Influência do estágio de maturação na colheita e temperatura de secagem de grãos de trigo sobre os valores de energia metabolizável aparente corrigida (EMAc) em frangos de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia [online]**. 2002, v. 31, n. 6 [Acessado 30 Julho 2021] , pp. 2221-2226. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1516-35982002000900010>>. Epub 09 Set 2005. ISSN 1806-9290. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982002000900010>.

MORETTI, A. C. **Modelagem matemática**. 2010. Disponível em: <https://www.ime.unicamp.br/~moretti/ms428/2sem2010>. Acesso em: 14 jul 2021

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

NASCIMENTO, V. R. G.; BIAGI, J. D.; OLIVEIRA, R. A. de. Modelagem matemática da secagem convectiva com radiação infravermelha de grãos de Moringa oleifera. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental - Agriambi, [s. l.]**, 2015. DOI 10.1590/1807-1929/agriambi.v19n7p686-692. Disponível em: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsbas&AN=edsbas.BDABD13&lang=pt-br&site=eds-live&scope=site>. Acesso em: 14 jul. 2021.

NETO, H. C. S. da; SILVA, L. I.; SILVA, D. P. da; RODOVALHO, R. S.; SOUSA, C. M.; LOPES ALVES, J. J. L. Modelagem matemática dos grãos de urucum, **Revista Agrotecnologia**, Ipameri, v.9, n.1, p.34-45, 2018 Doi: 10.12971/2179-5959/agrotecnologia.v9n1p34-45.

NICOLIN, D.J.; DEFENDI, R. O.; ROSSONI, D. F.; MATOS JORGE, L. M.;

(2017). Modelagem matemática da secagem de soja por um modelo cinético de ordem fracionada. **Journal of Food Process Engineering**, 41(2), e12655. doi:10.1111/jfpe.12655

PARK, K.J.; ANTONIO, G.C.; OLIVEIRA, R.A.; PARK, K.J.B. (2007) **Conceitos de processos e equipamentos de secagem**. 2007.

PEREIRA, T. L. L.; CORADI, P. C.; FERNANDES, C. H. P.; HELMICH, J. C. **Modelagem matemática da secagem de grãos de soja**. Disponível em: <https://maissoja.com.br/modelagem-matematica-da-secagem-de-graos-de-soja/> Acesso em: 12 nov. 2021.

PORTELLA, J. A.; EICHELBERGER, L; **Secagem de grãos**. Embrapa. 2001 Disponível em <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/820443/secagem-de-graos> Acesso em 9 jul. 2021

PRUDENTE, A. D. S.; **O papel da Malva Sylvestris em modelos inflamatórios de pele de camundongos**. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/29045> Acesso em 8 jul. 2021.

REIS, R. C. dos.; DEVILLA, I. A.; ASCHERI, D. P. R.; SERVULO, A. C. O.; SOUZA, A. B. M. **Cinética de secagem de folhas de manjeriço (*Ocimum basilicum* L.) via infravermelho**. 2012. Disponível em: <http://www.agriambi.com.br/revista/v16n12/v16n12a12.pdf>. Acesso em 14 jul.2021.

RIZVI, S. S. Thermodynamic properties of foods in dehydration. **Engineering properties of foods**, 2005, 3 edição, Taylor & Francis, Boca Ratón, 259-346. <http://dx.doi.org/10.1201/9781420028805.ch7>

ROCHA, R. P. da.; MELO, E. de. C.; BARBOSA, L. C. de. A.; CORBIN, J. B.; BERBET, P. A. Influência do processo de secagem sobre os principais componentes químicos do óleo essencial de tomilho. **Revista Ceres** [online]. 2012, v. 59, n. 5 [Acessado 30 Julho 2021] , pp. 731-737. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0034-737X2012000500021>>. Epub 22 Nov 2012. ISSN 2177-3491. <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2012000500021>.

RODRIGUES, A. C. G.; **Determinação do coeficiente difusivo e propriedades químicas da castanha do Maranhão**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia química) - Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018. Disponível em: <https://monografias.ufma.br/jspui/bitstream/123456789/3468/1/AnaCristinaRodrigues.pdf> Acesso em 08 nov. 2021.

RUPPELT, B. I.; KOZERA, C.; ZONETTI, P. D. C.; PAULERT, R.; STEFANELLO, S.; **Plantas medicinais utilizadas na região oeste do Paraná. [recurso eletrônico]**. [s. l.]: UFPR, 2015. ISBN 9788584800063. Disponível em: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat08674a&AN=cea.9788584800063&lang=pt-br&site=eds-live&scope=site>. Acesso em: 6 jul. 2021

SEVERO, E. T. D.; **Efeito da temperatura e da velocidade do ar da secagem da madeira serrada de *Pinus elliottii*. [recurso eletrônico]**. UFPR, 1989. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/28869/D%20-%20ELIAS%20TAYLOR%20DURGANTE%20SEVERO.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em: 30 jul. 2021

SOARES, G. R. **Cinética de secagem de folhas de couve-manteiga processadas na forma chips**. Trabalho de conclusão de curso (Agronomia), Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, 2019. Disponível em: https://repositorio.ifgoiano.edu.br/bitstream/prefix/536/1/TCC_GEOVANA%20RAMOS%20SOARES.pdf Acesso em: 11 dez. 2021

SOUSA, A. P.M. de .; CAMPOS, A. R. N.; GOMES, J. P. .; COSTA, J. D. .; MACEDO, A. D.B. de .; SANTANA, R.A.C. Secar cinética de resíduos de jaca (*Artocarpus heterophyllus* Lam.). **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, [S. l.], v. 10, n. 2, p. e31510212610, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i2.12610. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/12610>. Acesso em: 12 nov. 2021

SOUSA, F. T.; SILVA, M. A. P.; OLIVEIRA, D. E. C.; PLÁCIDO, G. R.; CARGNIN, C.; MOURA, L. C.; SOUZA, D. G.; CALIARI, M.; LIMA, M. S. Modelagem matemática da secagem e propriedades físicas e funcionais do bagaço de malte. **Gl. Sci Technol**, Rio Verde, v.09, n.03, p.51 – 61, 2016

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

SILVA, A. C. **Modelagem e simulação de processos**. CTM, 2013. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/596/o/3_%20Modelagem%20e%20simula%C3%A7%C3%A3o.pdf. Acesso em: 14 jul. 2021.

TADINI, C. C.; TELIS, V. R. N.; MEIRELLES, A. J. D. A.; PESSOA FILHO, P. D. A.; **Operações unitárias na indústria de alimentos, v.2**. Rio de Janeiro: LTC, 2016. ISBN 9788521630326. Disponível em: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsmib&AN=edsmib.000010460&lang=pt-br&site=eds-live&scope=site>. Acesso em: 9 jul. 2021.

TONON, 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. **Food Science and Technology** [online]. 2009, v. 29, n. 2 [Acessado 30 Julho 2021], pp. 444-450. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0101-20612009000200034>>. Epub 27 Jul 2009. ISSN 1678-457X. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612009000200034>.

VASCONCELOS, E. A. F.; MEDEIROS, M. G. F.; RAFFIN F.N.; MOURA T. F. A. L. Influência da temperatura de secagem e da concentração de Aerosil®200 nas características dos extratos secos por aspersion da *Schinus terebinthifolius* Raddi (Anacardiaceae). **Revista Brasileira de Farmacognosia** [online]. 2005, v. 15, n. 3 [Acessado 30 Julho 2021] , pp. 243-249. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1590/S0102-695X2005000300015>>. Epub 06 Maio 2008. ISSN 1981-528X. <https://doi.org/10.1590/S0102-695X2005000300015>.

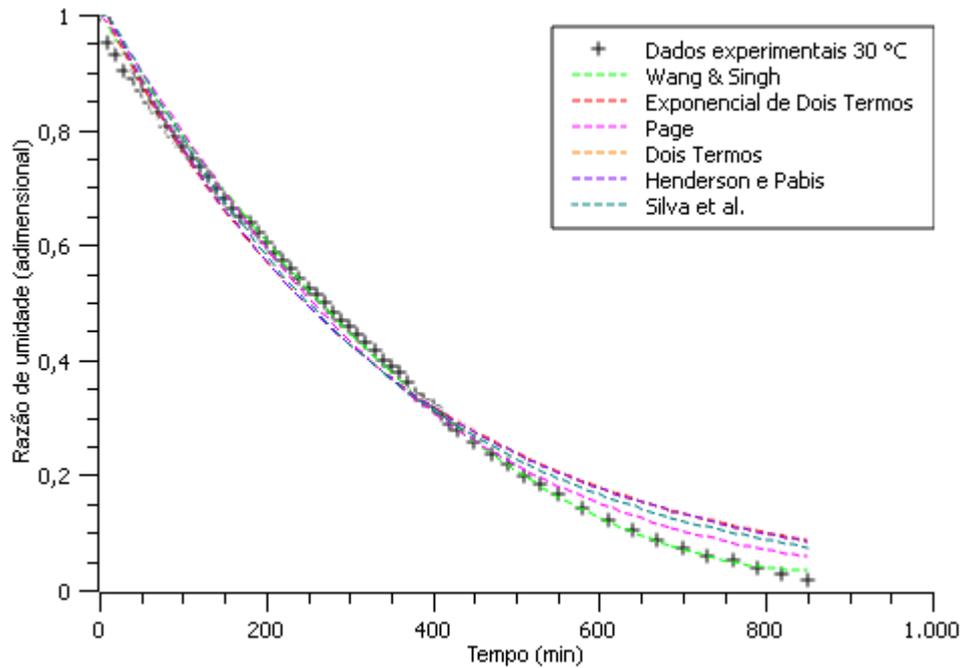
WELTY, J. R. **Fundamentos de transferência de momento, de calor e de massa**. Rio de Janeiro: LTC, 2017. ISBN 9788521634188. Disponível em: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsmib&AN=edsmib.000011363&lang=pt-br&site=eds-live&scope=site>. Acesso em: 13 jul. 2021.

ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. **Drying Technology**, New York, v. 14, n. 10, p. 2225-2253, 1996.

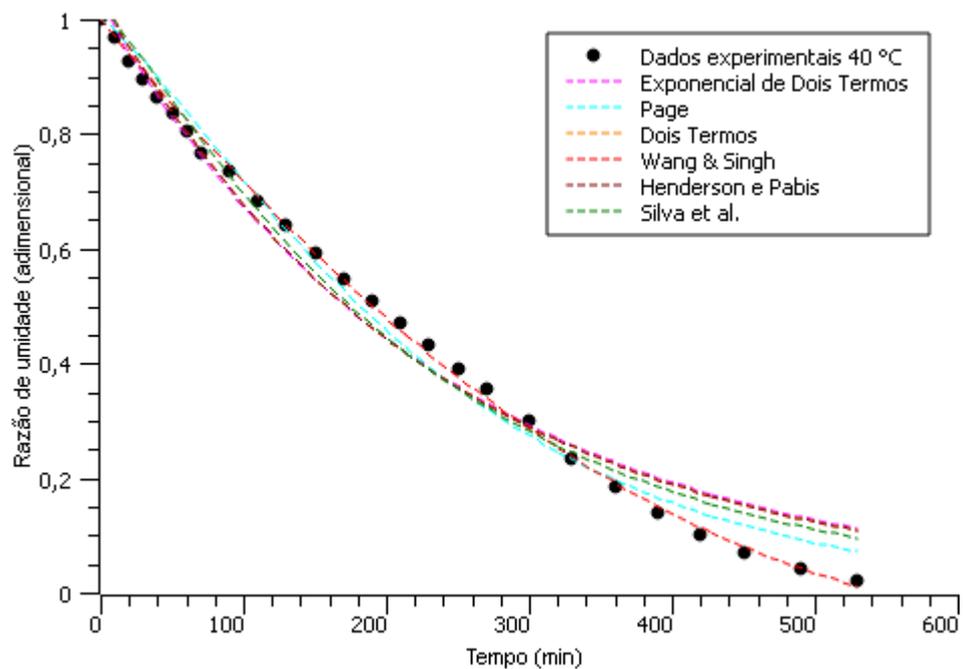
APÊNDICES

APÊNDICE A – Modelos matemáticos ajustados à cinética de secagem

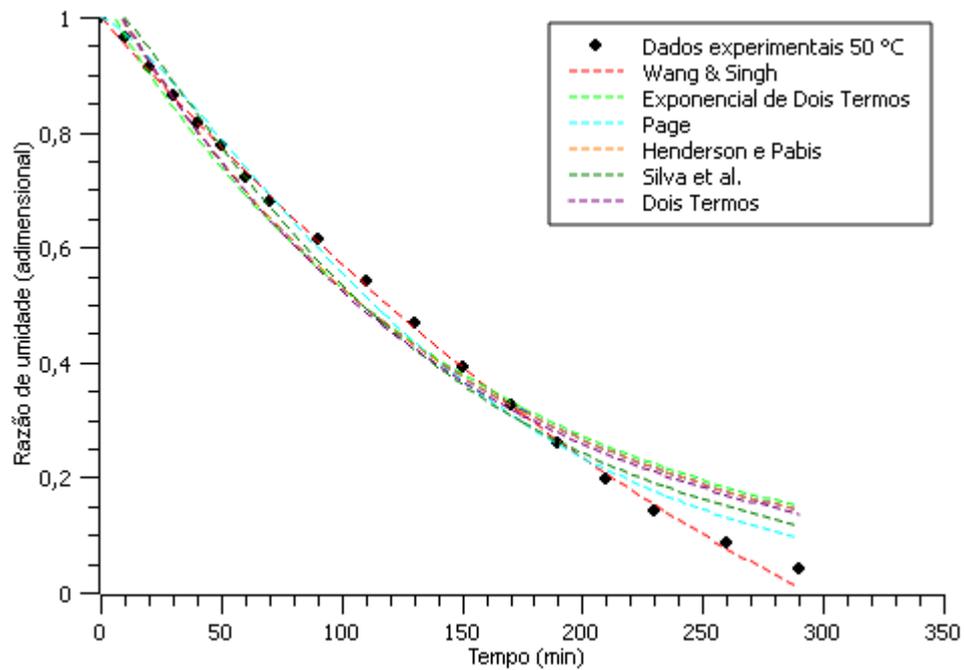
A.1 Modelos ajustados à cinética de secagem de 30 °C



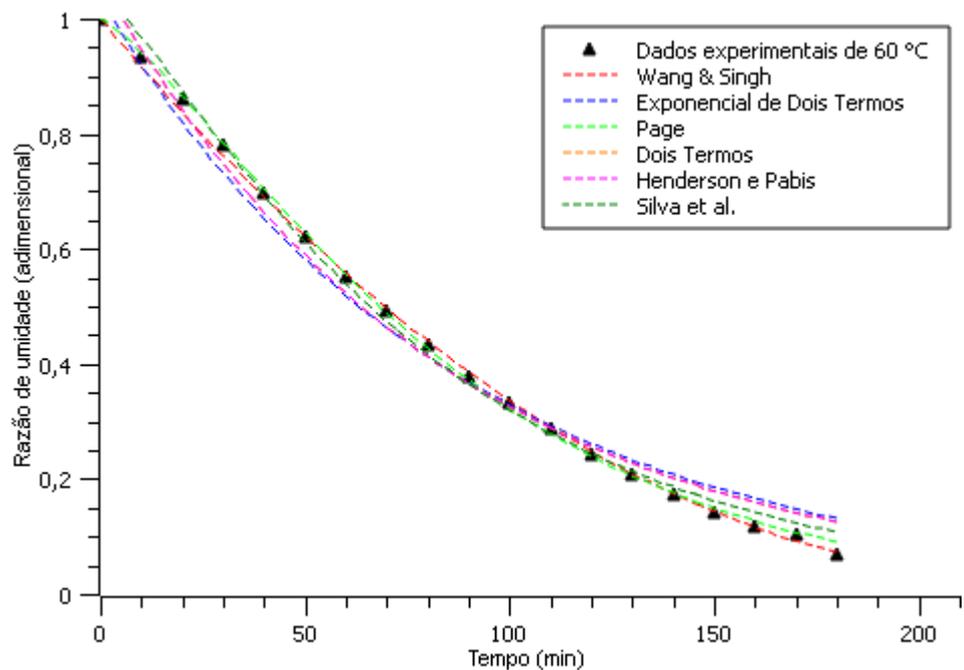
A.2 Modelos ajustados à cinética de secagem de 40 °C



A.3 Modelos ajustados à cinética de secagem de 50 °C



A.4 Modelos ajustados à cinética de secagem de 60 °C



APÊNDICE B – Constantes de secagem e coeficientes dos modelos matemáticos.

B.1 Parâmetros do modelo de Exponencial de Dois Termos para diferentes temperaturas de malva

Exponencial de Dois Termos

Temperatura °C	a	k
30	0,0185	0,1564
40	0,0229	0,1824
50	0,0345	0,1976
60	0,0316	0,3617

B.2 Parâmetros do modelo de Page, para diferentes temperaturas de secagem de folhas de malva

Page

Temperatura °C	k	n
30	0,0010	1,1796
40	0,0011	1,2456
50	0,0013	1,3310
60	0,0031	1,2789

B.3 Parâmetros do modelo de Henderson e Pabis, para diferentes temperaturas de secagem de folhas de malva

Henderson e Pabis

Temperatura °C	a	k
30	1,0295	0,0029
40	1,0387	0,0042
50	1,0653	0,0071
60	1,0681	0,0119

B.4 Parâmetros do modelo de Dois Termos, para diferentes temperaturas de secagem de folhas de malva

Dois Termos

Temperatura °C	a	k ₀	b	k ₁
30	0,7101	0,0029	0,2194	0,0029
40	0,5209	0,0042	0,5178	0,0042
50	0,5371	0,0071	0,5282	0,0071
60	0,5237	0,0119	0,5443	0,0119

B.5 Parâmetros do modelo de Silva et al., para diferentes temperaturas de secagem de folhas de malva

Silva et al.

Temperatura °C	a	b
30	0,0034	-0,0096
40	0,0051	-0,0145
50	0,0091	-0,0283
60	0,0152	-0,0384