

**INSTITUTO FEDERAL GOIANO – CAMPUS CERES**  
**BACHARELADO EM AGRONOMIA**  
**MARYA FERNANDES VELASCO**

**CINÉTICA DE SECAGEM DE FOLHAS DE CANA-DE-AÇÚCAR**

**CERES – GO**  
**2019**

**MARYA FERNANDES VELASCO**

**CINÉTICA DE SECAGEM DE FOLHAS DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Trabalho de curso apresentado ao curso de Agronomia do Instituto Federal Goiano – Campus Ceres, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharela em Agronomia, sob orientação do Prof. Dr. Renato Souza Rodovalho.

**CERES – GO  
2019**

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

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

**Identificação da Produção Técnico-Científica**

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

Nome Completo do Autor: Marya Fernandes Veloso  
Matrícula: 2014103200210087  
Título do Trabalho: Crônica de Jacagem de folhas de curatá - de açúcar

**Restrições de Acesso ao Documento**

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

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIIF Goiano: 26/06/19  
O documento está sujeito a registro de patente?  Sim  Não  
O documento pode vir a ser publicado como livro?  Sim  Não

**DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA**

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

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

CPHS 25/06/19  
Local Data

Marya Fernandes Veloso  
Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ciente e de acordo:

Ronaldo S. Rabelho  
Assinatura do(a) orientador(a)

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

VVM393 Velasco, Marya Fernandes  
cc Cinética de secagem de folhas de cana-de-açúcar /  
Marya Fernandes Velasco; orientador Renato Souza  
Rodvalho. -- Ceres, 2019.  
12 p.

Monografia (Graduação em Bacharelado em agronomia)  
-- Instituto Federal Goiano, Campus Ceres, 2019.

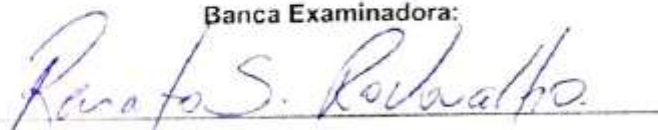
1. Difusividade efetiva. 2. Modelagem. 3.  
Saccharum officinarum. I. Rodvalho, Renato Souza ,  
orient. II. Título.

  
MARYA FERNANDES VELASCO

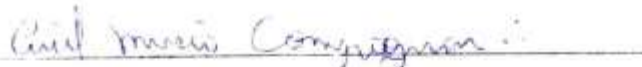
## CINÉTICA DE SECAGEM DE FOLHAS DE CANA-DE-AÇÚCAR

Trabalho de curso apresentado ao curso de Agronomia do Instituto Federal Goiano – Campus Ceres, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharela em Agronomia, sob orientação do Prof. Dr. Renato Souza Rodovalho.

**Banca Examinadora:**



Prof. Dr. Renato Souza Rodovalho  
Instituto Federal Goiano



Prof. Dr. Ariel Múncio Compagnon  
Instituto Federal Goiano



Prof. Dr. Mairon Marques dos Santos  
Instituto Federal Goiano

Aprovado em 03/05/2019.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus e a Nossa Senhora de Fátima por terem me fortalecido e enchido meu coração de boas esperanças, ao ponto de superar as dificuldades e também por toda saúde que me deram, a qual me permitiu alcançar esta etapa tão importante da minha vida.

À minha família tenho muita gratidão, por nunca terem duvidado das minhas capacidades, sempre ao meu lado, me proporcionando ânimo e apoio, tornando possível a realização do meu grande objetivo. Muito obrigada!

Agradeço grandiosamente a minha mãe, Marilda Bueno e ao meu pai, Pedro de Velasco, por ampararem muito bem a minha saída de casa. Duas pessoas extremamente trabalhadoras, que fizeram o possível e o impossível para me ajudar, celebravam cada conquista minha durante a faculdade e também aumentavam meu astral em dia de desânimo. Obrigada por todo amor e carinho que me passaram. Essa conquista é nossa. À vocês minha gratidão.

Ao meu irmão Heitor Velasco, por toda cumplicidade e amor. Sempre muito preocupado comigo, desde a época de vestibulares até a conclusão da graduação. Menino de coração muito bom, viveu minhas ansiedades, alegrias e tristezas. Vibrou com cada avanço meu. À ele tenho gratidão.

A minha avó materna, Selma Xavier, por todo cuidado e proteção comigo, e por estar sempre presente na minha vida acadêmica. Ao meu avô materno, Moacir Bueno, pela sabedoria que me passou e pela disciplina ensinada, cada dia de estudos me lembrava das suas instruções. A minha avó paterna, Maria do Rosário, pelo zelo comigo, e por me passar um pouco de sua linda fé, sempre rezando por mim. Ao meu avô paterno, Sebastião Carvalho (em melhores memórias), por ter me permitido os primeiros contatos com os animais de fazenda, com a botina, com a terra e toda natureza em si. Foi o mentor na escolha do meu curso de graduação. O senhor e sua essência vão permanecer para sempre dentro da sua netinha. Morro de amores por todos vocês, muito obrigada!

A minha psicóloga, Maria Petronilha, agradeço imensamente por toda ajuda, apoio e amizade. Me deu todo suporte para eu ser mais forte e estar sempre vencendo a minha síndrome do pânico.

Ao IF Goiano – Campus Ceres, pelas boas vindas que tive, pelo ambiente propício à evolução, e por todas as condições que me proporcionaram dias de

aprendizagens extremamente valiosos. Meus mais sinceros agradecimentos e respeito por essa instituição.

A cidade de Ceres, por ter me recebido de braços abertos, cidade que fez crescer minha maturidade e experiências de vida. Lugar onde realizei minha maior conquista. A ela devo reconhecimento.

Aos professores e orientadores eu deixo uma palavra de agradecimento pela oportunidade e paciência, em especial ao meu orientador, Prof. Dr. Renato Souza Rodovalho, pela confiança que depositou em mim, te vejo como um pai que me acolheu e muito me ensinou. Posso dizer que tive os melhores professores. A eles devo reconhecimento e gratidão.

A todos os meus amigos eu deixo uma palavra de gratidão. Sempre quando precisei de um ombro amigo estavam todos juntos comigo. Obrigada pela força, pelos elogios e ânimo. Nenhuma vitória estaria sendo concretizada sem o companheirismo de vocês. Foram maravilhosos comigo, muito obrigada!

E por fim, agradeço em especial ao meu grande amigo Hellismar Wakson. Obrigada por ter me permitido conhecer o seu caráter, humildade e inteligência. Sempre me passou muito conhecimento, conselho e carinho. Toda essa vitória foi realizada com a sua participação. Quando eu crescer, quero ser igual a você. Muito obrigada.

*“Santo anjo do Senhor, meu zeloso guardador, se a ti me confiou a piedade divina, sempre me rege, me guarda, me governa me ilumina. Amém”*



## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO .....	2
MATERIAL E MÉTODOS .....	2
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	4
CONCLUSÕES .....	10
REFERÊNCIAS .....	10

## RESUMO

A folha da cana-de-açúcar se destaca entre as plantas medicinais, sendo empregada no tratamento de colesterol alto, disfunções sexuais, inflamações uterinas, febre e resfriados, infecções no trato urinário e diabetes. A secagem e o armazenamento são etapas fundamentais dentre os processos pós-colheita para a obtenção de produtos de qualidade, os quais são a base para a fabricação de medicamentos fitoterápicos. Diante do apresentado o objetivo deste trabalho foi avaliar a cinética de secagem de folhas de cana-de-açúcar, submetida a diferentes temperaturas do ar de secagem. O trabalho foi desenvolvido no Instituto Federal Goiano Campus Ceres. Determinou-se o teor de água das folhas pelo método da estufa, em seguida utilizou-se a secagem com temperaturas do ar controladas de 40, 50 e 60°C em câmara de ventilação forçada. A cinética de secagem das folhas apresentou função direta com a temperatura do ar, sendo que quanto maior a temperatura do ar de secagem menor foi o tempo gasto. Entre os modelos matemáticos testados, o modelo de Midilli apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais para a secagem das folhas de cana-de-açúcar. O aumento da temperatura reduziu o tempo necessário para a secagem do produto. O coeficiente de difusão efetivo aumentou com o incremento da temperatura do ar de secagem.

**Palavras-chave:** difusividade efetiva, modelagem, *Saccharum officinarum*

## ABSTRACT

The sugarcane leaf stands out among medicinal plants, being used in the treatment of high cholesterol, sexual dysfunctions, uterine inflammations, fever and colds, urinary tract infections and diabetes. Drying and storage are key steps among the post-harvest processes to obtain quality products, which are the basis for the manufacture of herbal medicines. That said, the objective of this work was to evaluate the drying kinetics of sugarcane leaves, submitted to different drying air temperatures. The work was developed at the Goiano Federal Institute, Campus Ceres. The water content of the leaves was determined by the oven method, then the drying was done with controlled air temperatures of 40, 50 and 60 °C in a forced-air chamber. The kinetics of drying of the leaves presented a direct function with the air temperature, and the higher the drying air temperature the lower the time spent. Among the mathematical models tested, the Midilli model presented the best fit to the experimental data for the drying of the sugarcane leaves. The increase in temperature reduced the time required for drying the product. The effective diffusion coefficient increases with increasing drying air temperature.

**Keywords:** effective diffusivity, modeling, *Saccharum officinarum*

## Cinética de secagem de folhas de cana-de-açúcar

Marya Fernandes Velasco<sup>1</sup>, Renato Sousa Rodovalho<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Rua 39, nº 456-A, Setor Curumim, Ceres - GO, maryaf.velasco@gmail.com; <sup>2</sup>Caixa Postal 51, CEP 76300-000, Ceres- GO, renato.rodvalho@ifgoiano.edu.br

**Resumo:** A folha da cana-de-açúcar se destaca entre as plantas medicinais, sendo empregada no tratamento de colesterol alto, disfunções sexuais, inflamações uterinas, febre e resfriados, infecções no trato urinário e diabetes. A secagem e o armazenamento são etapas fundamentais dentre os processos pós-colheita para a obtenção de produtos de qualidade, os quais são a base para a fabricação de medicamentos fitoterápicos. Diante do apresentado o objetivo deste trabalho foi avaliar a cinética de secagem de folhas de cana-de-açúcar, submetida a diferentes temperaturas do ar de secagem. O trabalho foi desenvolvido no Instituto Federal Goiano Campus Ceres. Determinou-se o teor de água das folhas pelo método da estufa, em seguida utilizou-se a secagem com temperaturas do ar controladas de 40, 50 e 60°C em câmara de ventilação forçada. A cinética de secagem das folhas apresentou função direta com a temperatura do ar, sendo que quanto maior a temperatura do ar de secagem menor foi o tempo gasto. Entre os modelos matemáticos testados, o modelo de Midilli apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais para a secagem das folhas de cana-de-açúcar. O aumento da temperatura reduziu o tempo necessário para a secagem do produto. O coeficiente de difusão efetivo aumentou com o incremento da temperatura do ar de secagem.

**Palavras-chave:** difusividade efetiva, modelagem, *Saccharum officinarum*

## Kinetics of drying sugar cane leaves

**Abstract:** The sugarcane leaf stands out among medicinal plants, being used in the treatment of high cholesterol, sexual dysfunctions, uterine inflammations, fever and colds, urinary tract infections and diabetes. Drying and storage are key steps among the post-harvest processes to obtain quality products, which are the basis for the manufacture of herbal medicines. That said, the objective of this work was to evaluate the drying kinetics of sugarcane leaves, submitted to different drying air temperatures. The work was developed at the Goiano Federal Institute, Campus Ceres. The water content of the leaves was determined by the oven method, then the drying was done with controlled air temperatures of 40, 50 and 60 °C in a forced-air chamber. The kinetics of drying of the leaves presented a direct function with the air temperature, and the higher the drying air temperature the lower the time spent. Among the mathematical models tested, the Midilli model presented the best fit to the experimental data for the drying of the sugarcane leaves. The increase in temperature reduced the time required for drying the product. The effective diffusion coefficient increases with increasing drying air temperature.

**Keywords:** *effective diffusivity, modeling, Saccharum officinarum*

## **Introdução**

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é uma planta monocotiledônea, com origem no Sudeste Asiático e geralmente cultivada em regiões tropicais ou subtropicais (FAGUNDES et al., 2014). O Brasil é o maior produtor mundial dessa cultura, sendo que, em 2017 foram colhidos 10.184.340 ha, que produziram mais de 758 milhões de toneladas, com rendimento médio de 744,818 ton ha<sup>-1</sup> (FAO, 2019; IBGE, 2019).

Apesar da produção da cana ser feita basicamente para a obtenção de açúcar e etanol, diversos autores afirmam que ela possui propriedades terapêuticas, sendo utilizada como planta medicinal no tratamento de colesterol alto, disfunções sexuais, inflamações uterinas, febre e resfriados, infecções no trato urinário e diabetes (CARNEIRO et al., 2014; MIKAWLRWANG & VANDANA, 2014).

A maioria das plantas medicinais é comercializada na forma dessecada e o processo de secagem é fundamental para garantir a qualidade e longevidade do produto, de forma que as suas propriedades químicas sejam aproveitadas ao máximo (TABALDI et al., 2012). De acordo com Goneli et al. (2014a), a secagem é um processo complexo, que envolve a transferência de calor e massa, de forma simultânea, entre o ar de secagem e o produto, onde o aumento da temperatura resulta em um aumento da pressão parcial de vapor de água do produto a ser seco, resultando na diminuição do teor de água.

A difusividade efetiva é entendida como a agilidade com que a água é retirada do material. Essa é uma propriedade que varia de acordo com as condições de temperatura e velocidade do ar de secagem, ou seja, extrínseca ao material (CARVALHO et al., 2018).

Radünz et al. (2011) afirmam que, o ajuste de diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais de secagem é uma ferramenta de suma importância para estimar o tempo necessário de secagem, e deve ser feito em trabalhos de diferentes espécies de plantas medicinais, de forma a ser obter o modelo mais adequado a cada espécie estudada.

Com base nisso, o objetivo deste trabalho foi avaliar a cinética de secagem e difusividade efetiva de folhas de cana-de-açúcar submetidas a diferentes temperaturas do ar de secagem.

## **Material e Métodos**

O experimento foi conduzido no Laboratório de Fisiologia Vegetal do Instituto Federal Goiano – Campus Ceres, no município de Ceres, Goiás, no período de agosto a

novembro de 2015. Foram utilizadas folhas de cana-de-açúcar coletadas aleatoriamente em uma área experimental da Usina CRV Industrial em parceria com o Instituto Federal Goiano. Para evitar variações no teor de água inicial das folhas, essas foram coletadas nas primeiras horas da manhã, quando não havia mais orvalho em sua superfície.

A medição do teor de água inicial e de equilíbrio das amostras foi determinada após a seleção do produto e no final da secagem, pelo método gravimétrico em estufa de circulação forçada, a  $103 \pm 1$  °C, por 24 h, em quatro repetições (ASABE, 2010).

As folhas selecionadas foram submetidas a três temperaturas do ar de secagem em estufa de ventilação forçada, sendo: 40, 50 e 60 °C. A temperatura do ar de secagem foi monitorada por um termômetro de mercúrio e a umidade relativa no interior da estufa foi calculada utilizando-se o programa computacional Grapsi, com base em dados das condições do ambiente externo, também monitorado durante o processo de secagem, utilizando-se um psicrômetro.

As amostras foram seccionada em formato retangular, com dimensão de 3 x 3 cm, e acondicionadas em caixas gerbox para secagem. No início do processo de secagem foram colocados 35 g de amostras, em quatro repetições para cada temperatura. As amostras foram pesadas periodicamente, a cada quarenta minutos, até que se atingisse uma massa constante.

O cálculo da razão do teor de água (RU) durante os processos de secagem foi realizado pela Equação 1:

$$RU = \frac{(X - X_e)}{(X_i - X_e)}$$

Onde:

X – Grau de umidade do produto, decimal b.s.;

X<sub>i</sub> – Grau de umidade inicial do produto, decimal b.s.;

X<sub>e</sub> – Grau de umidade de equilíbrio do produto, decimal b.s.

Após o processo de secagem, foram usados modelos matemáticos para ajuste aos dados experimentais obtidos (Tabela 1). Na seleção dos melhores modelos para representar a cinética de secagem das folhas de cana-de-açúcar, foram considerados a significância dos coeficientes de regressão pelo teste t, adotando nível de 5% de significância; a magnitude do coeficiente de determinação ajustado pelo modelo (R<sup>2</sup>); o somatório dos quadrados dos resíduos (SQR); o erro médio estimado (SE); e a distribuição dos resíduos (DR).

**Tabela 1.** Modelos matemáticos ajustados às curvas de secagem de folhas de cana-de-açúcar.

Designação do Modelo	Modelo	Eq.
Aproximação da Difusão	$RU = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-b t)$	(2)
Dois Termos	$RU = a \exp(-k t) + b \exp(-k_1 t)$	(3)
Exponencial Dois Termos	$RU = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-k a t)$	(4)
Henderson e Pabis	$RU = a \exp(-k t)$	(5)
Logarítmico	$RU = a \exp(-k t) + b$	(6)
Logistic	$RU = a_0 / (1 + \exp(k t))$	(7)
Midilli	$RU = a \exp(-k t^n) + b t$	(8)
Midilli modificado	$RU = \exp(-k t^n) + a t$	(9)
Newton	$RU = \exp(-k t)$	(10)
Verma	$RU = -a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-b t)$	(11)

t - tempo de secagem; k, k<sub>1</sub> - constantes de secagem; a, b, c, - coeficientes dos modelos

Para a recomendação do modelo matemático de cinética de secagem, foi verificado o R<sup>2</sup> mais próximo a um (1), e valores de SQR e SE mais próximos de zero (0). O menor valor de  $\chi^2$  calculado entre os modelos, foi obtido em função do nível de significância ( $\alpha = 0,05$ ) e do número de graus de liberdade (GLR). A análise do comportamento dos resíduos foi considerada aleatória, quando observada uma distribuição uniforme entre os eixos dos resíduos e o período de secagem.

O coeficiente de difusão efetivo (D<sub>ef</sub>) foi obtido pelo ajuste do modelo da difusão líquida para forma geométrica de placa plana aos dados experimentais da secagem, com a aproximação de oito termos. Para mensurar a espessura das folhas de cana-de-açúcar, foi utilizado paquímetro com precisão de 0,10 mm, medindo 50 folhas para a obtenção da média de 0,23 mm.

A relação entre o coeficiente de difusão efetivo (D<sub>ef</sub>) e a temperatura do ar de secagem foi realizada pelo modelo de Arrhenius (Equação 12).

$$D_{ef} = D_0 \times \exp\left[\frac{E_a}{R \times T_a}\right]$$

Em que:

D<sub>0</sub> = fator pré-exponencial, m s<sup>-1</sup>;

E<sub>a</sub> = energia de ativação, J mol<sup>-1</sup>;

R = constante universal dos gases, 8,314 J (mol K)<sup>-1</sup>.

### Resultados e Discussão

A Tabela 2 apresenta os valores de SE, SQR, R<sup>2</sup> e DR para as folhas de cana-de-açúcar submetidas ao ar de secagem a 40, 50 e 60 °C.

**Tabela 2.** Valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), erro médio estimado (SE), somatório dos quadrados dos resíduos (SQR) e distribuição de resíduos (DR), como critério de ajuste dos modelos aos dados experimentais da secagem de folhas de cana-de-açúcar, obtidos nas temperaturas 40, 50 e 60 °C.

Modelo	Temperatura (°C)	SE	SQR	$R^2$	DR
Aproximação da Difusão	40	0,0279	0,0022	0,9957	A
	50	0,6001	0,0099	0,9838	A
	60	0,0565	0,0085	0,9868	A
Dois Termos	40	0,0537	0,0029	0,9957	A
	50	0,0062	0,0136	0,9834	T
	60	0,0493	0,0082	0,9904	A
Exponencial Dois Termos	40	0,0284	0,0015	0,9954	A
	50	0,0600	0,0068	0,9834	A
	60	0,0553	0,0056	0,9868	A
Henderson e Pabis	40	0,0280	0,0015	0,9955	A
	50	0,0600	0,0068	0,9839	A
	60	0,0477	0,0042	0,9902	A
Logarítmico	40	0,1483	0,2784	0,8699	T
	50	0,0599	0,0099	0,9839	A
	60	0,1356	0,0488	0,9213	A
Logistic	40	0,0283	0,0023	0,9955	A
	50	0,0608	0,0102	0,9834	A
	60	0,2296	0,1399	0,7526	A
Midilli	40	0,0927	0,0157	0,9524	A
	50	0,0607	0,0132	0,9839	A
	60	0,0493	0,0082	0,9904	A
Midilli modificado	40	0,02803	0,0908	0,9956	A
	50	0,0598	0,0099	0,9839	A
	60	0,0564	0,0084	0,9868	A
Newton	40	0,0281	0,0008	0,9954	A
	50	0,0598	0,1901	0,9834	A
	60	0,0542	0,0028	0,9868	T
Verma	40	0,0279	0,0022	0,9957	A
	50	0,0608	0,0102	0,9834	A
	60	0,0564	0,0088	0,9868	A

A - Distribuição dos resíduos aleatória; T - distribuição dos resíduos tendenciosa

Conforme descrito na Tabela 2, na secagem a 40 °C, os modelos Aproximação da Difusão (2) e Verma (11) apresentaram os menores desvios-padrão. Quanto menor o desvio-padrão, melhor a qualidade de ajuste do modelo matemático em relação aos dados (GONELI et al., 2014a).



Com relação ao coeficiente de determinação, o modelo Logarítmico (7), obteve valor inferior a 0,95, enquanto os modelos Aproximação da Difusão (2), Dois Termos (3), e Verma (10) apresentaram o maior valor de  $R^2$  na secagem a 40 °C. Kashaninejad et al. (2007) afirmam que valores de  $R^2$  acima de 0,95 indicam que os modelos representam satisfatoriamente o processo de secagem avaliado. Porém, é recomendado analisar conjuntamente outros parâmetros estatísticos, e não utilizar apenas o valor do  $R^2$  como parâmetro para seleção de modelos matemáticos não lineares.

Ainda observando os dados obtidos na secagem das folhas de cana-de-açúcar a 40 °C, nota-se que o modelo Newton (10) obteve a menor soma de quadrados do resíduo. No que diz respeito à distribuição dos resíduos, é possível observar que o modelo Logarítmico (6) apresentou distribuição tendenciosa. Segundo Goneli et al. (2011), um modelo matemático é tido como aceitável quando seus resultados não são tendenciosos, isto é, quando os valores dos resíduos estiverem próximos à faixa horizontal em torno de zero, e inadequado caso apresente distribuição de resíduos tendenciosa.

Na secagem a 50 °C, o menor desvio-padrão foi apresentado pelo modelo Verna (11), enquanto os modelos Henderson e Pabis (5), Logarítmico (6), Midilli (8) e Midilli Modificado (9) apresentaram os maiores coeficientes de determinação. Para o parâmetro soma de quadrado de resíduos, os modelos Exponencial Dois Termos (4) e Henderson e Pabis (5) obtiveram os menores valores e mais próximos a zero.

O modelo Dois Termos (3) apresentou distribuição de dados tendenciosa nessa temperatura, enquanto para os demais modelos estudados, a distribuição de dados foi aleatória.

Na temperatura de 60 °C, o modelo Henderson e Pabis (5) apresentou o menor desvio-padrão, enquanto Dois Termos (3) e Midilli (8) foram os modelos com maiores coeficientes de determinação. O modelo Newton (10) apresentou a menor soma de quadrado do resíduo, porém sua distribuição dos resíduos foi tendenciosa.

Com base nos dados apresentados na Tabela 2, nota-se que os modelos Aproximação da Difusão (2), Exponencial Dois Termos (3), Henderson e Pabis (5), Logistic (7), Midilli (8), Midilli Modificado (9) e Verma (11) apresentaram distribuição de resíduos aleatória nas três temperaturas estudadas.

Verifica-se que o modelo de Midilli (8) apresentou ajuste satisfatório aos dados experimentais em todas as temperaturas, por apresentar valores de desvio padrão (SE) e

soma de quadrado de resíduos (SQR) próximos a zero, maiores magnitudes de coeficiente de distribuição ( $R^2$ ) e distribuição aleatória do comportamento dos resíduos em todas as temperaturas avaliadas (Tabela 2). Portanto, esse é o modelo mais indicado para representar o fenômeno de secagem das folhas de cana-de-açúcar nas temperaturas estudadas.

Em trabalhos avaliando a secagem de folhas de outras espécies medicinais como aroeira (*Schinus terebinthifolius*) (GONELI et al., 2014b), erva-baleeira (*Cordia verbenacea*) (GONELI et al., 2014a), mororó (*Bauhinia cheilantha*) (MARTINS et al., 2015) e capim-cidreira (*Cymbopogon citratus*) (GOMES et al., 2017), o modelo de Midilli também é descrito como o que melhor se ajustou aos dados experimentais. Goneli et al. (2014b) sugerem que o melhor ajuste do modelo de Midilli para a secagem de espécies medicinais se deve à rápida perda de água no início do processo de secagem dessas plantas, o que resulta em uma curva de secagem mais acintosa e melhor caracterizada matematicamente pelo referido modelo.

Na Tabela 3 estão descritos os coeficientes estatísticos do modelo de Midilli, em que, é possível notar que todos seus parâmetros foram significativos em todas as temperaturas avaliadas para secagem das folhas de cana-de-açúcar. A constante k relaciona-se com a difusividade efetiva no processo de secagem no período decrescente, e pode ser utilizada como uma aproximação para caracterizar o efeito da temperatura (GASPARIN et al., 2017).

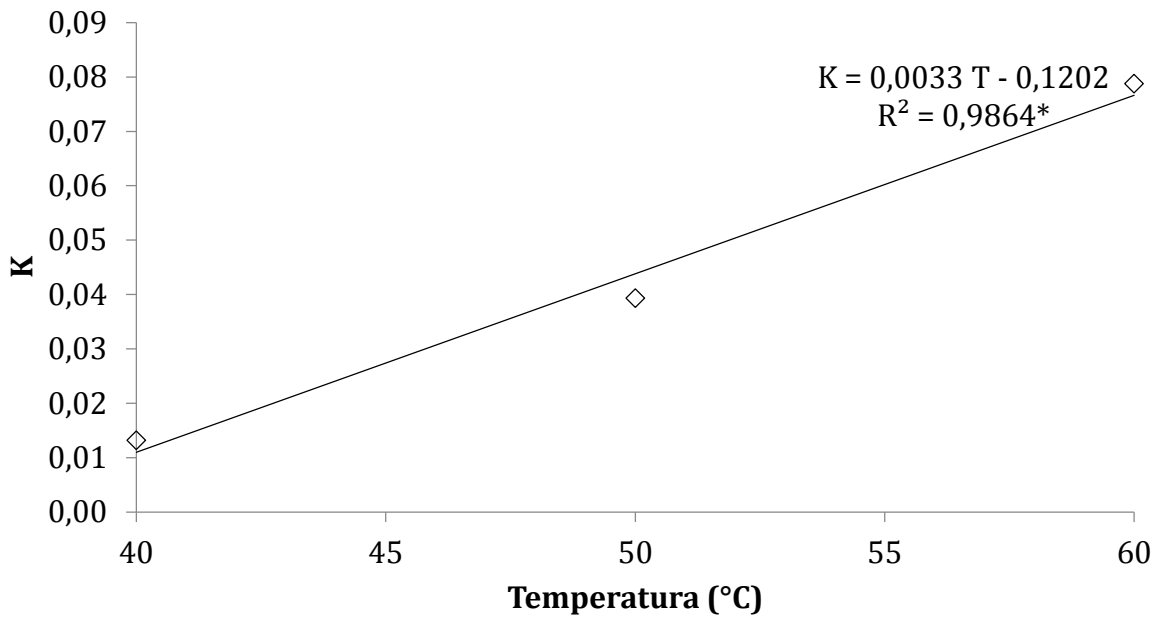
**Tabela 3.** Coeficientes estatísticos do modelo matemático de Midilli para as temperaturas de 40, 50 e 60 °C.

T (°C)	Parâmetros			
	a	b	n	k
40	0,988474*	-0,000011*	1,329827*	0,013228*
50	0,996213*	-0,000305*	0,965463*	0,039348*
60	0,977599*	0,000073*	1,072167*	0,078820*

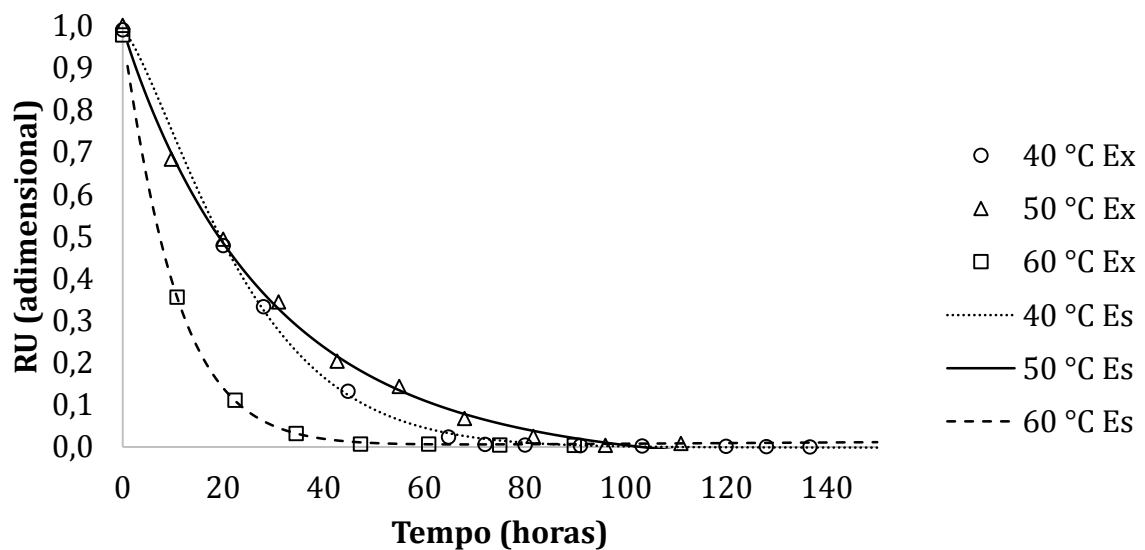
\* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste T.

Na Figura 1, verifica-se que com o aumento da temperatura do ar de secagem, o valor de K também aumentou. Siqueira et al. (2012), estudando a cinética de secagem de folhas de pinhão-manso (*Jatropha curcas*), também encontraram comportamento semelhante para esse parâmetro, e citam que o K representa o efeito das condições externas durante o processo de secagem.

**Figura 1.** Relação dos valores do coeficiente "K" obtidos pelo modelo de Midilli com a temperatura do ar de secagem.



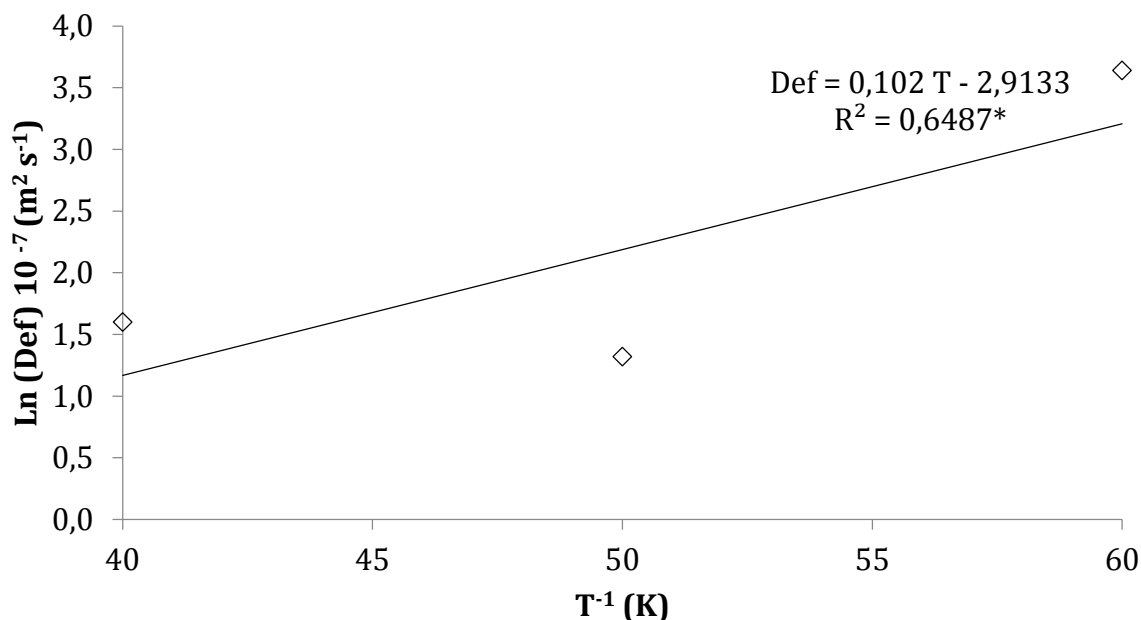
Na Figura 2 são apresentados os dados experimentais e estimados para a razão de umidade (RU), utilizando-se o modelo de Midilli. É possível constatar que o modelo escolhido apresentou bom ajuste aos dados experimentais. Nota-se que, o aumento da temperatura promove redução no tempo de secagem das folhas de cana-de-açúcar, com perda maior de água do interior das folhas para o ambiente no início do processo de secagem. Esse comportamento era esperado, uma vez que elevando a temperatura, a viscosidade da água diminui (CORRÊA et al., 2010).



Esse efeito também foi observado na secagem de folhas de capim-cidreira (*Cymbopogon citratus*) (MARTINAZZO et al., 2007; GOMES et al., 2017), erva baleeira (*Cordia verbenacea*) (GONELI et al., 2014a), salva limão (*Hyptis suaveolens*) (ALVES et al., 2017), hortelã pimenta (*Mentha piperita*) (GASPARIN et al., 2017) e boldo (*Peumus boldus*) (SILVA et al., 2019). De acordo com Goneli et al. (2014a), isso pode ser resultado do aumento do gradiente de pressão de vapor entre o ar no interior das folhas e o ar de secagem.

Na Figura 3 são apresentados os valores do coeficiente de difusão efetivo ( $D_{ef}$ ) obtidos na secagem das folhas de cana nas temperaturas avaliadas. Os valores de  $D_{ef}$  variaram entre  $1,32$  e  $3,64 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Percebe-se que os valores de  $D_{ef}$  tendem a aumentar conforme a temperatura sobe. Entretanto, esse comportamento não foi observado na secagem a  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , onde o  $D_{ef}$  apresentou seu menor valor,  $1,32 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Com base na Figura 3, pode-se constatar que houve maior difusividade na temperatura de  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Figura 2.** Valores do coeficiente de difusão efetivo ( $D_{ef}$ ) ( $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) obtidos para secagem das folhas de cana-de-açúcar nas temperaturas do ar de secagem a  $40$ ,  $50$  e  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Prates et al. (2012), avaliando a cinética de secagem de folhas de fruta-de-lobo (*Solanum lycocarpum*), também observaram que os valores de difusividade aumentaram com a elevação de temperatura, variando de  $2,81 \cdot 10^{-11}$  ( $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ) a  $8,85 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  ( $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Silva et al. (2015) também observaram efeito semelhante na secagem de folhas de jenipapo (*Genipa americana*), onde o coeficiente de difusão efetiva aumentou com a elevação da temperatura, variando de  $1,12 \cdot 10^{-12}$  a  $4,02 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  para a faixa de temperatura de 35,3 a 65 °C.

### Conclusões

Entre os modelos matemáticos testados, o modelo de Midilli apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais para a secagem das folhas de cana-de-açúcar.

O aumento da temperatura reduz o tempo necessário para a secagem da folha de cana-de-açúcar.

O coeficiente de difusão efetivo aumentou com o incremento da temperatura do ar de secagem.

### Referências

ALVES, J. L. L.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C.; BRANQUINHO, N. A. A. Cinética de secagem de folhas de *Hyptis suaveolens*. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, São Paulo, v. 19, n. 2, p. 168-176, 2017.

ASABE. Moisture Measurement – Forages: Standard S358.2 DEC1988, R2008. In: American Society of Agricultural and Biological Engineers (Ed.). **Standards, Engineering Practices, and Data**. St. Joseph: ASABE, p.684-685, 2010.

CARNEIRO, F. M.; SILVA, M. J. P.; BORGES, L. L.; ALBERNAZ, L. C.; COSTA, J. D. P. Tendências dos estudos com plantas medicinais no Brasil. **Revista Sapiência**, Iporá, v. 3, n. 2, p. 44-75, 2014.

CARVALHO, J. M. G.; BUENO, S. G. S.; OLIVEIRA, D. E. C.; RESENDE, O. Modelagem matemática e propriedades termodinâmicas da secagem do grão de girassol. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v. 11, n. 2, p. 136-149, 2018.

FAGUNDES, E. A. A.; SILVA, T. J. A.; BOMFIM-SILVA, E. M. Desenvolvimento inicial de variedades de cana-de-açúcar em Latossolo submetidas a níveis de compactação do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 2, p. 188-193, 2014.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Faostat**. Disponível em: < <http://www.fao.org/faostat/en/#data> >. Acesso em mar. 2019.

GASPARIN, P. P.; CHRIST, D.; COELHO, S. R. M. Secagem de folhas de *Mentha piperita* em leito fixo utilizando diferentes temperaturas e velocidades de ar. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 48, n. 2, p. 242-250, 2017.

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*. **Engevista**, Niterói, v. 19, n. 2, p. 328-338, 2017.

GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; MAGALHÃES, F. E. A.; BAPTESTINI, F. M. Contração volumétrica e forma dos frutos de mamona durante a secagem. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 1, p. 1-8, 2011.

GONELI, A. L. D.; NASU, A. K.; GANCEDO, R.; ARAÚJO, W. D.; SARATH, K. L. L. Cinética de secagem de folhas de erva baleeira (*Cordia verbenacea* DC.). **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, Botucatu, v. 16, n. 2, p. 434-443, 2014a.

GONELI, A. L. D.; VIEIRA, M. C.; VILHASANTI, H. C. B.; GONÇALVES, A. A. Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 44, n. 1, p. 56-64, 2014b.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Sistema IBGE de Recuperação Automática. **Produção Agrícola Municipal 2017**. Disponível em: < <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1612> >. Acesso em mar. 2019.

JIDEANI, V. A.; MPOTOKWANA, A, S.M. Modeling of water absorption of Botswana bambara varieties using Peleg's equation. **Journal of Food Engineering**, Davis, v. 92, n. 2, p.182-188, 2009.

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

MARTINS, J. J. A.; SOUSA, F. C.; ROCHA, A. P. T.; MARTINS, J. N.; GOMES, J. P. Estudo da cinética de secagem de folhas de *Bauhinia cheilantha* (Bong.) Steud. (mororó). **Revista Cubana de Plantas Medicinales**, Ciudad de la Habana, v. 20, n. 4, p. 397-408, 2015.

MIKAWLRANG, K.; VANDANA, S. K. Current scenario of urolithiasis and the use of medicinal plants as antiurolithiatic agents in Manipur (North East India): A review. **International Journal of Herbal Medicine**, Uttarakhand, v. 2, n. 1, p. 1-12, 2014.

PRATES, M. F. O.; REIS, R. C.; DEVILLA, I. A.; FARIA, R. Q.; LIMA JÚNIOR, A. F. Cinética de secagem de folhas de *Solanum lycocarpum* (A. St.-Hil.). **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, Botucatu, v. 14, n. 3, p. 514-521, 2012.

RADÜNZ, L. L.; AMARAL, A. S.; MOSSI, A. J.; MELO, E. C.; ROCHA, R. P. Avaliação da cinética de secagem de carqueja. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 19, n. 1, p. 19-27, 2011.

SILVA, N. C. B.; SANTOS, S. G. F.; SILVA, D. P. S.; SILVA, I. L.; RODOVALHO, R. S. Drying kinetics and thermodynamic properties of boldo leaves (*Plectranthus barbatus* Andrews). **Revista Científica**, Jaboticabal, v. 47, n. 1, p. 1-7, 2019.

SILVA, L. A.; RESENDE, O.; VIRGOLINO, Z. Z.; BESSA, J. F. V.; MORAIS, W. A.; VIDAL, V. M. Cinética de secagem e difusividade efetiva em folhas de jenipapo (*Genipa americana* L.). **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, Campinas, v. 17, n. 4, supl. II, p. 953-963, 2015.

SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Drying kinetics of jatropha seeds. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 59, n. 2, p. 171-177, 2012.

TABALDI, L. A.; VIEIRA, M. C.; ZÁRATE, N. A. H.; SILVA, L. R.; GONÇALVES, W. L. F.; PILECCO, M.; FORMAGIO, A. S. N.; GASSI, R. P.; PADOVAN, M. P. Cover crops and their effects on the biomass yield of *Serjania marginata* plants. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, p.614-620, 2012.