

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS UFGD
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS FCA**

**PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS E CINÉTICA DE
SECAGEM DE FOLHAS DE *Bauhinia forficata* Link**

FÁBIO MACIEL NETO MIRANDA

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2016

PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS E CINÉTICA DE SECAGEM DE FOLHAS DE *Bauhinia forficata* Link

FÁBIO MACIEL NETO MIRANDA
Engenheiro Agrícola

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal da
Grande Dourados, como parte das
exigências para conclusão do curso de
Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Valdiney Cambuy Siqueira

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

M672p Miranda, Fabio Maciel Neto
Propriedades termodinâmicas e cinética de secagem de folhas de Bauhinia
Forficata Link / Fabio Maciel Neto Miranda -- Dourados: UFGD, 2016.
28f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Valdiney Cambuy Siqueira

TCC (graduação em Engenharia Agrícola) -Faculdade de Ciências Agrárias,
Universidade Federal da Grande Dourados.
Inclui bibliografia

1. Coeficiente de difusão efetivo. 2. Plantas medicinais. 3. Modelagem
estatística. 4. Pata-de-vaca. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

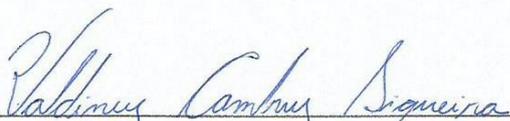
**PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS E CINÉTICA DE
SECAGEM DE FOLHAS DE *Bauhinia forficata* Link**

Por

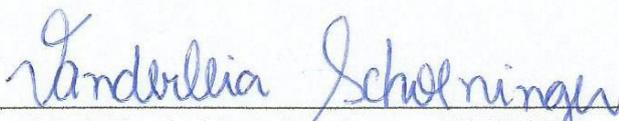
FÁBIO MACIEL NETO MIRANDA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos exigidos para
obtenção do título de ENGENHEIRO AGRÍCOLA

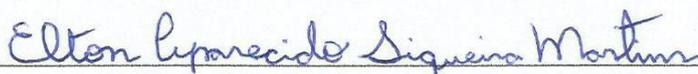
Aprovado em: 04/05/2016



Prof. Dr. Valdiney Cambuy Siqueira
Orientador – UFGD/FCA



Prof. Dr.ª. Vanderleia Schoeninger – UFGD/FCA



Prof. MSc. Elton Aparecido Siqueira Martins – UFGD/FCA

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2016

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e por guiar meus passos durante esta caminhada.

A Universidade Federal da Grande Dourados, por toda a infraestrutura necessária ao desenvolvimento dos estudos e benefício ao curso de Engenharia Agrícola.

Aos meus pais Aparecido Antônio Miranda e Márcia Maciel (*in memoriam*), que estiveram ao meu lado perante as dificuldades desta caminhada. Obrigado pelo amor, carinho, compreensão, paciência e pelo incansável apoio e suporte para que esse sonho se realizasse.

A minha namorada Francisca de Paula Rodrigues da Silva, por ter enfrentado comigo as dificuldades e as alegrias que me deparei durante essa trajetória, sendo companheira, paciente, amorosa e acima de tudo, por me incentivar a jamais desistir dos meus objetivos.

Aos meus irmãos Bruna Leticia Maciel Gomes, Luana Renata Maciel Gomes e Gabriel Mercener por me apoiar durante toda a graduação, pelas conversas e pelos momentos de alegria.

A todos os meus familiares que me apoiaram durante a graduação.

Ao orientador e amigo Prof. Dr. Valdiney Cambuy Siqueira, pelos ensinamentos transmitidos, conselhos e confiança depositada em mim. Obrigado pela grande dedicação na condução dessa pesquisa.

A Fernanda Pimentel, Larissa Capoana, Jean Carlos do Carmo Gauer, Rogério Macedo Melo e Stanley Stéfano Perin Gonella, pelo auxílio em diversos momentos durante a execução desta pesquisa.

A todos os professores do curso de Engenharia Agrícola, que transmitiram seus conhecimentos e experiências, servindo como base para que eu me torne um bom profissional.

A todos os amigos adquiridos na graduação, João Guilherme Macedo, Luiz Fernando Suda, Carlos Thiago Mercado Moreno Barbosa, Jhonatan Gomes Takara, Wellytton Darci Quequeto, Alex Assis de Souza, Luan Santos Farinha, Igor Valente, Weliton Perez e Cauê Thiago Barbosa.

Obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO	iv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Cultura de pata-de-vaca.....	3
2.2 Secagem	4
2.3 Modelagem Matemática	5
2.4 Propriedades termodinâmicas.....	6
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	8
3.1 Influência da temperatura.....	12
3.2 Propriedades termodinâmicas.....	13
3.3 Análise estatística	13
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	15
4.1. Cinética de secagem das folhas de pata-de-vaca	15
4.2. Determinação do coeficiente de difusão efetivo	17
4.3 Influência da temperatura.....	18
4.4 Propriedades termodinâmicas.....	20
5. CONCLUSÕES.....	21
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22

MIRANDA, F. M. N. **Propriedades termodinâmicas e cinética de secagem de folhas de *Bauhinia forficata* Link.** 2016. 28p. Monografia (Graduação em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados - MS.

RESUMO

Objetivou-se com o presente trabalho determinar o coeficiente de difusão e as propriedades termodinâmicas das folhas de pata-de-vaca (*Bauhinia forficata* Link), considerando duas formas de medições de espessura, bem como descrever o processo de secagem por meio do ajuste de modelos matemáticos. As folhas de pata-de-vaca foram levadas ao laboratório, onde se realizou nova seleção para dar início ao processo de secagem em secador experimental, com emprego de quatro temperaturas (40, 50, 60 e 70 °C), com um fluxo de ar de aproximadamente 0,850 m/s. Após a secagem, determinou-se o coeficiente de difusão por meio da teoria da difusão líquida, permitindo a obtenção dos valores da energia de ativação, entalpia, entropia e energia livre de Gibbs. Já a descrição do processo de secagem foi realizada por meio do ajuste de treze modelos matemáticos constantemente utilizados para representação de secagem de produtos agrícolas. Conclui-se que o modelo de Valcam, Henderson e Pabis são adequados para representar a cinética de secagem de folhas de pata-de-vaca. O aumento da temperatura promove: decréscimo de entalpia e entropia; aumento da energia livre de Gibbs e do coeficiente de difusão efetivo. O coeficiente de difusão efetivo é maior quando se considera a espessura da nervura, sendo necessária a padronização e/ou especificação dos pontos de medição da espessura da folha.

PALAVRAS-CHAVE: coeficiente de difusão efetivo, plantas medicinais, modelagem estatística, pata-de-vaca.

1. INTRODUÇÃO

O emprego de plantas medicinais no tratamento de doenças é utilizado desde as gerações passadas o que caracteriza o uso a décadas destes produtos justaposto ao conhecimento e o saber popular repassado de geração para geração (FEIJÓ et al., 2012).

Segundo estimativas da Organização Mundial da Saúde (OMS), 80% de toda a população mundial, com ênfase maior nos países subdesenvolvidos, substituem necessidades médicas primárias pelo uso de plantas medicinais (RATES, 2001).

O baixo custo de aquisição e os princípios ativos que caracterizam as propriedades terapêuticas dessas plantas são alguns dos fatores que cooperam para disseminação do uso popular (GONELI et al., 2014a).

Dentre as mais de 300 espécies conhecidas do gênero *Bauhinia* (LUSA e BONA, 2009), a espécie *Bauhinia forficata* Link, conhecida popularmente no Brasil como pata-de-vaca é constantemente utilizada na medicina popular se destacando no tratamento de diabetes mellitus (TROJAN-RODRIGUES et al., 2012).

Assim como a maioria dos produtos agrícolas, algumas plantas medicinais necessitam passar por um processo de secagem, que reduz o teor de água dos produtos em consequência do aumento de pressão parcial de vapor no produto, ocasionada pela elevação de temperatura (GONELI et al., 2014).

A secagem de plantas medicinais proporciona maior período útil, armazenamento e utilização em maior escala nos processos industriais. No entanto, cada produto agrícola apresenta comportamento distinto durante a secagem, uma vez que, além das características do ar de secagem, as propriedades do produto como forma, tamanho, composição química, etc., também exercem grande influência. Diante disso, alguns autores como ROCHA et al. (2012) e TASIRIN et al. (2014) utilizam a técnica da modelagem estatística para prever tal comportamento. Sendo assim, diversos modelos matemáticos têm sido utilizados para descrever o processo de secagem de plantas medicinais, como para: folhas de *Cymbopogon citratus* (MARTINAZZO et al., 2007a); folhas de *Salvia officinalis* L (RADÜNZ et al., 2010); e folhas de *Solanum lycocarpum* (PRATES et al., 2012). Segundo MARTINAZZO et al. (2007b), um modelo básico desenvolvido para prognosticar a taxa de secagem é a teoria da difusão líquida. Segundo os autores, o coeficiente de difusão efetivo sempre será obtido através do ajuste de curvas experimentais.

No decorrer do processo de secagem é interessante não só descrever a cinética de secagem, mas também observar as propriedades termodinâmicas. Elas fornecem informações

importantes sobre as propriedades do produto como também sobre a energia necessária no processo, como a entalpia e a entropia, que caracterizam variações existentes do sistema água-produto (CORRÊA et al., 2010).

Sabendo-se da necessidade de se estabelecer uma condição ideal de secagem, objetivou-se com o presente trabalho estudar a cinética de secagem das folhas de pata-de-vaca, ajustando aos valores experimentais da razão de umidade do produto diferentes modelos matemáticos, bem como verificar a influência na forma de leitura da espessura média das folhas no coeficiente de difusão efetivo utilizando o método de identidade de modelos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Cultura de pata-de-vaca

Bauhinia forficata Link, pertencente ao gênero *Bauhinia*, família *Caesalpinioideae* e subfamília, *Fabaceae* (SILVA et al., 2012). Pode ser encontrada com facilidade nos bordos de matas no Paraguai, sul do Brasil, Uruguai e Argentina (FORTUNATO, 1986; DUARTE et al., 2007).

São consideradas plantas heliófilas, indiferentes quanto às condições de umidade do solo e com características exclusivas da mata semidecídua de altitude, onde ocorre em frequência elevada, porém com dispersão bastante irregular e descontínua (VIANA et al., 2008).

Apresenta-se como uma árvore de médio porte (de 5 a 9 m), possuindo flores pentâmeras zigomorfas, de coloração branca e com pétalas largo-lineares duas vezes mais longa que as sépalas, obtusas no ápice e de base contraída na forma de unha. O fruto é uma vagem linear, achatada e deiscente, medindo de 15 a 25 cm de comprimento e de coloração escura, provida de uma linha esbranquiçada que delimita sua forma (LORENZI, 1998; LORENZI, 2008).

O tronco geralmente é tortuoso recoberto por súber castanho amarronzado, apresentando sulcos mais ou menos profundos e aspecto ligeiramente estriado no sentido longitudinal (OLIVEIRA et al., 2001).

A espécie apresenta folhas, caracteristicamente bilobadas, alongadas, medindo quando adultas de 7 a 12 cm, com folíolos unidos em torno da metade do limbo, ápices agudos, superfície adaxial lisa e mucro entre os folíolos. A lâmina foliar é bifoliolada, simétrica e de consistência herbácea, com superfície adaxial glabra e abaxial pilosa (MIYAKE et al., 1986; LUSA e BONA, 2009).

Algumas espécies do gênero *Bauhinia* são utilizadas a medicina folclórica da África, Ásia e América para o tratamento de várias doenças. A infusão das folhas de *Bauhinia forficata* Link é utilizada a medicina popular brasileira como agente diurético, hipoglicemiante, tônico, depurativo, no combate à elefantíase e na redução da glicosúria (PEPATO et al., 2004).

Na literatura existem alguns relatos sobre a ação hipoglicemiante da *Bauhinia forficata* Link com resultados comprovados cientificamente (PEPATO et al., 2004; SILVA et

al., 2002; CASAROLLI et al., 2006). Os experimentos da atividade hipoglicêmica de *Bauhinia forficata* Link, em pacientes diabéticos, foram feitos em 1929 e 1931. Posteriormente demonstrou-se que esta espécie vegetal continha compostos capazes de diminuir a glicemia de cães e coelhos submetidos à hiperglicemia adrenalítica e pancreatizado (JULIANE, 1929, 1931, 1941).

Pepato et al. (2004) constataram, após um tratamento crônico de 31 dias, que ratos diabéticos tratados com chá das folhas de *Bauhinia forficata* Link apresentaram significativa redução na glicemia e os níveis de glucose e ureia na urina, em relação ao grupo controle.

Mesmo sendo destacada há muito tempo a atividade hipoglicemiante desta espécie, poucos estudos conseguiram atribuir valores significativos em relação a sua atividade biológica, deixando espaço também para questões como a utilização de outra parte da planta que possa ter metabólicos secundários de alto valor. O gênero *Bauhinia* é caracterizado pelo acúmulo de flavonoides livres e glicosilados (PIZZOLATTI, 2003).

Os metabólicos secundários (ou produtos naturais) possuem atividades biológicas importantes, muitos são de grande valor comercial para diversas áreas, como: farmacêutica, alimentícia, agrônômica e cosmética.

2.2 Secagem

A secagem de espécies medicinais consiste na preparação do produto para seu armazenamento, com intuito de suprir as necessidades de indústrias farmacêuticas de fitoterápicos, pois plantas frescas exigidas na produção industrial, não teriam estrutura para ser usadas (LORENZI e MATOS, 2002).

De acordo com SOYSAL e ÖZTEKIN (1999), plantas medicinais e aromáticas possuem alto teor de água e alta infestação por microrganismos. Logo, para manter a qualidade do produto é necessário que se faça a secagem logo após a sua coleta, e subsequente o seu armazenamento.

A secagem é definida como processo simultâneo de transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem, que consiste na remoção do excesso de água contida no produto por meio de evaporação (YILBAS et al., 2003). Para ocorrer a atividade de microrganismos, enzimas, e mecanismos metabólicos é necessário que o produto esteja com uma determinada quantidade de água disponível, com isso a secagem é um processo

indispensável, reduzindo a velocidade das reações químicas e o desenvolvimento de microrganismos e beneficiando a sua conservação (CHRISTENSEN e KAUFMANN, 1974).

2.3 Modelagem Matemática

A modelagem matemática é utilizada para representar a cinética de secagem de diversos produtos, envolvendo condições como, temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do ar, dentre outras, durante sua perda de água, sendo fundamentais para simulações matemáticas de camadas espessas do produto. Contudo auxiliam no processo de aprimoramento e desenvolvimento de equipamentos de secagem, pois tem a função de simular o comportamento de cada produto durante a redução do teor de água, sob sucessíveis camadas delgadas (BERBET et al., 1995).

Os modelos matemáticos são ferramentas utilizadas para predizer o tempo necessário para redução do teor de água do produto, sob diferentes condições de secagem, auxiliando nas tomadas de decisão e contribuindo na melhoria da eficiência do processo (ANDRADE et al., 2003).

Segundo MIDILLI et al. (2002), existem três tipos de modelos de secagem em camada delgada que visam descrever a cinética de secagem de produtos higroscópicos. Os modelos teóricos, os semi-empíricos e os empíricos. No modelo teórico geralmente considera-se as operações em condições externas do produto como temperatura e umidade relativa, sendo também considerado a transferência de energia e massa, e seus efeitos dos mecanismos internos. A água presente no interior do produto pode movimentar-se de acordo com o tipo de material que está secando, por diversos mecanismos. Os possíveis mecanismos existentes dentro do método teórico para o transporte de umidade são: difusão líquida, difusão capilar, difusão na superfície, fluxo hidrodinâmico, difusão de vapor e difusão térmica.

Nos modelos semi-empíricos e empíricos considera-se apenas a resistência externa do produto, a temperatura, a umidade relativa e do ar de secagem (MIDILLI et al., 2002; PANCHARIYA et al., 2002).

Entende-se como difusividade a facilidade da saída de água do produto. Como esta saída de água varia de acordo com mudanças de condições de secagem, no caso temperatura e velocidade do ar, pode-se entender ela como não intrínseca ao material. Assim, convencionase chama-la de difusividade efetiva. O coeficiente de difusão engloba todos os efeitos e fenômenos que possam impedir a migração de água, e está diretamente correlacionado com a

difusividade efetiva, onde os valores encontrados são obtidos por ajustes experimentais (OLIVEIRA et al., 2006).

Devido ao fato de serem diversos os compostos químicos e estruturas físicas dos diferentes produtos, o mecanismo para que ocorra a difusão da água nesses produtos acarreta em grande complexidade. Em estudos de cinética de secagem envolvendo o fenômeno da difusão de água, ocorrem grandes variações nos valores do coeficiente de difusão. Além da complexidade dos produtos, também interferem as funções dos diferentes métodos de predição, tipo de material, teor de água, processo de secagem e metodologia (RESENDE et al., 2005).

Goneli et al. (2014a) utilizou em seu estudo, modelos matemáticos que descrevem a cinética de secagem de folhas de erva baleeira, realizando a secagem em diferentes condições controladas de temperatura (40, 50, 60 e 70 °C), sendo submetidos à análise de regressão e seleção do modelo matemático adequado para expressar a relação entre as variáveis estudadas, concluindo que o modelo que mais se ajustou em seu estudo foi o de Midilli. Radünz et al. (2011) em estudo com carqueja, Prates et al. (2012) em estudo com folhas de fruta-de-lobo, Martinazzo et al. (2007b) com folhas de capim limão e Reis et al. (2012) com folhas de manjeriço, também concluíram que o modelo de Midilli foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais de cinética de secagem destas plantas medicinais.

2.4 Propriedades termodinâmicas

As propriedades termodinâmicas podem ser usadas com a função de prever a mínima quantidade de energia requerida para desidratação do produto, fornecendo informações do estado líquido. São necessárias quando a taxa de sorção de água (absorção ou desorção) é dada em função de um processo simultâneo de transferência de calor e massa, para prever parâmetros da cinética do fenômeno de sorção e fazer deduções aproximadas da microestrutura e das mudanças físicas que ocorrem na superfície do produto (AGUERRE et al., 1986). Propriedades termodinâmicas são obtidas através de cálculos relacionados a isotermas de sorção e suas principais funções são aquelas que quantificam as entalpias e entropias diferenciais e integrais indispensáveis em análises da dependência energética e valores preditos dos parâmetros cinéticos nos processos de sorção (KAYA e KAHYAOGU, 2006).

O conhecimento das propriedades termodinâmicas nos processos de secagem de produtos agrícolas é importante fonte de informação para projetar equipamentos de secagem, calcular a energia requerida nesse processo, estudar as propriedades da água adsorvida e avaliar a microestrutura dos alimentos e o estudo dos fenômenos físicos que ocorrem na superfície dos alimentos (Corrêa et al., 2010).

Mudanças de entalpia fornecem uma medida da variação de energia que ocorre quando da interação das moléculas de água com os constituintes do produto durante os processos de sorção. A entropia pode estar associada com a ligação ou repulsão das forças no sistema e está associada com o arranjo espacial da relação água-produto. Assim, entropia caracteriza, ou define, o grau de ordem ou desordem existente no sistema água-produto (McMinn et al., 2005).

A energia livre de Gibbs está relacionada com a energia requerida para transferir moléculas de água de uma superfície sólida para o estado de vapor ou vice-versa, ou seja, equivale a medida do trabalho feito pelo sistema para realizar o processo de dessorção ou o de adsorção (Corrêa et al., 2010).

3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no laboratório de Propriedades Físicas de Produtos Agrícolas, da Faculdade de Ciências Agrárias – FCA, pertencente à Universidade Federal da Grande Dourados, Mato Grosso do Sul. As folhas de pata-de-vaca (*Bauhinia forficata* Link) foram coletadas no Horto de Plantas Medicinais da FCA.

A coleta foi realizada de modo aleatório em dias consecutivos, nas primeiras horas da manhã, quando as folhas não possuíam orvalho em sua superfície, para evitar eventual interferência no teor de água inicial. Após a coleta, as folhas foram devidamente selecionadas de forma homogênea, retirando partes danificadas minimizando as probabilidades de erro.

O teor de água inicial e o teor de água de equilíbrio das amostras foram determinados utilizando o método gravimétrico proposto pela ASABE (2010), utilizando estufa de ventilação forçada a 103 ± 1 °C, durante 24h, em quatro repetições.

Para condução do experimento, utilizou-se secador experimental com quatro bandejas, dotado de um sistema que controla com precisão o fluxo de ar (0,850 m/s), e a temperatura do ar de secagem.

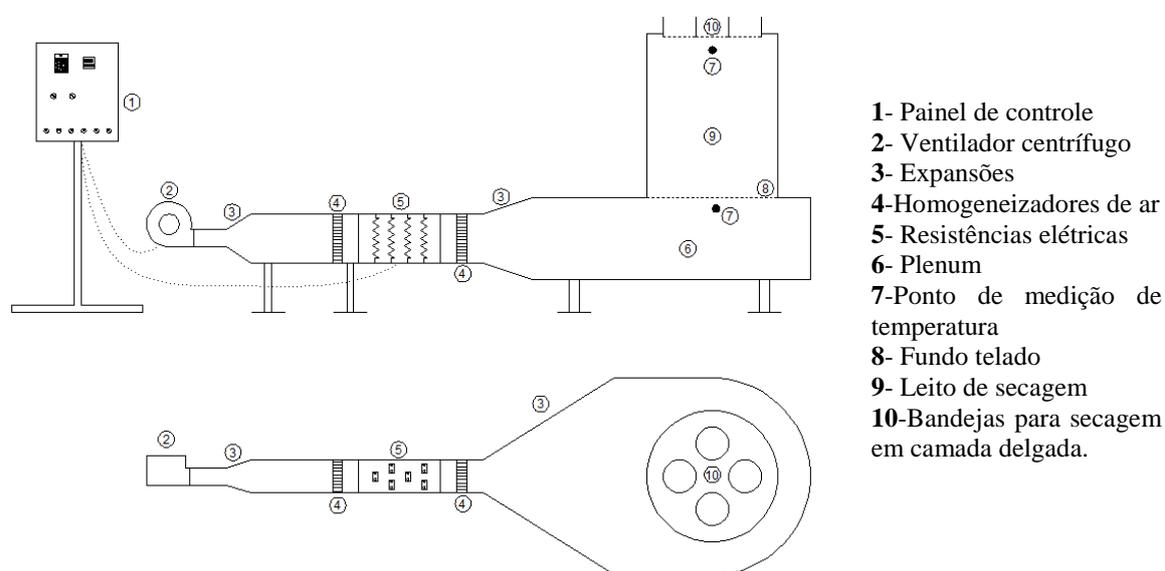


Figura 1. Secador experimental de camada fixa utilizado na secagem das folhas de pata-de-vaca (MARTINS, 2015).

As temperaturas de secagem adotadas foram: 40, 50, 60 e 70 °C, em condições controladas. A temperatura de secagem foi controlada por um termômetro ordinário de mercúrio e a umidade relativa do ar foi monitorada utilizando dois termo-higrômetros instalados próximo ao equipamento de secagem.

As folhas foram distribuídas nas quatro bandejas do secador de forma a cobrir toda superfície perfurada. Cada repetição (bandeja) continha aproximadamente 8,5 g de produto, totalizando aproximadamente 34 gramas de produto para cada temperatura analisada.

A secagem aconteceu até que o teor de água de equilíbrio fosse atingido, ou seja, até que através de pesagens periódicas, utilizando balança analítica digital com resolução de 0,01 g, não se observasse variação na massa do produto. O intervalo inicial de pesagem das amostras foi de 3 minutos para 70 °C e 4 minutos para as demais temperaturas estudadas. O intervalo inicial foi pequeno devido à característica de perda de água das folhas de pata-de-vaca. Assim, foram obtidos todos os dados necessários para o ajuste dos modelos matemáticos aos dados por regressão não linear.

A razão de umidade das folhas de pata-de-vaca em todas as temperaturas foi determinada através da seguinte equação:

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

em que:

RU: razão de umidade do produto, adimensional;

U: teor de água do produto em um determinado tempo, decimal (b.s.);

U_e: teor de água de equilíbrio do produto, decimal (b.s.);

U_i: teor de água inicial do produto, decimal (b.s.).

Foram ajustados aos dados de razão de umidade das folhas de pata-de-vaca, os treze modelos matemáticos apresentados na tabela 1.

TABELA 1. Modelos matemáticos ajustados as curvas de secagem de folhas de pata-de-vaca.

Nome do modelo	Modelo	
Aproximação da difusão	$RU = a.\exp(-k.t) + (1-a)\exp(-k.b.t)$	(2)
Dois termos	$RU = a.\exp(-k_0.t) + b.\exp(-k_1.t)$	(3)
Exponencial de dois termos	$RU = a.\exp(-k.t) + (1-a)\exp(-k.a.t)$	(4)
Henderson e Pabis modificado	$RU = a.\exp(-k.t) + b.\exp(-k_0.t) + c.\exp(-k_1.t)$	(5)
Henderson e Pabis	$RU = a.\exp(-k.t)$	(6)
Logarítmico	$RU = a.\exp(-k.t) + c$	(7)
Midilli	$RU = a.\exp(-k.t^n) + b.t$	(8)
Newton	$RU = \exp(-k.t)$	(9)
Page	$RU = \exp(-k.t^n)$	(10)
Thompson	$RU = \exp\left\{\left[-a(-a^2 + 4.b.t)^{0.5}\right](2.b)^{-1}\right\}$	(11)
Valcam	$RU = a + b.t + c.t^{1.5} + d.t^2$	(12)
Verma	$RU = -a.\exp(-k.t) + (1-a)\exp(-k_1.t)$	(13)
Wang e Singh	$RU = 1 + (a.t) + (b.t^2)$	(14)

em que:

t : tempo de secagem, h;

k, k₀, k₁ : constantes de secagem h⁻¹;

a, b, c, d, n : coeficientes dos modelos.

Para a determinação do coeficiente de difusão efetivo nas diversas temperaturas de secagem, foi utilizada a Eq. 15, fundamentada na teoria de difusão líquida, que considera a forma geométrica do produto como aproximada de uma placa plana com aproximação de oito termos, fundamentada numa solução analítica da segunda lei de Fick.

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-(2n+1)^2 \pi^2 D_i \left(\frac{\theta}{4L}\right)^2\right] \quad (15)$$

em que:

D_i: coeficiente de difusão efetivo (m² s⁻¹);

L: espessura do produto (m);

θ: tempo de secagem (s);

n: número de termos do modelo;

Para a obtenção da espessura (L) das folhas de pata-de-vaca, foi utilizado um micrômetro digital com resolução de 0,001 mm. Foram realizadas 50 repetições, 10 repetições para cada dia de procedimento, em quatro pontos de cada lado da nervura central da folha e em sete pontos sobre as nervuras das folhas (Figura 2).

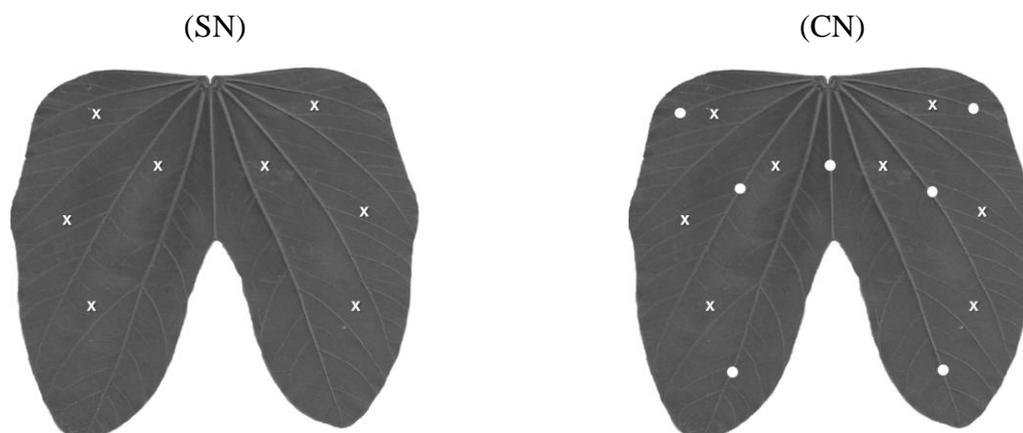


Figura 2. Pontos de obtenção da espessura das folhas de pata-de-vaca fora da nervura, à esquerda (SN); e obtenção da espessura das folhas de pata-de-vaca considerando pontos fora e sobre as nervuras, à direita (CN).

Posteriormente, foi calculada a média da espessura considerando os pontos sem nervura (SN), que foi de 0,250 mm e a média da espessura das folhas de pata-de-vaca considerando os pontos fora e sobre a nervura (CN), que foi de 0,583 mm.

Após a seleção do modelo de representação da difusividade efetiva, realizou-se um teste de hipótese de igualdade dos modelos utilizando o método de identidade de modelos descrita por REGAZZI (2003). Este método possibilita a análise de equivalência entre os modelos empregados e objetiva estabelecer uma única equação para descrever o fenômeno de estudo.

Os parâmetros do modelo linear utilizados para descrever o efeito da espessura das folhas de pata-de-vaca na difusividade efetiva (a_i e b_i), foram comparados entre si para verificação de sua igualdade. As hipóteses formuladas foram:

- H_0 : $a_1=a_2$ e $b_1=b_2$.
- H_a : ocorre pelo menos uma desigualdade entre os parâmetros.

Segundo REGAZZI (2003), para obtenção das formas do modelo completo das equações com restrição foram consideradas as variáveis dummy (D): sendo $D_i = 1$ se a observação y_{ij} pertence ao grupo i ; e $D_i = 0$ em caso contrário;

A regra de decisão baseou-se no teste de qui-quadrado (χ^2) de acordo com a equação 17.

$$\chi^2_{\text{calculado}} = -N \ln \left(\text{SQR}_{\Omega} / \text{SQR}_{w_i} \right) \quad (17)$$

sendo:

N : numero de observações;

SQR_{Ω} : soma dos quadrados residuais do modelo completo;

SQR_{w_i} : soma dos quadrados residuais do espaço paramétrico restrito.

O valor tabelado de (χ^2) é função do nível de significância α e do número de graus de liberdade, descrito na Eq. 18.

$$v = P_{\Omega} - P_{w_i} \quad (18)$$

sendo:

v : graus de liberdade do modelo;

P_{Ω} : número de parâmetros do modelo completo;

P_{w_i} : número de parâmetros do modelo com restrição.

Para comparação dos modelos de difusão foram testadas as duas condições de espessuras mencionadas (0,250 e 0,583 mm).

3.1 Influência da temperatura

O comportamento do coeficiente de difusão efetivo em relação às diferentes temperaturas aplicadas durante o processo de secagem foi avaliado de acordo com a equação de Arrhenius, descrita na Equação 16:

$$D_{\text{ef}} = D_0 \exp \left(\frac{E_a}{R T_a} \right) \quad (16)$$

em que:

D_0 : fator pré-exponencial;

R: constante universal dos gases, $8,314 \text{ kJ kmol}^{-1}\text{K}^{-1}$;

T_a : temperatura, K; e

E_a : energia de ativação, kJ mol^{-1} .

3.2 Propriedades termodinâmicas

As propriedades termodinâmicas, associadas ao processo de secagem, foram determinadas de acordo com o método proposto por JIDEANI e MPOTOKWANA (2009). Conforme nas equações 19, 20 e 21, respectivamente, entalpia específica, entropia específica e energia Livre de Gibbs.

$$h = E_a - RT_a \quad (19)$$

$$s = R \left(\ln D_0 - \ln \frac{k_B}{h_p} - \ln T_a \right) \quad (20)$$

$$G = h - T_a s \quad (21)$$

em que:

h : entalpia, J mol^{-1} ;

s : entropia, J mol^{-1} ;

G : energia livre de Gibbs, J mol^{-1} ;

k_B : constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$; e

h_p : constante de Planck, $6,626 \times 10^{-34} \text{ J s}^{-1}$.

3.3 Análise estatística

Para análise do grau de ajuste de cada modelo, foram consideradas as magnitudes do coeficiente de determinação (R^2), do erro médio relativo (P), do desvio padrão da estimativa (SE) e o comportamento da distribuição dos resíduos. Os valores do erro médio relativo (P) e do desvio padrão da estimativa (SE) foram calculados de acordo com as Equações 22 e 23:

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (22)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (23)$$

em que:

Y: valor observado experimentalmente;

\hat{Y} : valor estimado pelo modelo;

n: número de observações experimentais; e

GLR: graus de liberdade do modelo (número de observações menos o número de parâmetros do modelo).

Os dados experimentais provenientes da cinética de secagem de folhas de pata-de-vaca foram analisados e submetidos à análise de regressão não linear, através do método de Gauss-Newton e seleção o modelo matemático adequado para expressar a relação entre as variáveis estudadas, empregando o software Statistica 8.0.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Cinética de secagem das folhas de pata-de-vaca

O modelo de Wang e Singh apresentou valores de coeficiente de determinação (R^2) inferior a 0,95 (Tabela 2), que de acordo com KASHANINEJAD et al. (2007) é o valor mínimo para obter uma representação satisfatória de modelos ao processo de secagem. Segundo MADAMBA et al. (1996), o coeficiente de determinação não é um parâmetro correto para esse tipo de caracterização quando analisado de forma isolada. Desta forma torna-se necessária a análise conjunta do coeficiente de determinação e do erro médio relativo e desvio padrão da estimativa.

TABELA 2. Parâmetros estatísticos obtidos para os treze modelos utilizados para representar o processo de cinética de secagem em camada delgada em diferentes temperaturas das folhas de pata-de-vaca.

Modelos	40 °C			50 °C			60 °C			70 °C		
	SE	P	R^2									
(2)	0,0470	6,019	0,965	0,0208	10,602	0,994	0,0142	7,354	0,998	0,0183	8,217	0,997
(3)	0,0302	3,714	0,986	0,0214	10,601	0,994	0,0164	5,740	0,998	0,0190	8,210	0,998
(4)	0,0458	6,020	0,965	0,0432	10,180	0,974	0,0149	5,784	0,998	0,0206	14,678	0,996
(5)	0,0035	0,700	0,999	0,0079	6,7000	0,999	0,0165	7,739	0,998	0,0139	6,025	0,999
(6)	0,0312	6,715	0,984	0,0330	8,330	0,985	0,0149	5,739	0,998	0,0187	11,704	0,997
(7)	0,0301	3,429	0,986	0,0339	8,301	0,985	0,0145	7,983	0,998	0,0177	7,679	0,998
(8)	0,0141	4,218	0,997	0,0299	16,224	0,989	0,0153	6,751	0,998	0,0164	10,159	0,998
(9)	0,0447	6,020	0,965	0,0421	10,181	0,975	0,0144	5,784	0,998	0,0178	11,363	0,997
(10)	0,0355	9,617	0,979	0,0322	13,697	0,986	0,0142	5,234	0,998	0,0189	11,294	0,997
(11)	0,0420	9,954	0,971	0,0383	14,509	0,980	0,0149	5,789	0,998	0,0189	11,369	0,997
(12)	0,0257	4,862	0,990	0,0299	6,098	0,990	0,0120	6,566	0,999	0,0155	6,779	0,998
(13)	0,0471	6,000	0,970	0,0444	9,782	0,975	0,0142	6,149	0,998	0,0198	9,506	0,997
(14)	0,0577	10,180	0,950	0,0830	46,639	0,906	0,0390	28,012	0,985	0,0424	21,021	0,984

Segundo SIQUEIRA et al. (2012), a medida que os valores de SE são menores melhor será o ajuste dos modelos aos dados experimentais. Neste caso, é possível afirmar que a capacidade de um modelo descrever com finalidade determinado processo físico é

inversamente proporcional ao valor do desvio padrão da estimativa (DRAPER e SMITH, 1998).

Com exceção dos modelos de Henderson e Pabis modificado (5), Logarítmico (7), Valcam (12) e Verma (13) todos os demais modelos apresentaram valor do erro médio relativo (P) maior que 10%, para uma ou mais condição de secagem (Tabela 2), ou seja, esses modelos não podem ser recomendados, já que os valores aceitáveis costumeiramente são inferiores a este valor (MOHAPATRA e RAO, 2005; AGUERRE et al., 1989). Desta forma, os modelos de Henderson e Pabis modificado, Logarítmico, Valcam, se destacam por apresentarem baixos valores de P e SE e elevados valores de R^2 (Tabela 2) e baixos valores de P e SE, em todas as temperaturas do ar de secagem.

O modelo escolhido para representar as curvas de secagem de pata-de-vaca foi o modelo de Valcam, por apresentar forma simplificada e menor número de coeficientes, sendo de fácil utilização em processos de simulação de secagem.

Para que as folhas de pata-de-vaca atingissem no final da secagem o teor de água de aproximadamente $0,10 \pm 0,01$ decimal b.s. foram necessárias 1,8; 1,72; 0,87 e 0,45 horas, respectivamente, para as temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C (Figura 3). Observa-se ainda a aplicabilidade do modelo de Valcam para prever a secagem das folhas de para-de-vaca, evidenciada pela proximidade dos valores observados na condução do experimento aos valores estimados pelo modelo.

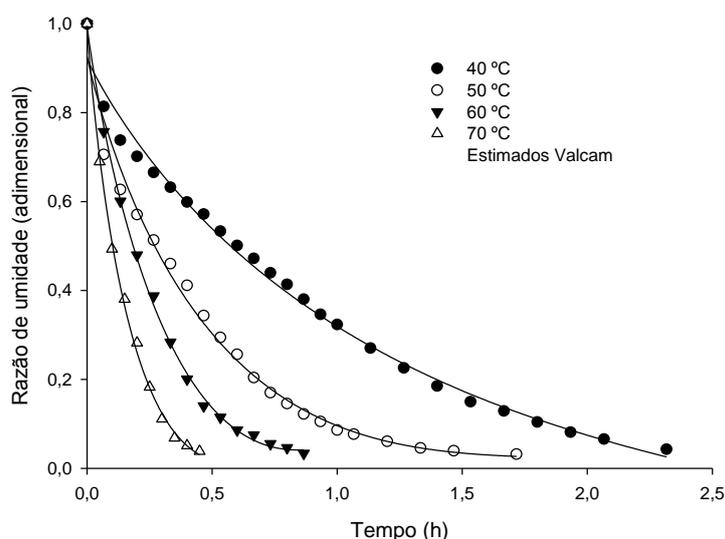


Figura 3. Valores experimentais e estimados de razão de umidade pela estimativa dos coeficientes do modelo de Valcam, nas diferentes temperaturas de secagem.

À medida que se aumenta a temperatura do ar de secagem, o tempo necessário para retirar água do produto decresce (Figura 3). Este fenômeno já foi relatado por diversos autores que trabalharam com cinética de secagem de folhas (GANHAM et al. 2005, PREMI et al. 2010, ROCHA et al. 2012, RADÜNZ et al. 2010, TASIRIN et al., 2014).

TABELA 3. Valores estimados dos parâmetros para o modelo de Valcam e coeficiente de difusão efetivo, considerando a espessura da nervura (CN) e desconsiderando a espessura da nervura (SN) para as diferentes temperaturas de secagem das folhas de pata-de-vaca.

Temperatura (°C)	Coeficientes				D (m ² s ⁻¹)	
	a	b	C	d	SN	CN
40	0,93522	-1,58374	1,41794	-0,44049	0,6423x10 ⁻¹¹	1,7829x10 ⁻¹¹
50	0,92648	-2,75860	2,64556	-0,71753	1,3869x10 ⁻¹¹	3,8493x10 ⁻¹¹
60	0,99534	-4,60885	5,09702	-1,42667	2,2194x10 ⁻¹¹	6,1599x10 ⁻¹¹
70	0,99253	-8,60268	13,88675	-6,33544	3,9491x10 ⁻¹¹	10,961x10 ⁻¹¹

Dentre os coeficientes do modelo de Valcam (Tabela 3) que foram ajustados aos dados obtidos durante o processo de secagem das folhas de pata-de-vaca, nas diferentes temperaturas, o coeficiente “a” não apresentou comportamento definido, os coeficientes “b” e “d” decresceram de acordo com o aumento de temperatura e o coeficiente “c” se elevou conforme ocorreu incremento de temperatura no ar de secagem.

4.2. Determinação do coeficiente de difusão efetivo

Os coeficientes “b” e “c” podem ser representados através de equações lineares:

- $b = (0,2291x + 8,2104.t)$ apresentando R² de 0,90;
- $c = (0,3986 - 16,1600.t^{1.5})$ apresentando R² de 0,92.

A Equação 24 é consequência da junção entre as Eqs. 1 e 12, levando em consideração os valores médios dos coeficientes “a” e “d” que não tiveram comportamento definido ou não puderam ser representados por meio de equação.

$$U = U_e + (U_i - U_e) \left[0,9624 - (0,2291x + 8,2104.t) + (0,3986x - 16,1600.t^{1.5}) - 2,2300.t^2 \right] \quad (24)$$

em que:

t: tempo de secagem em segundos;

x: temperatura em graus Celsius.

Observa-se que os valores do coeficiente de difusão efetivo calculados sem considerar a espessura das nervuras da folha (Tabela 3) e o coeficiente de difusão efetivo calculado considerando os pontos fora e sobre a nervura das folhas, elevam-se conforme aumenta a temperatura do ar de secagem (Tabela 3). Martinazzo et al. (2007b), trabalhando com folhas de capim-limão e Prates et al. (2012), estudando folhas de fruta-de-lobo, verificaram o mesmo comportamento.

A variação dos valores do coef. de difusão SN foi de $6,4236 \times 10^{-12}$ a $3,9491 \times 10^{-11}$. Já os valores do coef. de difusão efetivo CN ficaram na faixa entre $1,7829 \times 10^{-11}$ e $1,0961 \times 10^{-10}$. De acordo com Zogzas et al. (1996), os valores do coeficiente de difusão variam de 10^{-11} a $10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ para os produtos do ramo alimentício, estando o coeficiente de difusão calculado para as folhas de pata-de-vaca a partir dos dados CN dentro desta faixa de variação.

Conforme o teste de identidade de modelo, os valores de qui-quadrado tabelado (χ^2_{tabelado}) foram menores que os valores de qui-quadrado calculado ($\chi^2_{\text{calculado}}$), para o coeficiente efetivo das folhas de pata-de-vaca, 5,991 e 35,963, respectivamente. Desta forma, a hipótese formulada H_0 é rejeitada, constatando que os modelos lineares aplicados para representar esse fenômeno, diferem estatisticamente entre si, indicando que a utilização de apenas um modelo para representar a variação do coeficiente de difusão efetivo das folhas de pata-de-vaca em função da temperatura não é representativa. Com isso, é possível afirmar que ao considerar as nervuras das folhas no cálculo de difusividade efetiva ocorre variação significativa desses valores. Desta forma, torna-se necessário a padronização das espessuras das folhas utilizadas e/ou que ocorra especificação dos pontos a serem utilizados para obter a espessura das folhas de pata-de-vaca na obtenção do coeficiente de difusão efetivo.

4.3 Influência da temperatura

Pode-se observar que a representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo (SN e CN) e as temperaturas absolutas na secagem das folhas de pata-de-vaca foi satisfatória (Figura 4). A inclinação da curva da representação de Arrhenius fornece a relação E_a/R , enquanto sua interseção com o eixo das ordenadas indica o valor de D_0 .

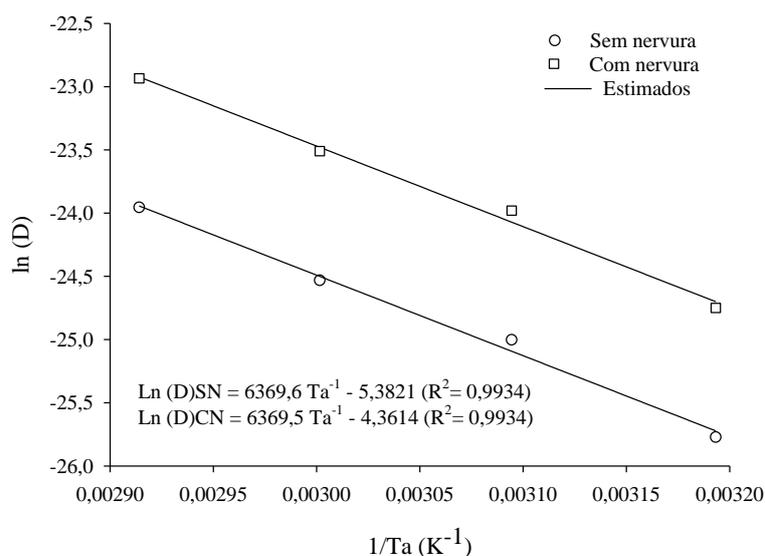


Figura 4. Representação de Arrhenius para a relação entre a difusividade efetiva (SN e CN) e a temperatura absoluta na secagem das folhas de pata-de-vaca.

As Eqs. 25 e 26 apresentam o coeficiente da equação de Arrhenius ajustada para os coeficientes de difusão efetivo (Eq. 17) SN e CN das folhas de pata-de-vaca.

$$D_{\text{SN}} = 0,0046 \exp(52,956 / RT_a) \quad (25)$$

$$D_{\text{CN}} = 0,0128 \exp(52,956 / RT_a) \quad (26)$$

A energia de ativação foi de 52,95 kJ mol⁻¹ para as folhas de pata-de-vaca, que difere do valor encontrado por GONELI et al. (2014b), para folhas de aroeira (74,96 kJ mol⁻¹), e ROCHA et al. (2012), na secagem de tomillo (77,16 kJ mol⁻¹). Essa diferença pode ser relacionada à composição química de cada folha e à espessura das mesmas. O que torna ainda mais importante a padronização da espessura da folha,

A energia de ativação já foi definida como sendo, a energia fundamental para quebrar a barreira encontrada pelas moléculas de água, quando as mesmas migram para a superfície do produto no decorrer do processo de secagem (SHARMA e PRASAD, 2004).

4.4 Propriedades termodinâmicas

Analisando as propriedades termodinâmicas (Tabela 4), verifica-se que a entalpia específica diminui com o aumento de temperatura, ou seja, quanto maior a temperatura menor é a demanda de energia necessária para o processo de secagem.

TABELA 4. Propriedades termodinâmicas do processo de secagem das folhas de *Bauhinia forficata* Link.

Variáveis analisadas	40 °C		50 °C		60 °C		70 °C	
	SN	CN	SN	CN	SN	CN	SN	CN
h (kJ mol ⁻¹)	50,3532	50,353,2	50,2701	50,2701	50,1869	50,1869	50,1038	50,1038
s (kJ mol ⁻¹ K ⁻¹)	-0,2900	-0,2759	-0,2903	-0,2762	-0,2905	-0,2764	-0,2908	-0,2767
G (kJ mol ⁻¹)	141,1889	136,7800	144,0908	139,5411	146,9953	142,3048	149,9020	145,0710

A entropia específica apresentou o mesmo comportamento, já a energia livre de Gibbs aumentou de acordo com a elevação dos valores de temperatura.

Os valores positivos da energia livre de Gibbs mostram que o processo de secagem para as folhas de pata-de-vaca não ocorre espontaneamente e que necessita de uma fonte de energia para que ocorra reação que torne os locais de sorção mais disponíveis. Segundo CORRÊA et al. (2010), essa energia deve ser retirada do meio no qual se encontra o produto. Com o aumento de temperatura de secagem, a energia livre de Gibbs também aumenta, esse fenômeno é observado claramente com os respectivos valores apresentado (Tabela 4). A entropia diminui para as mesmas condições, este resultado também foi constatado por Martins et al. (2015), na secagem de folhas de timbó.

5. CONCLUSÕES

Dentre todos os treze modelos testados os modelos de Valcam, Henderson e Pabis modificado e Logarítmico, podem ser utilizados para representar a cinética de secagem para as folhas de pata-de-vaca.

A energia de ativação foi de $52,95 \text{ kJ mol}^{-1}$, obtida através da equação de Arrhenius que estabelece a dependência da difusividade em relação a temperatura.

O coeficiente de difusão efetivo aumenta com a elevação de temperatura do ar de secagem.

É necessária a padronização e/ou especificação dos pontos de medição da espessura da folha.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUERRE, R.J.; SUAREZ, C.; VIOLLAZ, P.E. Enthalpy entropy compensation in sorption phenomena: application to the prediction of the effect of temperature on food isotherms. **Journal of Food Science**, v.51, n.6, p.1547-1549, 1986.

AGUERRE, R.J.; SUAREZ, C.; VIOLLAZ, P.E. New BET type multilayer sorption isotherms – Part II: Modelling water sorption in foods. **Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie**, v.22, n.4, p.192-195, 1989.

ANDRADE, E.T.; BORÉM, F.M.; HARDOIM, P.R. Cinética de secagem do café cereja, bóia e cereja desmucilado, em quatro diferentes tipos de terreiros. **Revista Brasileira de Armazenamento – Especial Café**, v.1, n.7, p.37-43, 2003.

ASABE - American Society of Agricultural and Biological Engineers. 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.

BERBERT, P.A.; QUEIROZ, D.M.; SILVA, J.S.; FILHO, J.B.P. Simulation of coffee drying in a fixed bed with periodic airflow reversal. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.60, n.3, p.167-173, 1995.

CAZAROLLI, L.H.; ZANATTA, L.; JORGE, A.P.; DE SOUZA, E.; HORST, H.; WOHL, V. M.; PIZZOLATTI, M.G.; SZPOGANICZ, B.; SILVA, F.R.M.B. follow-up studies on glycosylated flavonoids and their complexes with vanadium: their anti hyperglycemic potential in diabetes. **Chemico-Biological Interactions**, Florianópolis, v.163, n.3, p.177-191, 2006.

CHRISTENSEN, C.M.; KAUFMANN, H.H. Microflora. In: CHRISTENSEN, C. M. Storage of cereal grain and their products. St. Paul: **American Association of Cereals Chemists**, [s.n.], p.158-192, 1974.

CORRÊA, P.C.; OLIVEIRA, G.H.H.; BOTELHO, F.M.; GONELI, A.L.D.; CARVALHO, F.M. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**: v.57, n.5, p.595-601, 2010.

DRAPER, N.R.; SMITH, H. Applied regression analysis. **3. Ed. Nova Iorque John: Wiley e Sons**: p.712, 1998.

DUARTE, M.R.; SILVA, A.G.; COSTA, R.E.; FARIA, L.T. *Bauhinia variegata*: diagnose morfoanatômica e análise comparativa entre exemplares de regiões climáticas distintas. **Lat Am J Pharm**; v.26, n.6, p.837-845, 2007.

FEIJÓ, A.M.; BUENO, M.E.N.; CEOLIN, T.; LINCK, C.L.; SCHWARTZ, E.; LANGE, C.; MEINCKE, S.M.K.; HECK, R.M.; BARBIERI, R.L.; HEIDEN, G. Plantas medicinais utilizadas por idosos com diagnóstico de *Diabetes mellitus* no tratamento dos sintomas da doença. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**: v.14, n.1, p.50-56, 2012.

FORTUNATO, R.H. Revision del genero *Bauhinia* (*Cerdideae, Casalpinoidea, Febaceae*) para la. **Argentina. Darwiniana**: v.27, n.1-4, p.527-557, 1986.

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

GONELI, A.L.; 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**, v.44, n.1, p.56-64, 2014b.

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* D.C. **Revista Brasileira Plantas Medicinas**, v.16, n.2, p.434-443, 2014a.

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

JULIANE, C.; Ação hipoglicemiante *Bauhinia forficata* Link. Novos estudos clínicos e experimentais. **Jornal dos Clínicos**, Florianópolis, [s.n.], v.3, p.93-112, 1941.

JULIANE, C.; Ação hipoglicemiante *Bauhinia forficata* Link. Novos estudos clínicos e experimentais. **Revista Sudamericana de Endocrinologia, Imunologia e Quimioterapia**, Florianópolis, v.14, n.3, p.326-334, 1931.

JULIANE, C.; Ação hipoglicemiante da unha-de-vaca. **Revista Médica Farmacologia Química e Fisiologia**, Florianópolis, v.2, n.1, p.165-169, 1929.

KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L.G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**: v.78, n.1, p.98-108, 2007.

KAYA, S.; KAHYAOGU, T. Influence of dehulling and roasting process on the thermodynamics of moisture adsorption in sesame seed. **Journal of Food Engineering**: v.76, n.2, p.139-147, 2006.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 2ª ed. Nova Odessa: Plantarum, v.2, 352p, 1998.

LORENZI, H. **Árvores Brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 5. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, v.1, 384p, 2008.

LORENZI, H.; MATOS, F.J.A. **Plantas medicinais no Brasil: nativas e exóticas**. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 512p, 2002.

LUSA, M.G.; BONA, C. Análise morfoanatômica comparativa da folha de *Bauhinia forficata* Link e *B. variegata* Linn. (*Leguminosae, Caesalpinioideae*). **Acta Botanica Brasilica**: v.23, n.1, p.196-211, 2009.

MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. The Thin-layer Drying Characteristics of Garlic Slices. **Journal of Food Engineering**, v.29, n.1, p.75-97, 1996.

MARTINAZZO, A.P.; CORRÊA, P.C.; MELO, E.C.; BARBOSA, F.F. Difusividade efetiva em folhas de *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf submetidas à secagem com diferentes comprimentos de corte e temperaturas do ar. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v.9, n.1, p.68-72, 2007a.

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

MARTINS, E. A. S. **Dimensionamento e experimentação de um secador de leito fixo para a secagem de produtos agrícolas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 123p, 2015.

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). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.3, p.238-244, 2015.

MCMINN, W.A.M.; AL-MUHTASEB, A.H.; MAGEE, T.R.A.; Enthalpyentropy compensation in sorption phenomena of starch materials. **Journal of Food Engineering**, v.38, n.5, p.505–510, 2005.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z.A. New model for single-layer drying. **Drying Technology**, v.20, n.7, p.1503-1513, 2002.

MIYAKE E.T.; AKISUE G.; AKISUE M.K. Caracterização farmacognóstica da pata de vaca (*Bauhinia forficata* Link). **Revista Brasileira Farmacogn**, v.1, n.1, p.58-68. 1986.

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.

OLIVEIRA, F.; KATO, E.T.M.; RODRIGUES, R.F.O.; BASSO, S.L. Mitos e verdades sobre pata-de-vaca – *Bauhinia forficata* Link – **Uma revisão. Lecta-USF**, v.19, n.1, p.07-20, 2001.

OLIVEIRA, R.A.; OLIVEIRA, W.P.; PARK, K.J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. **Engenharia Agrícola**, v.26, n.1, p.181-189, 2006.

PANCHARIYA, P.C.; POPOVIC, D.; SHARMA, A.L. Thin-layer modeling of black tea drying process. **Journal of Food Engineering**, v.52, n.4, p.349-357, 2002.

PEPATO, M.T.; BAVIERA, A.M.; VEDRAMII, R.C.; BRUNETTI, I.L. Evaluation of toxicity after one-months treatment with *Bauhinia forficata* decoction in streptozotocin-induced diabetic rats. **BMC Complementary and alternative medicine**, Florianópolis, v.4, n. 7, p.1-7, 2004.

PIZZOLATTI, M.G. Flavonóides Glicosilados das Folhas e Flores de *Bauhinia Forficata* Link (Leguminosae), **Química Nova**, v.26, n.4, p.466-469, 2003.

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

PREMI, M.; SHARMA, H.K.; SARKAR, B.C.; SINGH, C. Kinetics of drumstick leaves (*Moringa oleifera*) during convective drying. **African Journal of Plant Science**, v.4, n.10, p.391-400, 2010.

RADÜNZ, L.L.; MOSSI, A.J.; ZAKRZEWSKI, C.A.; AMARAL, A.S.; GRASSMANN, L. Análise da cinética de secagem de folhas de sálvia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.9, p.979-986, 2010.

RATES, S. M. K. Plants as source of drugs. **Toxicon**, v.39, n.5, p.603-613, 2001.

REGAZZI, A.J. Teste para verificar a igualdade de parâmetros e a identidade de modelos de regressão não linear. **Revista Ceres**. v.50, n.287, p.9-26, 2003.

REIS, R.C.; 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. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.12, p.1346-1352, 2012.

RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; MARTINAZZO, A.P.; RIBEIRO, R.M. Contração volumétrica na difusão líquida durante o processo de secagem do arroz em casca. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.30, n.2, p.163-171, 2005.

ROCHA, R.P.; MELO, E.C.; CORBÍN, J.B.; BERBERT, P.A.; DONZELES, S.M.L.; TABAR, J.A. Cinética del secado de tomillo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.6, p.675-683, 2012.

SHARMA, G.P.; PRASAD, S. Effective moisture diffusivity of garlic cloves undergoing microwave-convective drying. **Journal of Food Engineering**, v.65, n.4, p.609-617, 2004.

SILVA, F.R.M.B.; SZPOGANICZ, B.; PIZZOLATTI, M.G.; WILLRICH, M.A.V.; DE SOUZA, E. Acute effect of bauhinia forficata on serum glucose levels in normal ad alloxan induced diabetic rats. **Journal of Ethnopharmacology**, Florianopolis, v.83, n.1-2, p.33-37, 2002.

SILVA, M.I.G.; MELO, C.T.V.; VASCONSELOS, L.F.; CARVALHO, A.M.R.; Sousa, F.C.F. Bioactivity and potential therapeutic benefits of some medicinal plants from the Caatinga (semi-arid) vegetation of Northeast Brazil: a review of the literature. **Revista Brasileira Farmacogn**, v.22, n.1, p.193-207, 2012.

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

SOYSAL, Y.; ÖZTEKIN, S. Equilibrium moisture content equations for some medicinal and aromatic plants. **Journal agricultural research**, v. 74, n. 3, p. 317- 324, 1999.

TASIRIN, S.M.; PUSPASARI, I.; LUN, A.W.; CHAI, P.V.; LEE, W.T. Drying of kaffir lime leaves in a fluidized bed dryer with inert particles: Kinetics and quality determination. **Industrial Crops and Products**, [s.n.], v. 61, p. 193-201, 2014.

TROJAN-RODRIGUES, M.; ALVES, T.L.S.; SOARES, G.L.G.; RITTER, M.R. Plants used as antidiabetics in popular medicine in Rio Grande do Sul, southern Brazil. **Journal of Ethnopharmacology**, v.139, n.1, p.155-163, 2012.

VIANA, J.S.; GONÇALVES, E.P.; ANDRADE, L.A.; OLIVEIRA, L.S.B.; SILVA, E.O. Crescimento de Mudas de *Bauhinia Forficata* Link em Diferentes Tamanhos de Recipientes. **Floresta**, v.38, n.4, p.663-71, 2008.

YILBAS, B. S.; HUSSAIN, M. M.; DINCER, I. Heat and moisture diffusion in slab products to convective boundary condition. **Heat and Mass Transfer**, v. 39, n. 5-6, p. 471-476, 2003.

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