

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO –  
CAMPUS RIO VERDE

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

**AJUSTE DE MODELOS MATEMÁTICOS NA SECAGEM DA POLPA  
DE CAGAITA EM LEITO DE ESPUMA**

Autora: Maisa Dias Cavalcante

Orientador: Dr. Celso Martins Belisário  
Coorientador: Dr. Daniel Emanuel Cabral  
Oliveira

Rio Verde, Goiás

Fevereiro, 2019

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO –  
CAMPUS RIO VERDE

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

**AJUSTE DE MODELOS MATEMÁTICOS NA SECAGEM DA POLPA  
DE CAGAITA EM LEITO DE ESPUMA**

Autora: Maisa Dias Cavalcante  
Orientador: Dr. Celso Martins Belisário  
Coorientador: Dr. Daniel Emanuel Cabral  
Oliveira

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM TECNOLOGIA DE ALIMENTOS, no Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Alimentos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – Linha de pesquisa: Inovação e desenvolvimento de produtos a partir de frutos nativos, com ênfase em frutos do Cerrado.

Rio Verde, Goiás

Fevereiro, 2019

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

CM231a Cavalcante, Maisa  
Ajuste de modelos matemáticos na secagem da polpa de cagaíta em leito de espuma / Maisa Cavalcante; orientador Celso Belisário; co-orientador Daniel Emanuel Oliveira. -- Rio Verde, 2019.  
31 p.

Dissertação (Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Alimentos) -- Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2019.

1. Eugenia dysenterica. 2. Energia de ativação. 3. Difusão líquida. I. Belisário, Celso, orient. II. Oliveira, Daniel Emanuel, co-orient. III. Título.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA DE ALIMENTOS**

**AJUSTES DE MODELOS MATEMÁTICOS NA SECAGEM  
DA POLPA DA CAGAITA EM LEITO DE ESPUMA**


Autora: Maisa Dias Cavalcante  
Orientador: Celso Martins Belisário

TITULAÇÃO: Mestre em Tecnologia de Alimentos – Área de  
Concentração em Tecnologia e Processamento de Alimentos.

APROVADA em 27 de fevereiro de 2019.

  
Drª. Juliana de Fátima Sales  
Avaliadora externa  
IF Goiano/Rio Verde

  
Dr. Osvaldo Resende  
Avaliador interno  
IF Goiano/Rio Verde

  
Dr. Daniel Emanuel Cabral de  
Oliveira  
Avaliador interno  
IF Goiano/Iporá

  
Dr. Celso Martins Belisário  
Presidente da banca  
IF Goiano/Rio Verde

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	Cagaita.....	1
1.2.	Secagem.....	2
1.2.1.	Secagem em leito de espuma.....	2
1.2.2.	Emulsificante para formação da espuma.....	3
1.3.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	4
2.	OBJETIVOS.....	6
2.1.	Geral.....	6
2.2.	Específicos.....	6
CAPÍTULO I: AJUSTE DE MODELOS MATEMÁTICOS NA SECAGEM DA POLPA DE CAGAITA EM LEITO DE ESPUMA.....		7
RESUMO.....		7
ABSTRACT.....		7
3.1.	INTRODUÇÃO.....	9
3.2.	MATERIAL E MÉTODOS.....	10
3.2.1.	Aquisição dos frutos.....	10
3.2.2.	Preparação das amostras.....	10
3.2.3.	Cinética de secagem.....	10
3.3.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	15
3.4.	CONCLUSÃO.....	19
3.5.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	20

## AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus por sempre estar ao meu lado, sempre atento a cada detalhe da minha vida, iluminando e guiando em cada etapa.

Aos meus pais, Manoel Jorge e Maria Isabel, por serem meu porto seguro, sempre apoiando, pelas conversas e por sempre terem me ouvido quando dialogava sobre os trabalhos, pesquisas e análises sempre motivando ir atrás dos objetivos pessoais e profissionais.

Ao meu irmão Thomas Jefferson, por sempre estar ao meu lado, pelo apoio e cumplicidade.

A todos meus familiares e amigos que sempre estão comigo em todos os momentos da minha vida.

Ao meu companheiro, amigo e noivo, Renivon Junior, por estar sempre me apoiando, auxiliando e conversando sobre meus objetivos e, conseqüentemente, contribuindo para que ocorram da melhor forma possível.

A família Renovação Carismática Católica por sempre serem instrumentos de Deus no meu caminhar sempre motivando a ser alguém melhor, semelhante a Cristo.

Em especial ao meu orientador, Dr. Celso Martins Belisário, que esteve ao meu lado ajudando no desenvolvimento de ideias, conversando, sendo amigo, educador e companheiro. Agradeço, imensamente, por todo o apoio e por todo o aprendizado proporcionado durante a caminhada.

Ao meu coorientador, Dr. Daniel Oliveira, por todos os ensinamentos transmitidos e apoio.

Ao professor Dr. Osvaldo Resende por me permitir utilizar o seu Laboratório de Pós-colheita de Produtos Vegetais durante todo o período do mestrado, por sua disponibilidade em transferir seu conhecimento e pelo aceite em compor minha banca.

A professora, Dr<sup>a</sup>. Juliana de Fátima Sales, pelo aceite em compor minha banca, com suas correções e contribuições para a melhoria do trabalho.

Agradeço aos colegas de laboratório Fernanda Caroline Souza Cabral e Weder Nunes Ferreira Júnior, por todo o auxílio para a execução das análises, principalmente a Geisa Maia que foi meu braço direito no desenvolvimento do projeto e é claro por todas as conversas e risadas.

A minha amiga Bheatriz Freitas, pela amizade, companheirismo em projetos e além de

apresentar a fazenda com o potencial de coleta dos frutos. A todos da Fazenda Gameleira, por fornecerem os frutos de cagaita para a execução do projeto, principalmente ao senhor João Rodrigues que auxiliou na coleta.

Ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde e ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Alimentos, pelo auxílio e contribuições para minha formação acadêmica e profissional.

Agradeço ao Laboratório de Fitoquímica, Pós-colheita de Produtos Vegetais, Frutas e Hortaliças do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Rio Verde, pela disponibilização de equipamentos, reagentes e laboratório utilizados durante as pesquisas do mestrado.

A FAPEG, pela disponibilização de bolsa de estudos e apoio às pesquisas durante o período da pós-graduação.

E a todos que de maneira direta ou indireta contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional, meu MUITO OBRIGADA!

## **BIOGRAFIA DO AUTOR**

Maisa Dias Cavalcante, nascida dia 27 de setembro de 1995 em Quirinópolis-Goiás, filha de Manoel Jorge Cavalcante Neto e Maria Isabel Dias Cavalcante. Iniciou a graduação em Engenharia de Alimentos no ano de 2013, em que foi aluna de Iniciação Científica (2014-2017). Em setembro de 2017 ingressou no Mestrado em Tecnologia de Alimentos – Campus de Rio Verde-Goiás.



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Visão geral da cagaiteira: tronco, folhas, inflorescência e fruto.. .....	1
Figura 2- Curvas de secagem da polpa de cagaita em leito de espuma sob diferentes temperaturas. ....	15
Figura 3- Coeficiente de difusão líquida efetiva obtido na secagem da polpa de cagaita em espuma em função do tempo. ....	18
Figura 4- Representação de Arrhenius da secagem em leito de espuma da polpa de cagaita a temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C. ....	19

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Modelos matemáticos utilizados para prever a secagem. ....	11
Tabela 2- Coeficientes de determinação ( $R^2$ ), erros médio relativo (P) e estimado (SE) para os modelos analisados, durante a secagem em camada de espuma da polpa de cagaita, nas diversas condições de temperatura (°C) .....	16
Tabela 3- Critério de informação de Akaike (AIC) e critério de informação de Bayesian Schwarz (BIC) Critérios de seleção dos modelos com melhores ajustes da cinética de secagem da polpa de cagaita a diferentes temperaturas. ....	17

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Cagaita

A cagaiteira (Figura 1) pertence à família *Myrtaceae* e gênero *Eugenia*. Nativa do Cerrado, com ocorrência no estado de Goiás, Mato Grosso, Minas Gerais e Bahia. Devido sua sazonalidade, falta de técnicas que possibilitem produtos de qualidade e aumento da vida útil, sua distribuição para as outras regiões se torna limitada (SANTOS et al., 2012).



Figura 1- Visão geral da cagaiteira: tronco, folhas, inflorescência e fruto. Fonte: Maisa D.Cavalcante (2017).

A propagação da cagaita pode ser tanto por autofecundação, quanto por fecundação cruzada, sendo a polinização realizada principalmente pelo auxílio de mamangavas. Sua frutificação inicia-se a partir do quarto ou quinto ano de idade (SILVA et al., 2001).

Segundo Souza et al. (2013) o período de safra é de setembro a novembro podendo apresentar de 200 a 500 frutos por planta. A árvore pode alcançar até dez metros de altura, com copa de seis a oito metros de diâmetro, e seu tronco é muito sulcado, com forte presença de cortiça. Sua madeira é comumente empregada em obras da construção civil, lenha e carvão.

A inflorescência ocorre entre julho e agosto e suas folhas são caducas, esverdeadas e opostas (CORDEIRO, 2016). O fruto, apresenta formato globoso, levemente achatado, casca frágil de coloração amarelo-claro e polpa com sabor agradável, levemente ácida (CARDOSO et al., 2011). A comercialização de frutos da cagaiteira ocorre de forma extrativista, podendo ser consumidos *in natura* ou processados (licor, sorvetes, sucos ou geleia), suas folhas e cascas são utilizadas na medicina popular como antidiarreica, controle de diabetes e icterícia (SILVA, 2016).

## **1.2. Secagem**

As frutas são produtos muito perecíveis que após o período de colheita sofrem aceleração no processo de deterioração, no qual sua vida útil dependerá de fatores externos e internos. Para Barros et al. (1994) os principais fatores são o transporte, respiração, temperatura, armazenamento, fatores fisiológicos, sanitização, embalagem e umidade relativa.

O uso de diferentes técnicas de conservação contribuem na redução das perdas e aumentam a vida de prateleira do produto. A secagem é um dos processos mais antigos para conservação dos alimentos e que vem sendo aplicada até os dias atuais por possuir eficiência, baixo custo e apesar das possíveis perdas de nutrientes, o valor alimentício se concentra pela perda de água. Esse método vem sendo utilizado com diferentes temperaturas, equipamentos e técnicas (CORNEJO et al., 2003).

A secagem é um processo habitual que visa a retirada de água livre do alimento, diminuindo a disponibilidade para as reações de deterioração, reduz o volume e a massa do produto facilitando o transporte e armazenamento, além de aumentar a estabilidade do alimento (ARAÚJO et al., 2016).

Os modelos matemáticos são instrumentos utilizados em diferentes condições do processo de secagem sendo aplicados para estimar o tempo necessário para diminuir o teor de água do alimento ou em tomadas de decisões que possam agregar na eficiência do processo (MEZIANE, 2011).

### **1.2.1. Secagem em leito de espuma**

A técnica de secagem em leito de espuma consiste em um procedimento de conservação em que alimentos líquidos ou semilíquidos são transformados em pó, por meio da agitação e adição de emulsificantes para posterior desidratação (SILVA et al., 2008).

O desafio desta técnica se encontra durante o processo de secagem em manter a estabilidade da espuma, podendo ocorrer o rompimento das bolhas de espuma, aumentando a taxa de secagem e conseqüentemente diminuindo a qualidade (SANKAT & CASTAIGNE, 2004 ).

Contudo, o método de secagem em leito de espuma oferece diversas vantagens em relação a secagem de produtos não espumados, quando se utiliza o mesmo tipo de secador,

podendo ser aplicado em alimentos sensíveis ao calor, viscosos e com alto índice de açúcar como sucos de frutas, o uso da secagem em leito de espuma se torna viável, pois permite a utilização de temperaturas moderadas em menor tempo de secagem, porque possui maior superfície de contato, que facilita a remoção de água do produto (BAPTESTINI et al., 2015).

Os produtos em pó apresentam prolongamento da vida de prateleira, por possuírem baixa atividade de água, que dificulta o crescimento de microrganismos, reações enzimáticas e/ou químicas (SEGURA et al., 1990).

Segundo Silva et al. (2016) esse método se destaca porque a polpa transformada em pó possui fácil reconstituição com a água, proporcionando a formulação com outros produtos, além de facilitar e diminuir o custo do armazenamento e do transporte.

Além dessas vantagens, a capilaridade através dos poros da espuma facilita a perda de água levando a redução da degradação térmica dos produtos secos em comparação à secagem convencional por convecção e ainda preserva alguns indicadores de qualidade como: cor, aroma, textura e valores nutricionais (FERNANDES et al., 2014).

Tem sido realizadas utilizando a secagem em leito de espuma com diferentes frutas e vegetais. Dentre elas podem se destacar araçá-boi utilizando Emustab®, Superliga neutra®, albumina e maltodextrina na temperatura de 70°C (SOARES, 2009); pitanga roxa utilizando albumina e Emustab®, puros e combinados com Superliga neutra® na temperatura de 55°C (BARRETO, 2011); polpa de ceriguela utilizando albumina, sendo desidratadas nas temperaturas de 60,70 e 80°C (FURTADO et al., 2010).

### **1.2.2. Emulsificante para formação da espuma**

Todos os emulsificantes são moléculas ambifílicas, ou seja, possuem uma parte solúvel e outra insolúvel em água (SOUZA & ROJAS, 2012). De acordo com Soares (2009), os emulsificantes são utilizados para manter a dispersão uniforme e aumentar a estabilidade cinética tornando-os razoavelmente estáveis. Além disso, são importantes para melhorar a textura, principalmente dos quais são constituintes à base de gordura também contribui para prolongar a vida útil do produto.

A composição química e a concentração do agente emulsificante são fatores primordiais que irão influenciar na estabilidade e formação da espuma assim como a natureza química do alimento no qual se aplicará (KARIM & WAI, 1999).

Dentre os diversos tipos de emulsificantes se destaca a albumina, derivada da clara

do ovo. Segundo Mesquita (2009) a albumina possui estrutura globular, sendo adsorvida na interface gás/água, produzindo sítios hidrofóbicos que diminuem a tensão superficial dessa interface, estabilizando a espuma formada.

### 1.3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAPTESTINI, F. M.; CORRÊA, P. C.; JUNQUEIRA, M. S.; RAMOS, A. M.; VANEGAS, J. D. Modelagem matemática da secagem de espuma de graviola. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 1203-1208, 2015.

BARRETO, I.M.A. **Caracterização de polpa de pitanga roxa (*Eugenia uniflora*) desidratada em leito de espuma. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos)**. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga, 2011.

BARROS, J.C. da S.M. de; GOES, Á. de and MINAM, K. Condições de conservação pós-colheita de frutos de pimentão (*Capsicum annum* L.). **Scientia Agricola**. (Piracicaba, Braz.) [online]. 1994, v. 51, n.2, pp.363-368. ISSN 1678-992X. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90161994000200024>.

CARDOSO L.M, MARTINO HSD, MOREIRA AVB, RIBEIRO SMR, PINHEIRO-SANT'ANA HM. Cagaita (*Eugenia Dysenterica* DC.) of the Cerrado of Minas Gerais, Brazil: physical and chemical characterization, carotenoids and vitamins. **Food Research International**. 2011; 44(7):2151-4.

CORDEIRO W.L. **Propagação por estaquia de cagaiteira com uso de poliaminas e aib**. Sete Lagoas. 2016/1. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Agrônômica da. Universidade Federal de São João Del Rei.

CORNEJO, F. E. P., NOGUEIRA, R., & WILBERG, V. Secagem como método de conservação de frutas. **Embrapa Agroindústria de Alimentos-Documentos (INFOTECA-E)**, 2003.

FERNANDES, R. V. B.; QUEIROZ, F.D. A.; ROCHA, V. V.; SOUZA, V. R.; LIMA, C. F. Estudo da adição de albumina e da temperatura de secagem nas características de polpa de tomate em pó. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 35, n. 3, p. 1267-1278, maio/jun. 2014.

FURTADO, G. D. F.; SILVA, F. D.; Porto, A. G.; & Santos, P. D. Secagem de polpa de ceriguela pelo método de camada de espuma. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 12, n. 1, p. 9-14, 2010.

KARIM A. A. & WAY C. C. Foam-mat drying of starfruit (*Averrhoa carambola* L.) purée. Stability and air drying characteristics. **Food Chemistry**, v. 64. p. 337-343, 1999.

MESQUITA, R. M. **Desenvolvimento de cerâmicas porosas à base de Nitreto de Silício**. São Paulo, 2009.

MEZIANE, S. Drying kinetics of olive pomace in a fluidized bed dryer. **Energy**

**Conversion and Management**, v.52, n. 3, p. 1644- 1649, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2010.10.027>.

SANKAT, C. K.; CASTAIGNE, F. Foaming and drying behavior of ripe bananas. **Lebensmittel Wissenschaft und Technologie**, v.37, n.1, p.517-525, 2004.

SANTOS P.R.G, CARDOSO L.M, BEDETTI S.F, HAMACECK F.R, MOREIRA A.V.B, MARTINO H.S.D. Geleia de cagaita (*Eugenia dysenterica* DC.): desenvolvimento, caracterização microbiológica, sensorial, química e estudo da estabilidade. **Revista Instituto Adolfo Lutz**. São Paulo, 2012; 71(2):281-90.

SEGURA, E.; MONROY, L. A.; MANRIQUE, G.; Aplicacion de la tecnologia de deshidratacion por el metodo de secado de espumas (Foam-mat) em jugos de frutas tropicales II (Naranja, Piña, Mora y Maracuyá). **Revista Colombiana de Ciências Químico- Farmaceuticas**, v. 18, n. 2, p. 47-52, 1990.

SILVA, A. S.; GURJÃO, K. C. DE O.; ALMEIDA, F. DE A. C.; BRUNO, R. L. A.; PEREIRA, W. E. Desidratação de polpa de tamarindo pelo método de camada de espuma. **Ciência e Agrotecnologia**, v.32, p.1899- 1905, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-7054200800060003>.

SILVA, M. M. M. **Estudo do desenvolvimento fisiológico da cagaita (*Eugenia Dysenterica* DC)**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

SILVA, R. S. M., CHAVES, L. J., & NAVES, R. V. Caracterização de frutos e árvores de cagaita (*Eugenia Dysenterica* DC.) no sudeste do Estado de Goiás, Brasil characterization of cagaita (*Eugenia Dysenterica* D.C.) fruits and tree in southeastern region of Goias State, Brazil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 23, n. 2, p. 330-334, 2001.

SOARES, E. C. **Caracterização de aditivos para secagem de araçá-boi (*Eugenia Stipitata* MC Vaugh) em leito de espuma**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga, 2009.

SOUZA, C. J. F.; ROJAS, E. E. G. Emulsion of systems containing egg yolk, polysaccharides and vegetable oil. **Ciências e Agrotecnologia**, Lavras , v. 36, n. 5, p. 543-550, Oct. 2012 . <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542012000500007>.

SOUZA, E. R. B., NAVES, R. V., & OLIVEIRA, M. F. Início da produção de frutos de cagaiteira (*Eugenia Dysenterica* DC) implantada em Goiânia, Goiás. **Revista Brasileira de Fruticultura**, 2013, 35(3), 906-909.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Geral**

Ajustar modelos matemáticos ao processo de secagem da polpa de cagaita em leito de espuma em diferentes temperaturas, determinar o coeficiente de difusão efetivo e obter a energia de ativação.

### **2.2. Específicos**

- Aplicar albumina como emulsificante para a realização da secagem em camada de espuma;
- Estudar a cinética de secagem da polpa de cagaita em diferentes temperaturas;
- Determinar a difusão líquida efetiva;
- Determinar a energia de ativação;
- Utilizar o AIC e BIC como método de seleção de modelo na modelagem.



## CAPÍTULO I: AJUSTE DE MODELOS MATEMÁTICOS NA SECAGEM DA POLPA DE CAGAITA EM LEITO DE ESPUMA

### RESUMO

A cagaita, fruto da cagaiteira (*Eugenia dysenterica* DC), é originada do Cerrado, e muito perecível. Para melhor aproveitamento de suas potencialidades, necessita-se de técnicas que conservem suas características físicas, químicas e biológicas, e proporcionem o aumento de vida útil. Dentre os variados métodos de conservação de produtos, o processo de secagem em camada de espuma se destaca para alimentos que possuem elevado teor de açúcar, assim como as frutas. Objetivou-se, com este trabalho ajustar modelos matemáticos ao processo de secagem em camada de espuma da polpa de cagaita em diferentes temperaturas, determinar o coeficiente de difusão líquida e obter a energia de ativação. Para a formação da espuma foi adicionada, à polpa, albumina, na concentração de 8% em massa e imediata agitação em batedeira doméstica, durante 15 min. Em seguida, a emulsão foi espalhada sobre bandejas formando uma camada fina e submetida em condições de secagem com temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C. O modelo de Wang e Sing a 50 e 60°C e o modelo de Midilli a 70 e 80°C foram os que se ajustaram melhor aos dados experimentais das curvas de secagem da camada espumada de cagaita utilizando os parâmetros AIC e BIC. O coeficiente de difusão líquida aumentou conforme a elevação da temperatura de secagem e a energia de ativação calculada foi 25,368 kJmol<sup>-1</sup>.

**Palavras-chave:** *Eugenia dysenterica*, energia de ativação, difusão líquida.

### ABSTRACT

The cagaita, fruit of the cagaiteira (*Eugenia dysenterica* DC), originates from Cerrado, and is very perishable. To better use their potential, techniques are needed to retain their physical, chemical and biological characteristics, and provide an increase in shelf-life. Among the various preserving products methods, the foam layer drying process stands out for foods that have high sugar content, as well as fruits. The objective of this work was to propose and adjust mathematical models to the foam layer drying process of the cagaita pulp at different temperatures, as well as to determine the net diffusion coefficient and to

obtain the activation energy. To the foam formation, albumin was added to the pulp at the concentration of 8% by mass and immediate shaking in a domestic shaker for 15 min; then it was spread on trays forming a thin layer and submitted under drying conditions with temperatures of 40, 50, 60 and 70 °C. The Wang and Sing model at 50 and 60 °C and the Midilli model at 70 and 80 °C were the ones that improved the experimental data of the battery foam temperature curves using the AIC and BIC parameters. The net diffusion coefficient increased as the drying temperature increased and the calculated activation energy was 25.368 kJmol<sup>-1</sup>.

**Key words:** *Eugenia dysenterica*, activation energy, liquid diffusion.

### 3.1. INTRODUÇÃO

A cagaita é um fruto original do Cerrado, que pode ser consumido tanto *in natura* ou de maneira processada na forma de geleias, sorvetes, licores e sucos (COSTA et al., 2017). Conforme Camilo et al. (2014), a cagaita é muito perecível, pela alta concentração de água que possui, sendo por volta de 90%, desta maneira necessita de técnicas que permitam o aumento de sua vida útil.

Dentre as técnicas que conservam os produtos destaca-se a secagem em leito de espuma, em que alimentos líquidos ou semilíquidos são transformados em pó por meio da agitação e incorporação de um agente espumante para posterior desidratação (SILVA et al., 2008).

Este processo de secagem é recomendado para produtos sensíveis ao calor ou que contenham açúcares, principalmente por necessitar de menor tempo de exposição e temperaturas mais baixas se comparado com outras técnicas (FERNANDES et al., 2014).

Para simular e obter dados sobre o comportamento de produtos durante a remoção da água, utilizam-se diferentes modelos matemáticos, que são baseados em variáveis externas ao produto, como a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem (RESENDE et al., 2008).

A difusão de água durante a secagem é um processo complexo que pode envolver diferentes mecanismos, como a difusão molecular, difusão capilar, difusão de superfície, fluxo hidrodinâmico, difusão de vapor e a energia de ativação da difusão (GONELI et al., 2009).

Diante do exposto, objetivou-se, com este trabalho, ajustar modelos matemáticos ao processo de secagem da cagaita em leito de espuma em diferentes temperaturas, determinar o coeficiente de difusão efetivo e obter a energia de ativação.

## **3.2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **3.2.1. Aquisição dos frutos**

Os frutos de cagaita foram coletados na região de Montes Claros de Goiás (16°06'20 "S e 51°17'11" W). Acondicionados em sacos de polietileno de 30x40 cm e colocados em caixas térmicas. Em seguida, foram transportados para o Laboratório de Fitoquímica do IF Goiano - Campus Rio Verde, onde foram selecionados quanto ao tamanho, ausência de injúrias mecânicas, estágio de maturação e logo depois sanitizados em água clorada a 150 ppm por 15 minutos e secos em papel toalha.

Os frutos foram levados a despoldadeira elétrica Toturgan®, para a obtenção da polpa, que foi embalada em sacos de plásticos de polietileno 25x 35 cm e armazenada em freezer a - 18°C.

### **3.2.2. Preparação das amostras**

Para formação da espuma utilizou-se Albumina, adquirida em mercado local, com proporção de 8% em massa. Adicionou-se 300 gramas de polpa de cagaita que foi submetida à agitação, em batedeira doméstica de marca Arno, por 20 minutos.

### **3.2.3. Cinética de secagem**

A cinética de secagem foi realizada em diferentes condições controladas de temperatura 40; 50; 60 e 70°C em estufa de circulação de ar. A secagem da emulsão (polpa+ Albumina) foi realizada em bandejas de alumínio sem perfurações, com dimensões de 11,5 cm de diâmetro e 25 cm de comprimento, perfazendo uma espessura de camada de espuma com 1 cm.

Para a determinação das curvas de secagem e ajustes dos modelos, a polpa foi seca até massa constante. Os teores de água do produto foram determinados em estufa a  $105 \pm 3^\circ\text{C}$ , durante 24 horas com três repetições até 13,54; 12,68; 11,65; 9,17 (%b.u) para as respectivas temperaturas 40, 50, 60 e 70°C.

A obtenção do equilíbrio higroscópico do pó de cagaita utilizou três repetições contendo 5 g, mantidas nas condições de secagem apontadas anteriormente e pesadas, periodicamente, até a massa permanecer constante. As razões de teor de água do produto

foram determinadas pela equação 1.

$$RX = \frac{X^* - X_e^*}{X_i^* - X_e^*} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

RX: razão de teor de água, adimensional;

$X^*$  : teor de água do produto (b.s.);

$X_i^*$  : teor de água inicial do produto (b.s.);

$X_e^*$  : teor de água de equilíbrio do produto (b.s.);

Para representação da secagem foram utilizados os modelos matemáticos conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Modelos matemáticos utilizados para prever a secagem de produtos vegetais.

Equação	Modelo	
$RX=1+at+bt^2$	Wang e Sing	(2)
$RX=a \cdot \exp(-kt) + (1-a) \exp(-k_1t)$	Verma	(3)
$RX=\exp\left(\frac{-a-(\sqrt{a^2-4 \cdot b \cdot t})}{2 \cdot b}\right)$	Thompson	(4)
$RX=\exp(-k \cdot t^n)$	Page	(5)
$RX=\exp(-k \cdot t)$	Newton	(6)
$RX=a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	Midilli	(7)
$RX=a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$	Logarítmico	(8)
$RX=a \cdot \exp(-k \cdot t)$	Henderson e Pabis	(9)
$RX=a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + c \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$	Henderson e Pabis, modificado	(10)
$RX=a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \exp(-k \cdot a \cdot t)$	Exponencial de dois termos	(11)
$RX=a \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$	Dois termos	(12)
$RX=a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \exp(-k \cdot b \cdot t)$	Aproximação de difusão	(13)

t – tempo (h); k,  $k_0$ ,  $k_1$  – constante da equação ( $h^{-1}$ ); a, b, c, n – parâmetros da equação; RX – razão de teor de água.

Para o ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais de secagem foi

realizada análise de regressão não linear, pelo método Gauss-Newton, utilizando o programa computacional Statistica 7.0<sup>®</sup>. Foram adotados como critérios para as aproximações iniciais dos coeficientes dos modelos os valores relatados na literatura para a modelagem de produtos vegetais.

Para determinar o grau de ajuste para cada temperatura de secagem, foi considerada a significância dos coeficientes de regressão pelo teste t, adotando o nível de 5% de significância, a magnitude do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), os valores do erro médio relativo (P) e do erro médio estimado (SE), o teste de Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) ao nível de significância de 5% e o intervalo de confiança a 95 % ( $p < 0,05$ ).

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (14)$$

$$SE = \sqrt{\frac{(Y - \hat{Y}^2)}{DF}} \quad (15)$$

$$\chi^2 = \sum \frac{|Y - \hat{Y}|^2}{DF} \quad (16)$$

Em que:

Y: valor observado experimentalmente;

$\hat{Y}$ : valor estimado pelo modelo;

N: número de observações experimentais;

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

Além dos parâmetros anteriores, foram utilizados o critério de informação de Akaike (AIC) e o critério de informação de Bayesian Schwarz (BIC). O AIC nos permite utilizar o princípio da parcimônia na escolha do melhor modelo, ou seja, segundo este critério, o modelo mais parametrizado nem sempre é o melhor (BURNHAM; ANDERSON, 2004).

O AIC é usado para comparar modelos não aninhados ou para comparar três ou mais modelos. Valores mais baixos de AIC refletem um melhor ajuste (AKAIKE, 1973).

$$AIC = -2\log\text{like} + 2p \quad (17)$$

Em que:

p é o número de parâmetros;

loglike o valor do logaritmo da função de verossimilhança considerando as estimativas dos parâmetros.

O BIC também considera o grau de parametrização do modelo e, portanto, quanto menor o valor do BIC for Schwarz (1978), melhor será o ajuste do modelo.

$$\text{BIC} = -2\log\text{like} + p\ln(n) \quad (18)$$

Em que:

n é o número de observações utilizadas para ajustar a curva.

Para avaliar a difusão líquida, utilizou o modelo da forma geométrica de placa plana, com aproximação de oito termos (Eq. 17), ajustado aos dados experimentais de secagem da polpa de cagaita por camada de espuma, considerando a área superficial e o volume:

$$\text{RX} = \frac{X^* - X_e^*}{X_i^* - X_e^*} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n_t=0}^{\infty} \frac{1}{(2n_t+1)^2} \exp \left[ \frac{-(2n_t+1)^2 * \pi^2 * D * T}{4} * \left( \frac{S}{V} \right)^2 \right] \quad (19)$$

Em que:

RX – razão de umidade do produto; adimensional;

nt – número de termos;

S – área da superfície do produto, m<sup>2</sup>;

D- coeficiente de difusão líquida efetiva m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>

V – volume do produto, m<sup>3</sup>, sendo o volume;

V=LxCxE.

Em que:

L- largura;

C- comprimento;

E- espessura.

A relação entre o coeficiente de difusão e a elevação da temperatura do ar de secagem foi descrita pela equação de Arrhenius.

$$D=D_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{R \cdot T_{\text{abs}}}\right) \quad (20)$$

Em que:

$D_0$ : fator pré-exponencial;

$E_a$ : energia de ativação,  $\text{kJ mol}^{-1}$  ;

$R$ : constante universal dos gases,  $8,134 \text{ kJ kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$  ;

$T_{\text{abs}}$ : temperatura absoluta, K.

Os coeficientes da expressão de Arrhenius foi linearizados com a aplicação do logaritmo, na seguinte forma

$$\ln D = \ln D_0 - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T_{\text{abs}}} \quad (21)$$



### 3.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 2 estão apresentadas as curvas de secagem da espuma da polpa de cagaita nas temperaturas de trabalho.

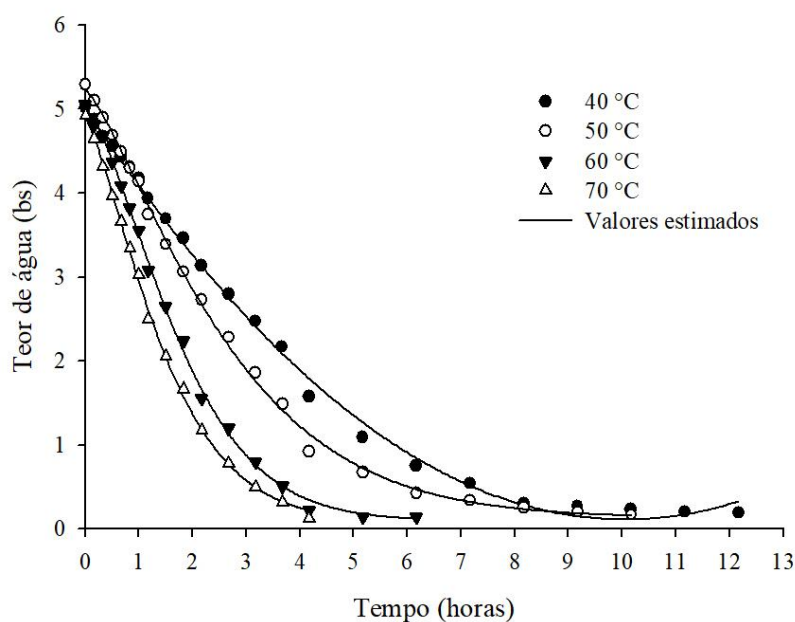


Figura 2- Curvas de secagem da polpa de cagaita em leito de espuma sob diferentes temperaturas.

Verificou-se que o tempo de secagem diminui com o aumento da temperatura, fato este explicado por Ferreira et al. (2012) devido ao aumento da taxa de secagem, em que aumenta o potencial de transferência de calor entre o ar e a camada do produto proporcionando maior redução de água em menor período.

As curvas adquirem uma inclinação maior pelo aumento na quantidade de calor transferido do ar para o material. Comportamentos similares foram verificados por Baptestini et al. (2015) ao estudar secagem em camada de espuma da graviola.

Conforme a Tabela 2, para ajuste dos modelos matemáticos o P deve ser inferior a 10% (MOHAPATRA & RAO, 2005),  $R^2$  próximo à unidade, SE mais próximo de zero (RESENDE et al., 2006), desta maneira o modelo de Page se ajustou melhor às temperaturas de 50, 60 e 70°C, o Exponencial de Dois Termos a 50 e 70°C e o de Dois Termos se ajustou melhor em 70°C.

Tabela 2- Coeficientes de determinação ( $R^2$ ), erros médio relativo (P) e estimado (SE) para os modelos analisados, durante a secagem em camada de espuma da polpa de cagaita, nas diversas condições de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )

Modelo	40 $^{\circ}\text{C}$				50 $^{\circ}\text{C}$			
	SE	$\chi^2$	P	$R^2$	SE	$\chi^2$	P	$R^2$
Wang e Sing	0,0013	0,9988	6,5617	0,9975	0,0012	0,9989	8,6330	0,9978
Verma	0,0026	0,9974	14,2609	0,9949	0,0034	0,9967	18,6592	0,9934
Thompson	0,0121	0,9881	38,8815	0,9764	0,0089	0,9913	28,9043	0,9827
Page	0,0020	0,9981	10,5111	0,9961	0,0011	0,9989	5,7286	0,9979
Newton	0,0121	0,9881	38,8771	0,9764	0,0089	0,9913	28,8968	0,9827
Midilli	0,0011	0,9989	6,9587	0,9978	0,0010	0,9990	6,9005	0,9981
Logarítmico	0,0025	0,9976	13,5134	0,9952	0,0028	0,9973	16,8926	0,9945
Henderson e Pabis	0,0088	0,9914	32,3850	0,9828	0,0057	0,9944	22,1547	0,9889
Exponencial de	0,0023	0,9978	14,5278	0,9956	0,0012	0,9988	6,5252	0,9977
Dois Termos								
Dois Termos	0,0022	0,9978	12,3567	0,9957	0,0024	0,9953	15,3219	0,9953
Aproximação da	0,0026	0,9974	14,2612	0,9949	0,0034	0,9967	18,6591	0,9934
Difusão								
Henderson e Pabis	0,0022	0,9978	12,3718	0,9957	0,0024	0,9977	15,3223	0,9953
Modificado								
Modelo	60 $^{\circ}\text{C}$				70 $^{\circ}\text{C}$			
	SE	$\chi^2$	P	$R^2$	SE	$\chi^2$	P	$R^2$
Wang e Sing	0,0031	0,9965	9,4627	0,9930	0,0014	0,9982	4,9067	0,9964
Verma	0,0038	0,9957	13,9373	0,9914	0,0025	0,9969	9,7008	0,9938
Thompson	0,0180	0,9792	47,0738	0,9588	0,0098	0,9876	23,4831	0,9754
Page	0,0010	0,9989	9,8309	0,9978	0,0005	0,9994	2,8481	0,9988
Newton	0,0180	0,9792	47,0705	0,9588	0,0098	0,9876	23,4804	0,9754
Midilli	0,0007	0,9992	4,9812	0,9984	0,0004	0,9994	1,7747	0,9989
Logarítmico	0,0027	0,9969	10,9721	0,9939	0,0019	0,9976	8,1507	0,9953
Henderson e Pabis	0,0025	0,9971	10,0630	0,9942	0,0062	0,9922	18,0108	0,9844
Exponencial de	0,0016	0,9982	15,7237	0,9964	0,0006	0,9992	5,0435	0,9985
Dois Termos								
Dois Termos	0,0025	0,9971	10,0626	0,9942	0,0005	0,9994	3,5532	0,9988
Aproximação da	0,0038	0,9957	13,9370	0,9914	0,0025	0,9969	9,7008	0,9938
Difusão								
Henderson e Pabis	0,0025	0,9971	10,0630	0,9942	0,0017	0,9979	7,4712	0,9957
Modificado								

O modelo de Aproximação por Difusão e o modelo de Henderson e Pabis Modificado foram adaptados aos dados experimentais obtidos na secagem a 70 $^{\circ}\text{C}$ . O modelo de Midilli, seguido pelo modelo de Wang e Sing, foi o melhor modelo para representar a secagem da polpa de cagaita em pó em todas as temperaturas.

Ajustes destes mesmos modelos matemáticos na secagem em camada de espuma foram encontrados por Silva et al. (2008) na desidratação da polpa de tamarindo, com temperaturas entre 50 e 80 $^{\circ}\text{C}$ , e os melhores modelos que representa o comportamento das curvas de desidratação foi o de Midilli e o Kucuk e por Alves et al. (2016) com polpa de abacate, com temperaturas 50 a 80 $^{\circ}\text{C}$ , e o melhor modelo foi de Wang e Sing.

Na Tabela 3, os critérios de seleção Informação de Akaike (AIC) e de Informação Bayesiano de Schwarz (BIC) podem confirmar a superioridade do ajuste dos modelos

matemáticos de Wang e Sing para as temperaturas de 40 e 50°C, enquanto o de Midilli foi melhor ajustado a 60 e 70°C, pois conforme Wolfnger (1993) os menores valores indicam o melhor ajuste do modelo aos dados do processo

Tabela 3- Critério de informação de Akaike (AIC) e critério de informação de Bayesian Schwarz (BIC) Critérios de seleção dos modelos com melhores ajustes da cinética de secagem da polpa de cagaita a diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	Wang e Sing		Midilli	
	AIC	BIC	AIC	BIC
40	-101.57	-98.58	-100.08	-95.10
50	-97.81	-94.98	-96.74	-92.02
60	-59.79	-57.67	-78.38	-74.85
70	-65.79	-63.87	-78.88	-65.79

Ao analisar a cinética de secagem da massa esmagada de jambu, avaliando os parâmetros de AIC e BIC, encontrou o melhor modelo de Midilli para as temperaturas de 60 e 70°C (GOMES et al., 2018). O modelo de Midilli está provavelmente associado à rápida perda de água no início das etapas do processos, gerando uma secagem com curva que melhor caracteriza matematicamente por este modelo (GONELI et al., 2014).

Os valores do coeficiente de difusão líquida efetiva obtidos para as diferentes temperaturas de secagem são mostrados na Figura 3. Houve um comportamento linear crescente, no qual os valores do coeficiente de difusão aumentaram com a elevação da temperatura.

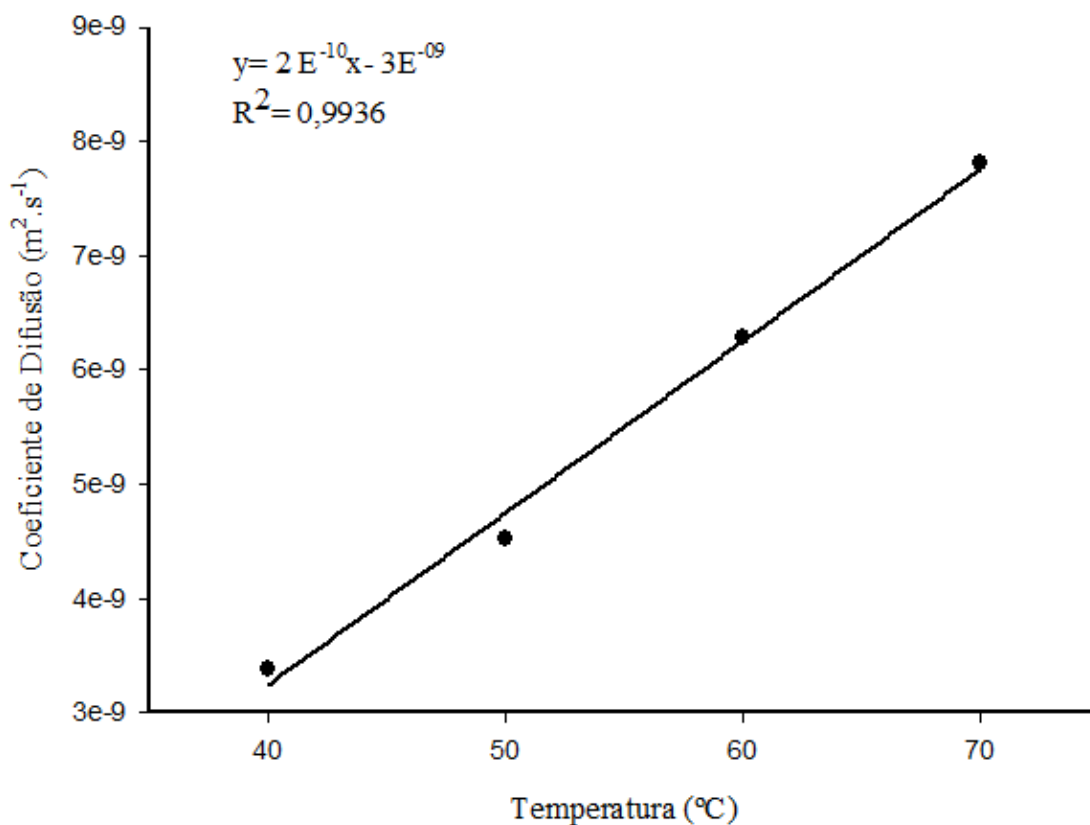


Figura 3- Coeficiente de difusão líquida efetiva obtido na secagem da polpa de cagaita em espuma em função do tempo.

Segundo Baptestini et al. (2015) esse comportamento é previsível, uma vez que o aumento da temperatura é inverso à viscosidade diminui, facilitando a difusão das moléculas de água nos capilares do produto. O mesmo comportamento foi observado por Alves et al. (2016) em seu estudo de cinética de secagem em camada de espuma da polpa de abacate.

A variação do coeficiente de difusão efetiva em função da temperatura de secagem é descrita pela relação de Arrhenius (Figura 4).

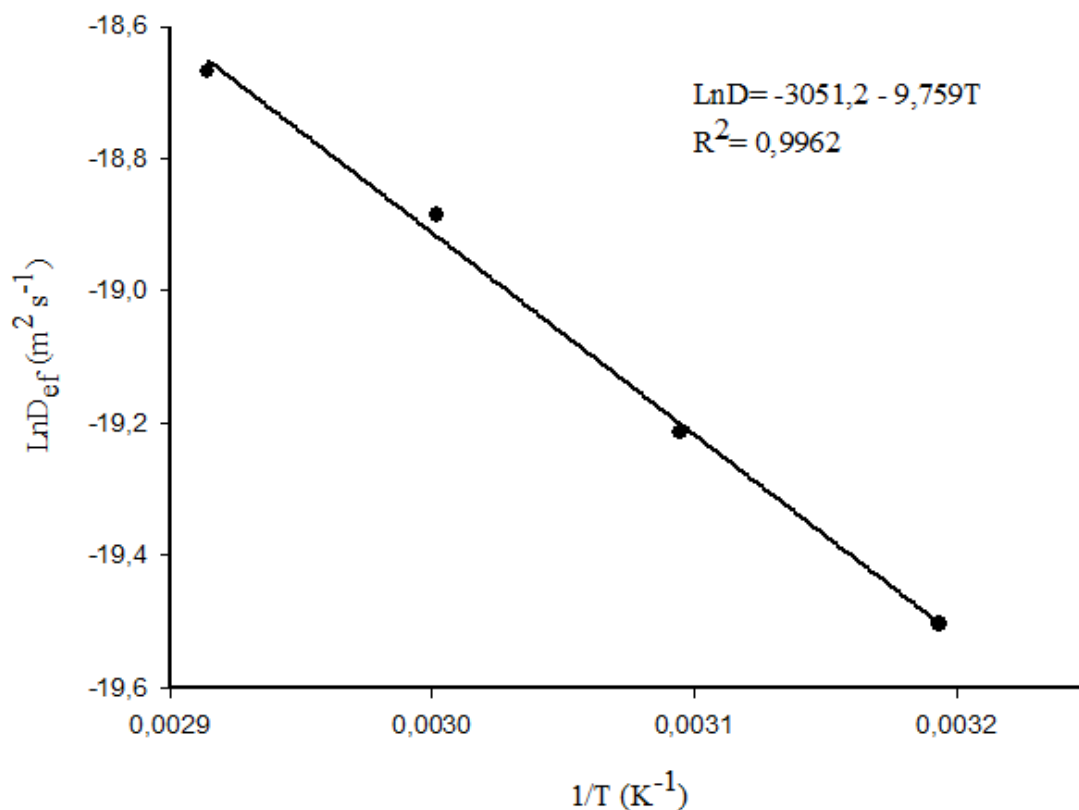


Figura 4- Representação de Arrhenius da secagem em leito de espuma da polpa de cagaita a temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C.

A energia de ativação para a secagem da espuma da polpa de cagaita em pó foi de 25,368 kJmol<sup>-1</sup> para a faixa de temperatura entre 40, 50,60 e 70°C. Valores semelhantes foram encontrados na secagem em camada de espuma da polpa da banana, em que a energia de ativação foi de 25,19 kJmol<sup>-1</sup> para faixa de temperatura de 60, 70 e 80°C (THUWAPANICHAYANAN et al., 2008).

Quanto menor a energia de ativação, maior será a difusividade da água no produto, os valores encontrados estão dentro da faixa de energia de ativação conforme Zogzas et al. (1996) que indica que devem estar compreendida entre 12 e 110 kJmol<sup>-1</sup>.

### 3.4. CONCLUSÃO

1. O modelo de Wang e Sing a 50 e 60°C e o modelo de Midilli a 70 e 80°C foram os que melhor se ajustaram aos dados experimentais das curvas de secagem da camada espumosa de cagaita utilizando os parâmetros AIC e BIC.

2. Com o aumento da temperatura do ar ocorreu redução no tempo de secagem da polpa de cagaita.
3. O coeficiente de difusão líquida efetiva aumentou com a elevação da temperatura de secagem.
4. O valor da energia de ativação está dentro dos parâmetros estabelecidos.

### 3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKAIKE, H. Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle. In Proceedings of the **2nd International Symposium on Information Theory**, PETROV, B. N.;Csaki, F., Eds.; Budapest: Akademiai Kiado, p. 267-281, 1973.

ALVES, J. J. L.; RODOVALHO, R. S. Cinética de secagem em camada de espuma da polpa de abacate cv ‘quintal’ (*Persea Americana* Mill). **Revista Agrotecnologia**, v. 6, p. 86-99, 2016.

BAPTESTINI, F. M.; CORRÊA, P. C.; JUNQUEIRA, M. S.; RAMOS, A. M.; VANEGAS, J. D. Modelagem matemática da secagem de espuma de graviola. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 1203-1208, 2015.

BURNHAM, K. P.; ANDERSON, D. R. Multimodel Inference: Understanding AIC and BIC in Model Selection. **Sociological methods & research**, v. 33, p. 261-304, 2004.

CAMILO, Y.M.V; SOUZA, E.R.B; VERA, R; NAVES, R.V. Caracterização de frutos e seleção de progênies de cagaiteiras (*Eugenia dysenterica* DC.). **Científica**. 2014;42(1):1-10

COSTA, L. T.; RODRIGUES, D. B.; MELO, C. F.; SOUZA, A. G.; GARCIA, E. M.; TAROCO, H. A.; MELO, J. O. F. Discovering the secrets of Cagaiteira (*Eugenia dysenterica*), an awakening of Cerrado. **Scientific Electronic Archives**, v. 10, p. 45-49, 2017.

FERNANDES, R. V. B.; QUEIROZ, F.; BOTREL, D. A.; ROCHA, V. V.; SOUZA, V. R.; LIMA, C. F. Estudo da adição de albumina e da temperatura de secagem nas características de polpa de tomate em pó. **Ciências Agrárias**, v. 35, p. 1267-1278, 2014.

FERREIRA, L. F. D.; PIROZI, M. R.; RAMOS, A. M.; PEREIRA, J. A. M. Modelagem matemática da secagem em camada delgada de bagaço de uva fermentado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 855-862, 2012.

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

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**, v.16, p.434-443, 2014a. [https://doi.org/10.1590/1983-084X/13\\_041](https://doi.org/10.1590/1983-084X/13_041)

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

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; RIBEIRO, D. M. Isotermas e calor isostérico de sorção do feijão. **Ciência e Tecnologia dos Alimentos**, v. 26, p. 626-631, 2006.

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

SCHWARZ, G. Estimating the dimension of a model. **Annals of Statistics**, v. 6, p. 461-464, 1978.

SILVA, A. S.; GURJÃO, K. C. De O.; ALMEIDA, F. A. C.; BRUNO, R. L. A.; PEREIRA, W. E. Desidratação de polpa de tamarindo pelo método de camada de espuma. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, p. 1899 - 1905, 2008.

THUWAPANICHAYANAN, R.; PRACHAYAWARAKORN, S.; SOPONRONNARIT, S. Drying characteristics and quality of banana foam mat. **Journal of Food Engineering**, v. 86, p. 573-583, 2008.

WOLFINGER, R. D. Covariance structure selection in general mixed models. **Communications in Statistics**, v. 22, p. 1079-1106, 1993.

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