



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
UNIDADE ACADÊMICA DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS
CAMPUS DE POMBAL-PB**

MONOGRAFIA

**ESTUDO DA MODELAGEM MATEMÁTICA E PROPRIEDADES
TERMODINÂMICAS NA SECAGEM DA POLPA DE GRAVIOLA EM LEITO DE
ESPUMA**

YOHANNE SUNALLY MEDEIROS SOUTO DE ASSIS

**DIGITALIZAÇÃO
SISTEMOTECA - UFCG**

POMBAL-PB

2017

YOHANNE SUNALLY MEDEIROS SOUTO

**ESTUDO DA MODELAGEM MATEMÁTICA E PROPRIEDADES
TERMODINÂMICAS NA SECAGEM DA POLPA DE GRAVIOLA EM LEITO DE
ESPUMA**

Monografia apresentada à Coordenação do Curso de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Campina Grande, como um dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Alimentos.

Orientadora: Prof^a. MSc. Georgiana M. V. Martins

POMBAL-PB

2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

A848c Assis, Yohanne Sunaly Medeiros Souto de.
Estudo da modelagem matemática e propriedades termodinâmica na secagem da polpa de graviola em leito de espuma / Yohanne Sunally Medeiros Souto de Assis. – Pombal, 2017.
29 f. : il. color.

Artigo (Bacharelado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2017.
"Orientação: Profa. Ma. Georgiana M. V. Martins".
Referências.

1. Secagem – Polpa de Graviola. 2. Modelagem Matemática – Propriedades Termodinâmica. 3. Cinética de Secagem – Polpa de Graviola. I. Martins, Georgina M. V. II. Título.

CDU 631.563.2(043)

YOHANNE SUNALLY MEDEIROS SOUTO DE ASSIS

**ESTUDO DA MODELAGEM MATEMÁTICA E PROPRIEDADES
TERMODINÂMICAS NA SECAGEM DA POLPA DE GRAVIOLA EM LEITO DE
ESPUMA**

Monografia apresentada à Coordenação do Curso de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Campina Grande, como um dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Alimentos.

Orientadora: Prof^a. MSc. Georgiana M. V. Martins

Aprovada em: 15 /03/ 2017

BANCA EXAMINADORA

Georgiana maria vasconcelos martins

Prof^a. MSc. Georgiana Maria Vasconcelos Martins
Orientadora

Severina de Sousa

Prof^a. DSc. Severina de Sousa
Coorientadora

Morgana Fabíola Cunha Silva Canuto

Prof^a. Dsc. Morgana Fabíola Cunha Silva Canuto
Avaliadora interna

Josiane Dantas Costa

Prof^a. MSc. Josiane Dantas Costa
Avaliadora externa

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho ao meu amado Pai Francisco de Assis Souto (*in memoriam*), que infelizmente não pode estar presente neste momento tão feliz da minha vida. Te amo Painho! Saudades eternas!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter guiado cada passo em minha vida, me fazendo resistir a cada dificuldade, e dando forças para superar as batalhas.

A minha mãe Romélia Medeiros R. Souto, por me ensinar a não fraquejar, por suas orações a meu favor, o seu cuidado, apoio e todos os ensinamentos que levarei por toda minha vida.

A meu pai, Francisco, que mesmo não estando presente me deixou seus ensinamentos de força e coragem para lutar por meus objetivos.

A minha avó, Oseni Medeiros, minha segunda mãe que sempre esteve presente em todos os momentos de minha vida, me apoiando. Te amo.

A meu esposo, Francisco Juvenil de Assis Sobrinho, pela paciência de estar ao meu lado mesmo nos momentos de estresse, por me apoiar e ter me dado o maior presente do mundo, a nossa filha Maria Júlia.

A minha irmã Yasnaia Shayeny, por sua amizade e por ter me dado um sobrinho lindo que eu amo, Francisco David.

Aos meus sogros, Paulo Ney e Lucila, por todo incentivo e apoio para concluir minha graduação.

A professora Georgiana, pela paciência e ajuda a que me dedicou durante o período de orientação, pela amizade e pelos ensinamentos que levarei para sempre.

A minha amiga, irmã, Alline Thamara, por sua amizade, seus conselhos e por estar sempre disposta a me ajudar.

As minhas amigas, Ingrid, Jaciara, Thaisa, Josimaria, Lucineide, Maria Auxiliadora, Jessica, Aline Elias, pelo incentivo e conselhos que fizeram com que essa trajetória se tornasse mais fácil de ser suportada.

A Joyce e Roberta técnicas dos laboratórios de Fisiologia Vegetal e Sementes, pela disponibilidade e paciência sempre que necessário.

Agradeço a todos os professores que fizeram parte dessa etapa em minha vida, por me fornecer o conhecimento que levarei para sempre.

Obrigada a todos que, mesmo não estando citados aqui, tanto torceram e contribuíram a vencer essa batalha.

Sumário

INTRODUÇÃO	8
MATERIAL E MÉTODOS	9
<i>Área de estudo</i>	9
<i>Coleta de Dados e Método Empregado</i>	9
DESCONGELAMENTO:	10
AValiação DA ESPUMA PARA DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE EMULSIFICANTE:	10
APLICAÇÃO DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	11
BATIMENTO	12
ESPUMAS EM BANDEJAS CIRCULARES	12
SECAGEM EM ESTUFA COM CIRCULAÇÃO	12
RASPAGEM	13
OBTENÇÃO DO PO	13
RESULTADOS E DISCUSSÃO	16
<i>Modelagem matemática da cinética de secagem da polpa da graviola</i>	17
<i>Efeitos das variáveis de temperatura (T) e concentração de emulsificante (CE) sobre a cinética de secagem da polpa da graviola da Marca doce Mel[®]</i>	23
<i>Propriedades Termodinâmicas para o delineamento experimental 2¹ mais três pontos centrais</i>	25
CONSIDERAÇÕES FINAIS	26
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26

Estudo da Modelagem Matemática e Propriedades Termodinâmicas na Secagem da Polpa de Graviola em Leito de Espuma

Study of Mathematical Modeling and Thermodynamic Properties in Drying of Graviola Pulp in Foam Bed

Yohanne Sunally Medeiros Souto De Assis¹, Georgiana Maria Vasconcelos Martins²

Resumo: Os maiores problemas que envolvem as frutas e perecíveis em geral, estão relacionados com o armazenamento e determinação de ponto de maturação. O processo de secagem vem sendo empregado para redução de teores de água de produtos alimentícios, dificultando o crescimento microbiano, reações químicas e bioquímicas e facilitando o seu armazenamento. A secagem em camada de espuma (*foam-mat*) é um processo no qual alimentos líquidos ou semilíquidos são transformados em espumas estáveis através da incorporação de agentes espumantes, para posteriormente, serem submetidos à desidratação. Este trabalho teve por objetivo realizar o estudo da modelagem matemática e propriedades termodinâmicas na secagem da polpa de graviola em leito de espuma, para as condições de temperaturas 50°C, 60°C e 70°C utilizando estufa com circulação de ar. Após coletados os dados de secagem, foram analisados pelos modelos matemáticos de Logarítmico, Page, Henderson e Pabis, Aproximação da Difusão de Midilli e Kucuk. O modelo que mais se ajustou aos dados experimentais foi o de Page e o segundo melhor foi o de Midilli e Kucuk por apresentar o melhor coeficiente de determinação (R^2) e o menor erro médio estimado descrevendo satisfatoriamente a cinética de secagem estudada. A temperatura foi o fator controlador principal do processo. Observou-se que o aumento da temperatura do ar de secagem provocou a elevação das taxas de remoção de água do produto, levando menos tempo para a polpa atingir o seu equilíbrio termodinâmico, e conseqüentemente, a polpa levou menos tempo para atingir o seu equilíbrio termodinâmico.

Palavras-chave: Modelagem matemática, Cinética de secagem, Polpa de graviola.

Abstract: The major problems involving fruits and perishables in general are related to the storage and determination of maturation point. The drying process has been used to reduce the water content of food products, hindering microbial growth, chemical and biochemical reactions and facilitating its storage. Foam-mat drying is a process in which liquid or semi-liquid feeds are transformed into stable foams by the incorporation of foaming agents and subsequently subjected to dehydration. The objective of this work was to study the mathematical modeling and thermodynamic properties in the drying of the graviola pulp in the foam bed, for the conditions of temperatures 50 ° C, 60 ° C and 70 ° C using air circulating greenhouse. After the drying data were collected, they were analyzed by the mathematical models of Logarithm, Page, Henderson and Pabis, Midilli and Kucuk Diffusion Approximation. The model that best fit the experimental data was Page and the second best was Midilli and Kucuk for presenting the best determination coefficient (R^2) and the lowest estimated average error describing satisfactorily the drying kinetics studied. Temperature was the main controlling factor of the process. It was observed that increasing the temperature of the drying air caused the water removal rates of the product to increase, taking less time for the pulp to reach its thermodynamic equilibrium, and consequently the pulp took less time to reach its thermodynamic equilibrium.

Key words: Mathematical modeling, Drying kinetics, Graviola pulp.

INTRODUÇÃO

O Brasil, segundo produtor mundial de graviola, por ser um país continental dotado de uma ampla variedade de clima e solos, é capaz de produzir volumes de diversas espécies frutícolas, desde as de clima tropical até aquelas que necessitam de clima temperado para seu cultivo (FAO, 2005).

A gravioleira (*Annona muricata* L.), pertencente à família Annonaceae, é uma planta tipicamente tropical. Nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, esta fruteira está presente na maioria das pequenas propriedades rurais como um componente da economia familiar e não como cultivo em larga escala. Seus frutos são utilizados na fabricação de sucos, sorvetes, compotas, geleias e doces. Sua origem não está bem definida, sendo encontrada desde o Caribe ao sudeste do México e Brasil. Cavalcante et al (1991), descreve como origem mais provável as Antilhas, onde gravioleiras foram encontradas em estado silvestre.

Os maiores problemas que envolvem as frutas e perecíveis em geral, estão relacionados com o armazenamento e com a determinação de ponto de maturação. No primeiro caso, é necessário a determinação de parâmetros específicos do produto a ser estocado, para se obter a carga térmica total a ser retirada, e assim efetuar um armazenamento refrigerado adequado. No segundo caso, não se sabe ao certo em que estágio da maturação ocorrem determinados teores de sólidos dos solúveis, de acidez e algumas propriedades sensoriais, cujos valores são exigidos para a industrialização e para a exportação (SILVA et al, 1999).

Dentre as técnicas empregadas para a manutenção da qualidade pós-colheita de frutas, a desidratação, é um importante método capaz de prolongar a vida útil e impedir a deterioração e perda do valor comercial de frutas e hortaliças (GURJÃO et al, 2006). Dentre elas destacam-se a liofilização (VIEIRA et al., 2011), desidratação pelo processo *foam-mat* (FRANCO et al., 2015), encapsulação de sucos por co-cristalização com sacarose, secagem por atomização secagem em leito de jorro (MACHADO et al., 2015).

A secagem em camada de espuma (*foam-mat*) é um processo no qual alimentos líquidos ou semilíquidos são transformados em espumas estáveis através da incorporação de agentes espumantes, para posteriormente, serem submetidos à desidratação (KARIN; WAI, 1999). A secagem em camada de espuma é uma técnica que requer menores temperaturas e tempo de secagem, devido à maior área de superfície exposta ao ar aquecido, acelerando desta forma o processo de remoção da água e obtenção de um produto poroso e de fácil reidratação (RAJKUMAR et al., 2007).

O método de desidratação em camada de espuma é aplicado a vários produtos alimentícios dentre eles pode-se destacar: tomate, graviola, cajá-manga, seriguela, microalgas verdes, entre outros (KADAM et al. 2012).

O estudo e a modelagem matemática da cinética de secagem têm despertado o interesse de vários pesquisadores para os mais diferentes produtos agrícolas (FARIA et al. 2012). Na literatura, diversos modelos matemáticos têm sido utilizados para descrever a cinética de secagem em camada fina para produtos: jujuba chinesa (Yi et al. 2012), castanha (Delgado et al., 2014), manga (Corso, Álvarez, 2012), broto de palma forrageira (Martins et al. 2014), banana verde (Costa, Silva, Martins, 2015), grãos de feijão guandu (Silva et al. 2015), morango (Oliveira et al. 2015), dentre outros.

A obtenção e modelagem das curvas de secagem de um determinado produto possibilitam determinar índices físicos e termodinâmicos relacionados às transferências de calor e massa, que são fundamentais para o dimensionamento adequado de toda a estrutura utilizada para a secagem (BOTELHO et al., 2015).

O conhecimento das propriedades termodinâmicas nos processos de secagem de produtos agrícolas é uma fonte de informação importante para projetar equipamentos de secagem, calcular a energia requerida neste processo, estudar as propriedades da água adsorvida e avaliar a microestrutura dos alimentos e o estudo dos fenômenos físicos que ocorrem na superfície dos produtos agrícolas (CORRÊA et al., 2010; MARTINS et al., 2015).

Diferentes trabalhos envolvendo a secagem de graviola foram realizados nos últimos anos envolvendo secagem: GURGEL et al., (2014) estudaram a desidratação da polpa de graviola com e sem adição de leite e aditivos (1% de Liga Neutra e 1% de Emustab) pelo processo *foam-mat*. Analisaram os efeitos da temperatura, espessura da camada e concentração de leite na cinética de secagem, podendo verificar que a adição do leite e temperaturas mais elevadas aumentaram as taxas e diminuíram o tempo de secagem e que maiores espessuras da camada de espuma foram desfavoráveis ao processo.

Dieb et al., (2015) avaliaram o comportamento das curvas de secagem da polpa de graviola e as características físico-químicas do produto em pó (umidade e atividade de água). Iogurtes saborizados com 7% de pó de graviola obtidos na secagem sob efeitos da temperatura (50°C, 60°C e 70°C) e espessura da camada (0,30cm, 0,45cm e 0,60cm) na cinética de secagem, foram submetidos à análise sensorial. O produto apresentou índice de aceitabilidade superior a 70% e conforme a classificação qualitativa, as médias das notas ficaram compreendidas entre gostar ligeiramente e regularmente.

Baptestini et al., (2015) estudaram os ajustes matemáticos ao processo de secagem de espuma de graviola em diferentes condições de ar, determinar o coeficiente de difusão efetivo e obter a energia de ativação. O modelo para determinar o binômio teor de água crítico, tempo crítico e o de Midilli se ajustaram bem aos dados experimentais da secagem de espuma de graviola obtendo-se acréscimo no coeficiente de difusão efetivo com a elevação da temperatura de secagem e energia de ativação de 33,10 KJ mol⁻¹.

Considerando a importância do estudo da secagem de polpas de frutas e a limitação de informações a respeito dos fenômenos que ocorrem durante a secagem da polpa da graviola, objetivou-se neste trabalho ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem, selecionando aquele que melhor represente o fenômeno. Além disso, determinar o coeficiente de difusão efetivo e as propriedades termodinâmicas associadas à secagem da polpa da graviola em leito de espuma.

MATERIAL E MÉTODOS

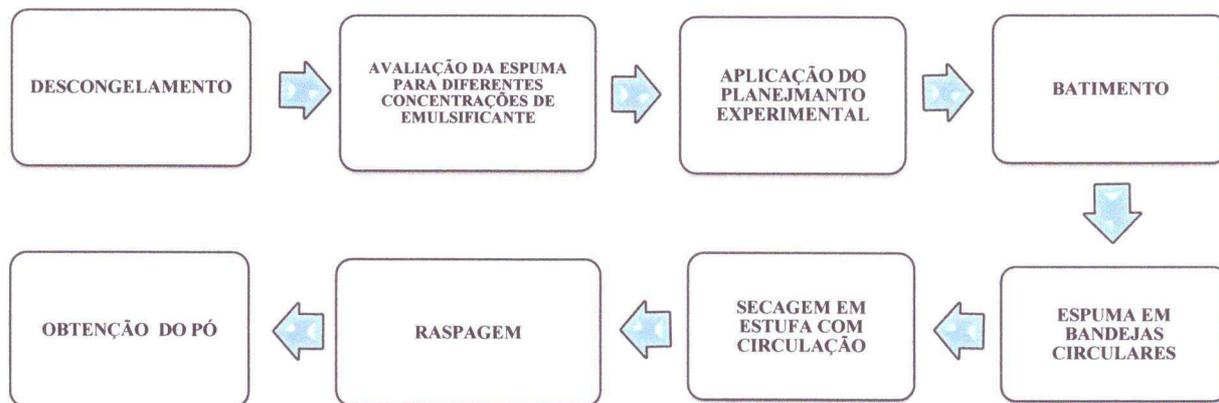
Área de estudo

O trabalho foi realizado nos Laboratórios de Sementes e Fisiologia Vegetal do Centro de Ciências e Tecnologia de Alimentos (CCTA), da Universidade Federal de Campina Grande, Campus de Pombal, Paraíba, Brasil.

Coleta de Dados e Método Empregado

Para a secagem em camada de espuma a partir da polpa de graviola foram realizados os procedimentos de acordo com o fluxograma (Figura 2).

Figura 1. Fluxograma do Processo de secagem em camada de espuma da polpa de graviola.



O fluxograma experimental apresentado na Figura 2, apresenta as etapas realizadas para avaliar a cinética de secagem em camada de espuma da polpa da graviola em estufa com circulação e renovação de ar, marca Solab. O teor de água de equilíbrio foi considerado, como o teor de água alcançada ao se atingir massa constante, para cada conjunto de dados experimentais, seguindo a metodologia de GURGEL (2014).

DESCONGELAMENTO:



Para o desenvolvimento do trabalho foram utilizadas polpas pasteurizadas de graviola da marca Doce Mel®, adquiridas no mercado local, localizado na cidade de Pombal, Paraíba, Brasil. O produto foi obtido na forma congelada em embalagens plásticas constituídas de polietileno de 100 g.

As polpas foram levadas para o laboratório de Sementes em caixas térmicas e mantidas sob congelamento até utilização.

AVALIAÇÃO DA ESPUMA PARA DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE EMULSIFICANTE



As densidades da polpa de graviola e da espuma foram determinadas por picnometria, utilizando-se picnômetros de 50mL previamente calibrados. Para o cálculo da densidade da polpa de graviola e da espuma empregou-se a seguinte equação:

$$\rho_{amostra} = \frac{m_{amostra}}{V_{picnômetro}} \quad (1)$$

A expansão das espumas será calculada a partir da equação:

$$Exp (\%) = \frac{1/\rho_{espuma} - 1/\rho_{polpa}}{1/\rho_{polpa}} \times 100 \quad (2)$$

Em que:

$\rho_{amostra}$ é a densidade da amostra (gcm^{-3} ou g/cm^3)

$m_{amostra}$ é a massa da amostra (g)

$V_{picnômetro}$ é o volume do picnômetro (cm^3)

Exp é a expansão da espuma (%)

ρ_{polpa} é a densidade da polpa (g/cm^3)

ρ_{espuma} é a densidade da espuma (cm^3)

De acordo com Arsdel (1964), a densidade das espumas deve estar compreendida numa faixa de 0,1 a 0,6 g/cm^3 .

APLICAÇÃO DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL:

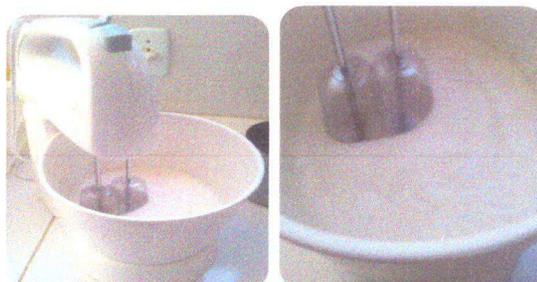
Tabela 1. Matriz do Planejamento completo $2^2 + 3$ para secagem em camada de espuma da polpa da graviola.

Ensaio	Temperatura Codificada	Concentração Codificada	Temperatura (°C)	Concentração de emulsificante (g)
1	-1	-1	50	1,7
2	+1	-1	70	1,7
3	-1	+1	50	3,00
4	+1	+1	70	3,00
5	0	0	60	2,35
6	0	0	60	2,35
7	0	0	60	2,35

A Tabela 1, apresenta a matriz de planejamento fatorial 2^2 , totalizando em sete experimentos, dentre os quais quatro ensaios distintos e mais três no ponto central, que são três ensaios idênticos com uma das finalidades de verificar a reprodução dos ensaios.

A faixa de temperatura foi escolhida com base em dados existentes na literatura, que inclui valores entre 35°C e 90°C. Definiram-se as temperaturas de 50°C, 60°C e 70°C.

As variáveis de entrada foram temperatura e concentração de emulsificante, e variáveis de saída a constante cinética e a energia de ativação.

BATIMENTO:

Na preparação das espumas a polpa foi descongelada e pesada, adicionando os emulsificantes nas proporções especificadas na Tabela 1, a mistura de polpa e emulsificante foi submetida a agitação por 20 minutos em batedeira doméstica Arno®, Modelo Facilita de 250W, na velocidade média do equipamento

ESPUMAS EM BANDEJAS CIRCULARES:

As formulações foram dispostas em bandejas de alumínio de formato circular e colocadas em estufa com circulação de ar.

SECAGEM EM ESTUFA COM CIRCULAÇÃO:

As espumas da polpa da graviola foram desidratadas em estufa com circulação forçada de ar. A perda de água foi acompanhada através da variação da massa das bandejas de

alumínio circular de raio 26 cm, ao longo da secagem, até que fosse observado massa constante.

As pesagens das amostras foram realizadas por meio de uma balança semi-analítica marca Marte - UX4200H com precisão de 0,01g. A porcentagem de teor de água foi calculada em base úmida aplicando-se a equação (3), sendo o:

$$\text{Teor de água (\%)} = \frac{(M_i - M_f)}{(M_f - t)} \cdot 100 \quad (3)$$

Em que:

M_i = massa inicial, (g),

M_f = massa final, (g);

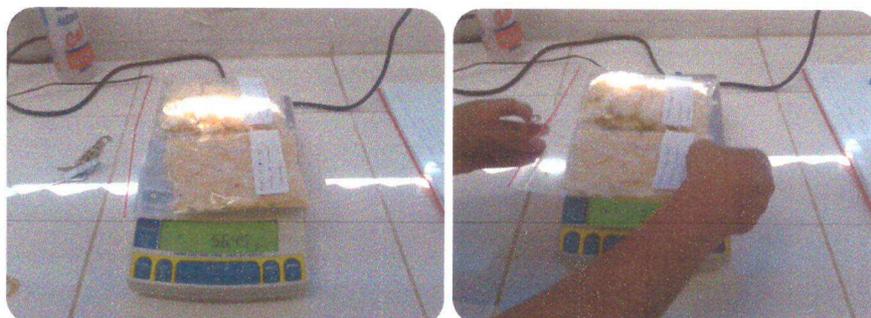
t = tara, massa da bandeja.

RASPAGEM:



. O produto desidratado (pó) foi retirado das bandejas, mediante uma raspagem, apresentando granulometria fina, mais não homogênea.

OBTENÇÃO DO PÓ:



Após a raspagem o produto final foi acondicionado em sacos de polietileno.

As curvas de secagem foram obtidas pela conversão dos dados experimentais referentes à perda de água no parâmetro adimensional razão de teor de água (RX). Para determinação da razão de teor de água da polpa da graviola para as diferentes condições de secagem será utilizada a seguinte equação:

$$RX = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} \quad (4)$$

RX - Razão de teor de água adimensional; X – teor de água absoluta, Xo - teor de água inicial, e Xe - teor de equilíbrio.

Tabela 2. Modelos matemáticos utilizados para estimar as curvas de secagem de produtos alimentícios. Onde: t é o tempo de secagem, s; k, k₀ e k₁ são as constantes de secagem – a mesma não apresenta unidade (adimensional).

Designação dos Modelos	Modelos Matemáticos	Enumeração das Equações
Page	$RX = \exp(-k \cdot t^n)$	(5)
Henderson & Pabis	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	(6)
Logarítmico	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$	(7)
Aproximação da Difusão	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \cdot \exp(-k \cdot b \cdot t)$	(8)
Midilli	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	(9)

A análise e a representação dos dados experimentais do processo de secagem foram realizadas utilizando-se os modelos matemáticos apresentados na Tabela 2. Os parâmetros do modelo utilizados foram obtidos mediante aplicação dos dados experimentais ao pacote de análise utilizando-se a análise de regressão não linear, pelo método Levenberg - Marquardt, com 1000 iterações e critério de convergência 1×10^{-6} empregando-se o programa computacional Statistica 7.0®.

Os critérios usados para determinação do melhor ajuste dos modelos aos dados experimentais foram: coeficiente de determinação (R²) e desvio quadrático médio (DQM). Para a determinação do coeficiente de difusão efetivo, foi realizado o ajuste dos dados experimentais da secagem da polpa da graviola utilizando o modelo matemático da difusão líquida para a forma geométrica esférica de acordo com a equação. A solução analítica apresenta-se na forma de uma série infinita e, portanto, o número finito de termos (n) no truncamento, define a precisão dos resultados. (GOIS et al., 2013; MENDES et al. 2009; SANTOS et al., 2011).

$$RX = \frac{8}{\pi^2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)} \cdot \exp\left[\frac{-(2n+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot Def \cdot t}{4 \cdot L^2}\right] \quad (10)$$

Em que:

Def – é o coeficiente de difusão efetivo, ($m^2 s^{-1}$);

L- é a metade da espessura média da amostra;
 n – é o número de termos da série;
 t – é o tempo de secagem.

Esta equação é a solução analítica para a segunda lei de Fick, desconsiderando-se a contração volumétrica do leito de espuma e a condição de contorno de teor de água conhecida na superfície da camada de espuma (BROOKER et al., 1992). Para o cálculo do raio equivalente utilizado no modelo da difusão líquida, foi realizada a medição das três bandejas circulares, as quais foram utilizadas nos experimentos. Com auxílio de um paquímetro digital com resolução de 0,01mm, as três bandejas foram medidas. Para avaliar a influência da temperatura no coeficiente de difusão efetivo, foi utilizado a relação de Arrhenius:

$$D = D_o \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (11)$$

Em que:

Do – é o fator pré-exponencial, ($m^2 s^{-1}$);
 Ea – é a energia de ativação, ($J mol^{-1}$);
 R – é a constante universal dos gases, ($8,314 J mol^{-1} K^{-1}$);
 T – é a temperatura absoluta, (K).

As propriedades termodinâmicas do processo de secagem da polpa da graviola foram obtidas pelo método descrito por Jideani & Mpotokwana (2009).

$$\Delta H = E_a - RT \quad (12)$$

$$\Delta S = R \cdot \left(\ln A_o - \ln \frac{k_B}{h_p} - \ln T \right) \quad (13)$$

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (14)$$

Em que:

ΔH - é variação de entalpia, ($J mol^{-1}$);
 ΔS - é a variação de entropia, ($J mol^{-1} K^{-1}$);
 ΔG - é a variação de energia livre de Gibbs, ($J mol^{-1}$);
 k_B -é a constante de Boltzmann, ($1,38 \times 10^{-23} J K^{-1}$);
 h_p -é a constante de Planck, ($6,626 \times 10^{-34} J s$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a cinética de secagem em camada de espuma de polpa de graviola da marca Doce Mel foram avaliadas para a delineamento experimental 2^2 mais 3 pontos centrais, modelagem matemática da cinética de secagem para os modelos de Logarítmico (Henderson e Pabis), aproximação da difusão (Midilli e Kucuk), influência das variáveis temperatura, concentração de emulsificante para a constante cinética do delineamento experimental 2^2 mais três pontos centrais, as propriedades termodinâmicas e o coeficiente de difusão efetivo determinadas para o delineamento experimental.

Cinética de Secagem em camada de espuma de polpa de Graviola

As Figuras 2 e 3 apresentam os dados experimentais da cinética de secagem de polpa de graviola em camada fina em função do tempo de secagem. Esses dados foram calculados pela equação 4.

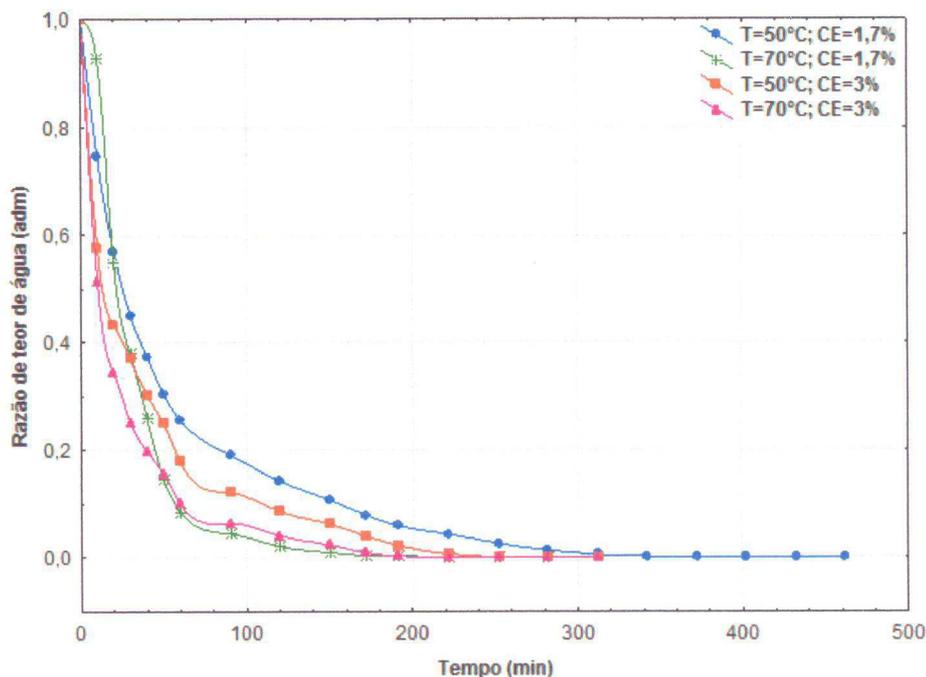


Figura 2. Cinética de secagem da polpa da graviola nas temperaturas de 50°C e 70°C e concentração de emulsificante de 1,7 % e 3%.

A cinética de secagem da graviola, em camada fina, foi avaliada nesse presente estudo, afim de analisar a influência das variáveis de processo: temperatura de secagem e concentração de emulsificante em relação a cinética de secagem.

Na temperatura de 50°C, podemos observar que se levou mais tempo para se extrair a água do produto, quando comparadas com as temperaturas mais elevadas de 60°C e 70°C que levaram tempos inferiores de secagem.

Através das curvas da razão de umidade em função do tempo observou-se que com o aumento da temperatura do ar de secagem, ocorreu a elevação das taxas de remoção de água do produto, diminuindo o tempo para a polpa atingir o equilíbrio. Esses resultados se encontram em estudos de diversos autores que considerariam a temperatura do ar de secagem como o parâmetro que exerce maior influência na cinética de secagem de alimentos, dentre os quais, ALMEIDA et al. (2006), LEITE et al. (2015) e SILVA et al. (2016) que trabalharam secagem de acerola, banana da terra e polpa de carambola, respectivamente diminuiu.

De acordo com TONON et al. (2009) ao estudar a influência do ar de secagem do suco de açaí, observou que o uso de temperaturas mais altas implica em maior diferença de temperaturas entre os produtos atomizados e o ar de secagem, acarretando maior transferência de calor, e maior evaporação de água do produto.

DANTAS, et al. (2010) estudou o efeito da temperatura (60°C e 70°C) sobre a secagem das espumas de abacaxi e manga, avaliando-se o comportamento das curvas de secagem e ajustando-se aos modelos da literatura aos dados experimentais. As condições que mais favoreceram as melhores taxas de secagem foi a temperatura de 70°C para ambos os frutos e

modelo de Page foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais podendo ser utilizado para fins preditos.

J.T.DIEB et al. (2015), secou polpa de graviola, com adição de 1% de emulstab e 1% de liga neutra, pelo processo de secagem em camada de espuma *foam-mat*, sob efeitos das temperaturas (50°C, 60°C e 70°C), em menor tempo e espessuras da camada (0,30 cm, 0,45 cm e 0,60 cm), em menor tempo, usando espessuras mais finas e temperatura superior 70°C. A Figura 3 apresenta as curvas da secagem de polpa de graviola para os experimentos relacionados ao ponto central da matriz de planejamento experimental, referentes a cinética de secagem há uma temperatura de 60°C e concentração de emulsificante 2,3%, verifica 'se uma boa reprodutibilidade dos três ensaios para as condições avaliadas.

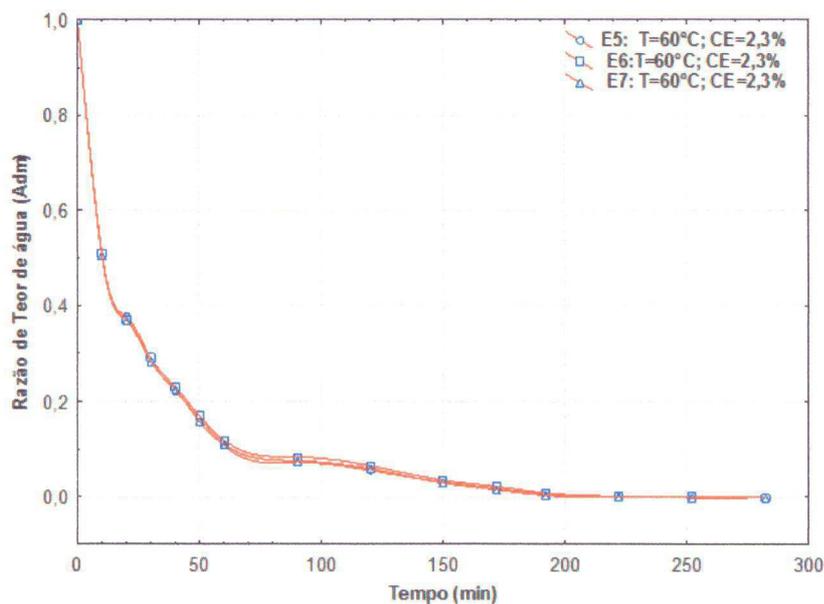


Figura 3. Cinética de secagem da polpa da graviola na temperatura de 60°C e concentração de emulsificante de 2,3% para as três repetições da matriz experimental.

Modelagem matemática da cinética de secagem da polpa da graviola

As Figuras 4, 5, 6, 7 e 8 apresentam as curvas experimentais das cinéticas de secagem da polpa de graviola, na forma adimensional de água (Razão de água) em função do tempo pelo modelo Logaritmo, Page, Henderson e Pabis, aproximação da Difusão e Midilli e Kucuk, respectivamente, da matriz experimental.

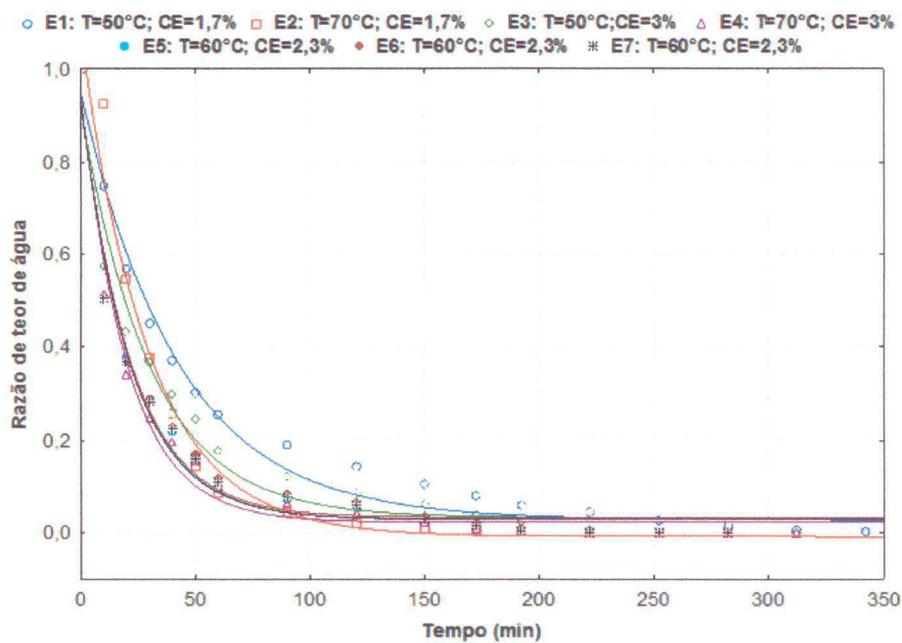


Figura 4. Curvas dos dados experimentais da razão de teor de água da polpa da graviola e calculados pelo modelo Logarítmico para os 7 ensaios da matriz experimental

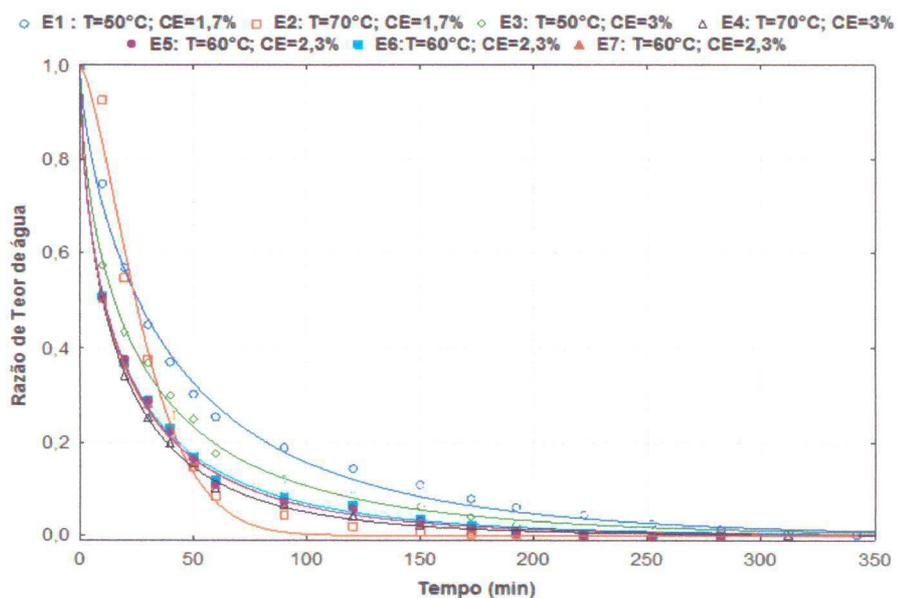


Figura 5. Curvas dos dados experimentais da razão de teor de água da polpa da graviola e calculados pelo modelo Page para os 7 ensaios da matriz experimental.

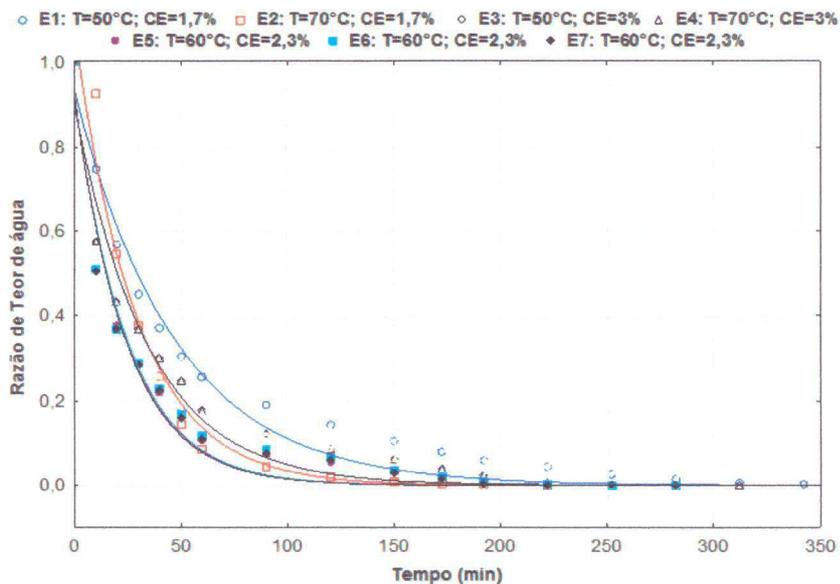


Figura 6- Curvas dos dados experimentais da razão de teor de água da polpa da graviola e calculados pelo modelo Henderson & Pabis para os 7 ensaios da matriz experimental.

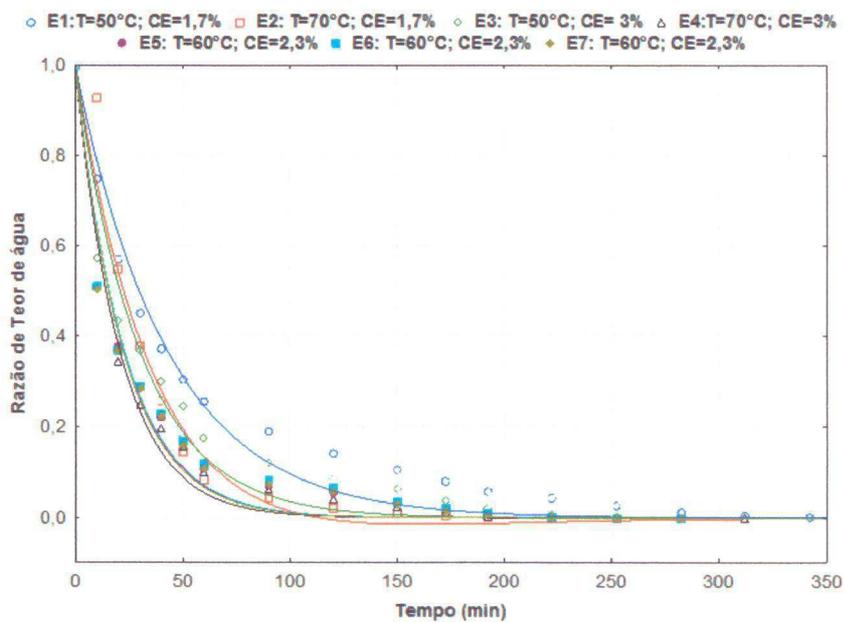


Figura 7. Curvas dos dados experimentais da razão de teor de água da polpa da graviola e calculados pelo modelo Aproximação da Difusão para os 7 ensaios da matriz experimental.

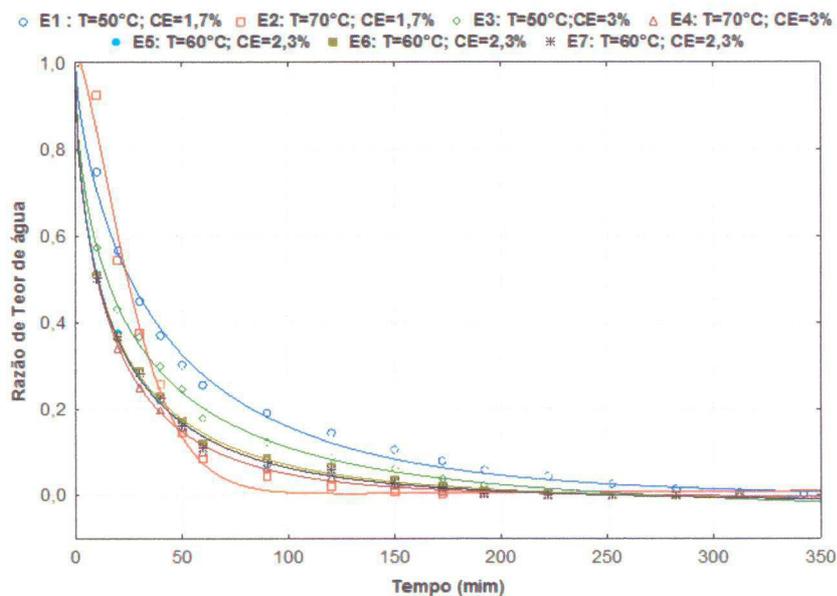


Figura 8. Curvas dos dados experimentais da razão de teor de água da polpa da graviola e calculados pelo modelo Midilli e Kucuk para os 7 ensaios da matriz experimental.

Nas Tabelas de 3 a 7 são apresentados os valores dos parâmetros, coeficiente de determinação (R^2) e os desvios quadráticos (DQM) dos modelos matemáticos de Logaritmo, Page, Henderson e Pabis, aproximação da Difusão e Midilli e Kucuk, ajustados aos dados de secagem da polpa de graviola em camada de espuma para as condições de secagem estudadas.

Tabela 3. Valores estatísticos dos coeficientes de determinação (R^2) e desvio quadrático médio (DQM), obtidos pela aplicação do modelo de Logaritmo aos dados experimentais de secagem de polpa de graviola.

Modelo Logaritmo					
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$					
Parâmetros					
Ensaio	a	k	b	R^2	DQM
1	0,9279	0,0236	0,0278	98,67	0,0314
2	1,0939	0,0338	-0,00744	97,69	0,0499
3	0,890840	0,032981	0,032557	97,26	0,0438
4	0,933052	0,049157	0,022865	98,22	0,0345
5	0,916944	0,045200	0,028318	97,76	0,0394
6	0,910844	0,045311	0,033230	97,49	0,0415
7	0,916519	0,045987	0,02889	97,64	0,0403

Tabela 4. Valores estatísticos dos coeficientes de determinação (R^2) e desvio quadrático médio (DQM), obtidos pela aplicação do modelo de Page aos dados experimentais de secagem de polpa de graviola.

Modelo Page $RX = \exp(-k \cdot t^n)$				
Parâmetros				
Ensaio	K	N	R^2	DQM
1	0,0641	0,7297	99,67	0,0131
2	0,0053	1,5154	99,12	0,0061
3	0,1228	0,6307	99,76	0,0108
4	0,1503	0,6503	99,94	0,0061
5	0,1505	0,6323	99,83	0,0108
6	0,1601	0,6110	99,86	0,0099
7	0,1559	0,6249	99,83	0,0109

Tabela 5. Valores estatísticos dos coeficientes de determinação (R^2) e desvio quadrático médio (DQM), obtidos pela aplicação do modelo de Henderson & Pabis aos dados experimentais de secagem de polpa de graviola.

Modelo Henderson & Pabis $RX = a \cdot \exp(-k \cdot t)$				
Parâmetros				
Ensaio	A	K	R^2	DQM
1	0,9382	0,0213	98,16	0,0369
2	1,0879	0,0344	97,67	0,0501
3	0,9061	0,0292	96,61	0,0488
4	0,9456	0,0452	97,80	0,0015
5	0,9323	0,0407	97,20	0,0426
6	0,9279	0,03998	96,72	0,0459
7	0,9319	0,0413	97,05	0,0451

Tabela 6. Valores estatísticos dos coeficientes de determinação (R^2) e desvio quadrático médio (DQM), obtidos pela aplicação do modelo de Aproximação da Difusão aos dados experimentais de secagem de polpa de graviola.

Modelo Aproximação da Difusão $RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \cdot \exp(-k \cdot b \cdot t)$					
Parâmetros					
Ensaio	A	K	b	R^2	DQM
1	3,3535	0,0233	0,9999	97,83	0,0401
2	20,70397	0,02117	0,97947	97,34	0,0536
3	4,8084	0,033197	0,9999	97,66	0,0552
4	4,5809	0,0482	0,9999	97,50	0,0409
5	1,2896	0,0442	0,9996	96,71	0,0477
6	2,3821	0,0437	0,9999	96,16	0,0512
7	1,9276	0,0449	1,0001	96,56	0,0487

Tabela 7. Valores estatísticos dos coeficientes de determinação (R^2) e desvio quadrático médio (DQM), obtidos pela aplicação do modelo de Midilli aos dados experimentais de secagem de polpa de graviola.

Modelo Midilli e Kucuk						
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$						
Parâmetros						
Ensaio	A	K	N	b	R^2	DQM
1	1,0115	0,0682	0,7161	$-0,9 \times 10^{-5}$	99,68	0,0153
2	1,0295	0,0066	1,4636	$3,1 \times 10^{-5}$	99,20	0,0293
3	0,9987	0,1363	0,5966	$-7,6 \times 10^{-5}$	99,85	0,0101
4	1,0003	0,1531	0,6441	$-1,3 \times 10^{-5}$	99,20	0,0058
5	0,9990	0,1563	0,6193	$-3,1 \times 10^{-5}$	99,85	0,0102
6	0,9997	0,1681	0,5944	$-3,7 \times 10^{-5}$	99,88	0,0090
7	0,9992	0,1629	0,6097	$-3,5 \times 10^{-5}$	99,85	0,0101

DANTAS, et al. (2010), testou dois modelos empíricos para descrever a cinética de secagem das polpas de manga e abacaxi pelo método *foam-mat*, chegou à conclusão que o modelo de Page ajustado aos dados experimentais descreveu de forma mais satisfatória os dados da secagem das espumas de abacaxi e manga com maiores coeficientes de determinação e menores erros relativos.

Observou-se que o modelo que apresentou maior coeficiente de determinação (R^2) e menor desvio quadrático médio (DQM) foi o de Page, considerando como o melhor modelo para estimar a curva de secagem da polpa de graviola em camada de espuma e o segundo melhor modelo foi o de Midilli e Kucuk. Constata-se que os dois modelos podem ser considerados para representar o processo de secagem, já que apresentaram coeficiente de determinação superiores a 0,97 e os desvios quadráticos médios inferiores a 0,06. Resultado semelhante ao de LISBOA et al, (2010). De acordo com Midilli et al. (2002), os modelos matemáticos são usados com o intuito de estimar o tempo de secagem dos produtos e também para obter as curvas de secagem que representam a operação.

PEREZ et al, (2013) utilizando os modelos de Page e Midilli para os ajustes da curva de secagem da polpa de cupuaçu verificou que o modelo de Page se ajustou bem aos dados experimentais de secagem, apresentando coeficientes de determinação (R^2) superiores a 99% e erros percentuais médios (P) inferiores a 8,5% podendo ser usados na predição da cinética de secagem da polpa de cupuaçu. Já o modelo de Midilli, apresentou valores P superiores a 70% não podendo representar o processo.

FURTADO et al, (2010) ao ajustar o modelo de Page, Henderson e Pabis e Midilli e Kucuk as curvas de secagem da polpa de seriguela pelo método de camada de espuma, verificou que todos os modelos analisados apresentaram ajustes com elevados coeficientes de determinação e baixo erro médio estimado. Nesse caso o modelo de Midilli e Kucuk foi o que melhor se ajustou aos dados observados, nas diferentes temperaturas de secagem, por apresentar o melhor coeficiente de determinação (R^2) e o menor erro médio estimado (SE). LAHSASNI et al, (2002) ao ajustar os modelos de Page, Henderson & Pabis e Midilli et al., curvas de secagem do figo-da-índia, verificaram que o modelo que se ajustou melhor foi o de Midilli et al., apresentando um R^2 de 0,9996.

SILVA et al. (2016) ao estudar a cinética de secagem de polpa de carambola para realizar a caracterização das curvas de secagem pelos modelos de Aproximação da difusão, Dois termos, Henderson & Pabis, Henderson & Pabis modificado, Lewis, Logarítmico, Midilli e

Kucuk, Thompson. Verificou que o modelo de Midilli foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais das secagens por apresentar menores desvios padrão da estimativa (SE).

Efeitos das variáveis de temperatura (T) e concentração de emulsificante (CE) sobre a cinética de secagem da polpa da graviola da Marca doce Mel®

Diante dos resultados da modelagem matemática pode-se verificar que os modelos de Page e Midilli foram os melhores em relação aos demais analisados, dessa forma a análise estatística foi realizada, com os parâmetros desses modelos em questão.

Na Tabela 8 estão apresentados os resultados do planejamento experimental obtidas dos ensaios experimentais, da avaliação da temperatura e concentração de emulsificante em relação cinética de secagem de polpa de graviola. A partir dos resultados experimentais das variáveis estudadas, estabeleceram-se os coeficientes de regressão a 5% de significância.

Tabela 8. Planejamento fatorial completo 2² e os resultados das respostas da cinética de secagem em relação a influência da temperatura e concentração de emulsificante.

Nº ensaio (tratamento)	Níveis das variáveis independentes codificados e reais		Respostas da cinética de Secagem	
	Temperatura (°C)	Concentração de emulsificante (%)	Modelo Page K (min ⁻¹)	Modelo Midilli K (min ⁻¹)
1	-1(50)	-1 (1,7)	0,0641	0,0682
2	1(70)	-1 (1,7)	0,0053	0,0066
3	-1(50)	1 (3)	0,1228	0,1363
4	1(70)	1(3)	0,1503	0,1531
5	0(60)	0(2,33)	0,1505	0,1563
6	0(60)	0(2,33)	0,1601	0,1681
7	0(60)	0(2,33)	0,1559	0,1629

Os resultados dos fatores Lineares e quadráticos (Q) e das interações para a constante cinética estimada para o modelo Midilli e Page encontram-se nas Tabelas 9 e 10, respectivamente. Em relação à constante cinética estimadas para os modelos de Midilli e Page, os parâmetros: temperatura e a interação temperatura e concentração de emulsificante foram significativos ($p \leq 0,05$), com exceção do parâmetro concentração de emulsificante. Os fatores temperatura e concentração de emulsificante avaliadas para os modelos de Midilli e Page apresentam efeitos negativos, assim observa-se que as elevações destes fatores indicam um efeito negativo, ou seja, uma diminuição na constante cinética de secagem da polpa da graviola. Com relação a interação dos parâmetros temperatura versus concentração de emulsificante, apresentaram efeitos positivos sobre a constante cinética estimadas para os modelos de Midilli e Page, indicando que um aumento em qualquer um destes fatores contribui para a elevação da constante cinética de secagem da polpa da graviola.

Tabela 9. Estimativa do coeficiente de regressão e teste T sobre as respostas da constante cinética do Modelo de Midilli.

Fator	Coefficientes	Erro puro	Teste T	p-valor
Média	0,138194	0,002942	46,9689	0,000453*
T	-0,001282	0,000065	-19,7940	0,002543*
CE	-0,000010	0,000065	-0,1575	0,889332
TxCE	0,000014	0,000001	13,8321	0,005186*

R²=69,06%

*Significativo a $p \leq 0,05$.

Tabela 10. Estimativa do coeficiente de regressão e teste T sobre as respostas da constante cinética do Modelo de Page.

Fator	Coefficientes	Erro puro	Teste T	p-valor
Média	0,131973	0,002394	55,1197	0,000329*
T	-0,001233	0,000053	-23,4060	0,001820*
CE	-0,000081	0,000053	-1,5454	0,262270
TxCE	0,000015	0,000001	17,6675	0,003188*

R²=68,91%

*Significativo a $p \leq 0,05$.

A análise de variância (ANOVA) obtida para a constante cinética estimadas para os modelos de Midilli e Page estão apresentados nas Tabelas 11 e 12, respectivamente.

Tabela 11. Análise de variância do modelo completo da tabela de regressão ($p \leq 0,05$) para a constante cinética modelo de Midilli.

Fonte de Variação	Soma quadrática	Grau de liberdade	Média quadrática	F _{calc} ($p \leq 0,05$)	F _{Tab} ($p \leq 0,05$)
Regressão	$1,43997 \times 10^{-2}$	2	$7,19989 \times 10^{-3}$	4,430	6,940
Resíduos	$6,49682 \times 10^{-3}$	4	$1,62420 \times 10^{-3}$		
Falta de Ajuste	0,006451	2	$3,22525 \times 10^{-3}$	139,260	19,00
Erro Puro	0,000046	2	$2,31600 \times 10^{-5}$		
Total	0,020897	6	$1,20725 \times 10^{-2}$		

R²=coeficiente de determinação: 68,91%

Tabela 12. Análise de variância (ANOVA) do modelo completo da tabela de regressão ($p \leq 0,05$) para a constante cinética Modelo de Page.

Fonte de Variação	Soma quadrática	Grau de liberdade	Média quadrática	F _{calc} ($p \leq 0,05$)	F _{Tab} ($p \leq 0,05$)
Regressão	$1,543962 \times 10^{-2}$	2	$7,71980 \times 10^{-3}$	4,46	6,940
Resíduos	$6,917301 \times 10^{-3}$	4	$1,72932 \times 10^{-3}$		
Falta de Ajuste	0,006847	2	$3,42367 \times 10^{-3}$	97,89	19,00
Erro Puro	0,000070	2	$3,49733 \times 10^{-5}$		
Total	0,022357	6	$1,29077 \times 10^{-2}$		

R²=coeficiente de determinação: 69,06%

Os valores de F obtidos para a constante cinética estimadas pelos modelos de Midilli e Page foram 1,6 vezes menores que os F tabelado a nível de confiança de 95%. De acordo com

Rodrigues & Iemma (2009), o modelo pode ser considerado estatisticamente significativo quando o valor de F calculado for superior a duas vezes o valor de F tabelado. Diante dos resultados, apresentados nas Tabelas 11 e 11, observa-se que o valor de F_{calc}/F_{tab} para regressão, foram 1,6 para a constante cinética estimadas pelos modelos de Midilli e Page. Por outro lado, o valor de F_{calc}/F_{tab-1} para a falta de ajuste, foram 7,3 e 5,2, para os modelos de Midilli e Page, respectivamente, indicando um modelo estatisticamente não significativo e não preditivo. Como os valores do coeficiente de determinação (R^2) estão inferiores a 0,70.

Segundo Neto, Scarminio e Bruns (1995; 2001), modelos com $R^2 < 0,70$ devem ser usados somente como indicadores de tendência, nunca para fins preditivos. Assim, o modelo linear sugerido pelo delineamento experimental 2^2 mais três pontos centrais, não é indicado para descrever a cinética de secagem da polpa da graviola. Sugere-se que o delineamento experimental seja ampliado com a incorporação dos pontos axiais para enfim, averiguar se o modelo proposto seja significativo e preditivo.

Propriedades Termodinâmicas para o delineamento experimental 2^2 mais três pontos centrais

Os valores do coeficiente efetivo de difusão para o delineamento experimental 2^2 mais três pontos centrais estão apresentados na Tabela 2. O coeficiente efetivo de difusão foi obtido por meio de uma regressão não linear da Equação (11), com aproximação de três termos pelo método Gauss Newton, utilizando o software Statística 7.0[®], com os dados da razão do teor de água.

Tabela 13: Coeficiente de Difusão Efetivo para o delineamento experimental 2^3 mais 3 pontos centrais.

Ensaio	Def x10 ¹⁰ (m ² /s)	R ² (%)
1	256,22	81,69%
2	403,99	70,192
3	376,03	81,616
4	598,67	81,628
5	536,81	81,129
6	520,72	81,133
7	544,33	81,151

Pode-se verificar com os dados da Tabela 13 que durante a secagem da polpa da graviola, a difusividade efetiva apresentou valores entre $256,22 \times 10^{-10}$ até $598,67 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, para o delineamento experimental 2^2 mais três pontos centrais, aumentando com o aumento da temperatura. Esse comportamento físico está de acordo com a ordem de grandeza de Baptestini et al. (2015), que reportaram durante a secagem da graviola em leito de espuma os valores do coeficiente de difusão variaram de $4,122 \times 10^{-10}$ até $1,799 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para a faixa de temperatura de 40°C até 80°C e a espessura da camada. Furtado et al., (2010) analisando a secagem da polpa da seriguela em leito de espuma, os valores do coeficiente de difusão também aumentaram com a elevação da temperatura de 60 até 80°C, obtiveram valores na faixa de $1,9987 \times 10^{-7}$ até $4,5613 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

Nas Tabelas 14 e 15 são apresentadas o teste T e a Anova com relação ao coeficiente de difusão efetivo para a polpa da graviola, com 95% de confiança. Como o valor do coeficiente de determinação (R^2) encontrado foi muito baixo, igual a 32,95%. Desse modo, o modelo linear sugerido pelo delineamento experimental 2^2 mais três pontos centrais, não é indicado

para descrever a cinética de secagem da polpa da graviola. Conforme foi dito anteriormente, sugere-se que o delineamento experimental seja ampliado com a incorporação dos pontos axiais para enfim, averiguar se o modelo proposto seja significativo, preditivo e com coeficiente de determinação possa explicar os dados experimentais. Diante desse resultado, não é interessante a estimativa da energia de ativação (E_a) e das propriedades termodinâmicas, a partir do coeficiente de difusão cuja modelo linear obtido não é confiável estatisticamente.

Tabela 14. Estimativa do coeficiente de regressão e teste T com relação ao coeficiente de difusão efetivo (D_{ef}).

Fator	Coefficientes	Erro puro	Teste T	p-valor
Média	$4,63135 \times 10^{-8}$	$6,00079 \times 10^{-10}$	77,17893	0,000168*
T	$-5,46476 \times 10^{-11}$	$1,32070 \times 10^{-11}$	-4,13775	0,053743
CE	$-8,20594 \times 10^{-11}$	$1,32070 \times 10^{-11}$	-6,21329	0,024939*
TxCE	$2,68237 \times 10^{-12}$	$2,10168 \times 10^{-13}$	12,76296	0,006083*

R^2 = coeficiente de determinação :32,95%

*Significativo a $p \leq 0,05$

Tabela 15: Análise de variância (ANOVA) do modelo completo da tabela de regressão ($p \leq 0,05$) para o coeficiente de difusão efetivo.

Fonte de Variação	Soma quadrática	Grau de liberdade	Média quadrática	Fcalc ($p \leq 0,05$)	FTab ($p \leq 0,05$)
Regressão	$2,88640 \times 10^{-16}$	2	$1,44320 \times 10^{-16}$	0,98	6,940
Resíduos	$5,87377 \times 10^{-16}$	4	$1,468444 \times 10^{-16}$		
Falta de Ajuste	$5,84468 \times 10^{-16}$	2	$2,922341 \times 10^{-16}$	200,88	19,00
Erro Puro	$2,90956 \times 10^{-18}$	2	$1,45478 \times 10^{-18}$		
Total	$8,76018 \times 10^{-16}$	6	$5,848534 \times 10^{-16}$		

R^2 = coeficiente de determinação: 32,95%

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os resultados obtidos pode-se concluir que o modelo de Page e Midilli foram os que melhor se ajustaram a cinética de secagem da polpa de graviola em camada de espuma por apresentar o melhor coeficiente de determinação (R^2) e o menores desvio quadrático médio.

Os valores do coeficiente de difusão aumentaram com o aumento da temperatura. Com relação ao delineamento experimental avaliado 2^2 mais três pontos centrais não foi possível, estabelecer um modelo linear matemático, pois o mesmo não seria confiável estatisticamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, C. A. et al. Avaliação da cinética de secagem em frutos de acerola. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, v.6, n.1, p.145-151, 2006.
- APTESTINI, F.M. et al. Modelagem matemática da secagem de espuma de graviola. **Rev. bras. Eng. agríc. Ambient.** vol.19, n.12, p.1203-1208, 2015.
- BOTELHO, H.H.V.; PESSOA, G.O.; ROCHA, L.G.P.; YESTE, M. Hormone supplementation protocol using estradiol benzoate and long-acting progesterone is efficient in maintaining pregnancy of anovulatory recipient mares during autumn transitional phase. *Animal Reproduction Science*, p.39-43, 2015.
- BROOKER, D.B., BAKKER-ARKEMA, F.W. & HALL, C.W. Drying and storage of grains and oilseeds. Westport, The Avi Publishing Company. p.450, 1992.
- CAVALCANTE, P.B. Frutas comestíveis da Amazônia. Belém: Museu Paraense Emilio Goeldi, p.279, 1991.
- CORRÊA, P.C. et al. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Rev. Ceres**, Viçosa, v. 57, n.5, p. 595-601, 2010.
- DANTAS, S. C. M. et al. Desidratação de polpas de Frutas pelo método *foam-mat*. Dissertação de Mestrado, UFRN, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. Área de concentração: Engenharia de Processos. Natal/RN, 2010.
- DIEB, J.T.; GURGEL, C.E.M.R.; MACHADO, A.K.T.; MEDEIROS, M. F. D. Secagem da polpa de graviola (*Annona muricata* L.) em camada de espuma: avaliação dos parâmetros de secagem. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. São Carlos-SP, 2015.
- FAO STATISTICS. Production and trade – Castor beans. 2005. Disponível em: <<http://www.fao.org/brasil/pt/>>. Acesso em: 18 ago. 2016.
- FELLOWS, P.J. Tecnologia do processamento de alimentos: Princípios e prática. Porto Alegre: Artmed, p. 602, 2006.
- FRANCO, B.D.G.M.; LANDGRAF, M. Microbiologia dos Alimentos, Editora Atheneu. São Paulo/SP, p.182, 2015.
- Furtado, G.F.; Silva, F.S.; Porto, A.G.; Santos, P. Secagem de polpa de seriguela pelo método de camada de espuma. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.12, n.1, p.9-14, 2010.
- GURGEL, C.E.M.R.; DIEB, J.T.; MACHADO, I.P.; DANTAS, T.N.P.; CORREIA, T.P.; MEDEIROS, M.F.D. Cinética de secagem da polpa de graviola pelo processo *foam-mat*. **XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química**. Florianópolis/ SC, 2014.

GURJÃO, K.C.O. Desenvolvimento, armazenamento e secagem de tamarindo (*Tamarindus indica* L.). Tese (Doutorado em agronomia) - Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, Areia/PB. p.165, 2006.

J. T. DIEB. Secagem da polpa de graviola pelo processo foam-mat e avaliação sensorial do produto obtido. XI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, Unicamp – Campinas – SP, 2015.

JIDEANI, V.A.; MPOTOKWANA, S.M. modeling of water absorption of Botswana Bambara varieties using Peleg's equation. **Journal of Food Engineering**, p.182-188, 2009.

LAHSASNI, S.; KOUHILA, M.; MAHROUZ, M.; KECHAOU, N. Experimental study and modelling of adsorption and desorption isotherms of prickly pear peel (*Opuntia ficus indica*). *Journal of Food Engineering*, Essex, v. 55, n. 3, p. 201-207, 2002.

LEITE, A. L. M. P. et al. Contração volumétrica e cinética de secagem de fatias de banana variedade Terra. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 45, n. 2, p. 155-162, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/1983-40632015v4530270>

LISBOA, C. G. C. Armazenamento de figo-da-índia em pó sob atmosfera controlada. Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFCG – Campina Grande, 2010.

MACHADO, I.P.; FERREIRA, A.E.S.; MACHADO, A.K.T.; DELMIRO, T.M.; MEDEIROS, M.F.D.; Secagem em leito de jorro da polpa de graviola com adição de leite. Efeito das variáveis de operação sobre a taxa de produção e umidade do pó. In: **Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química**. São Paulo: Blucher, 2015.

MARTINS, G.M.V.; FERREIRA, J.P.L.; SANTOS, A.E.; NOBRE, R.S. Cinética de Secagem em Camada Fina da Polpa de Cladódios de Palma Forrageira em Estufa Com Circulação Forçada de Ar. In: **XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química**. Florianópolis. XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química. São Paulo: Edgard Blücher Ltda. v.1, p.4185-4192, 2015.

MENGES, H. O.; ERTEKIN, C. Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples. **Journal of Food Engineering**, v. 77, n. 1, p. 119–125, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.06.049>

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

PEREZ, L.G. et al. *Revista Ciência Agrônoma*, v. 44, n. 1, p. 102-106, jan-mar, 2013. Centro de Ciências Agrárias - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.

RAJKUMAR, P.; KAILAPPAN, R.; VISWANATHAN, R.; RAGHAVAN, G.S.V. Drying characteristic of foamed Alphonso mango pulp in a continuous type foam mat dryer. **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 4, p.1452-1459, 2007.

RAYAGURU, K.; ROURAY, W. Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of stone apple slices. *International Food Research Journal*. v. 19, n.4, p.1503- 1510, 2012.

SANTOS, P. et al. Influência de pré-tratamentos na cinética de secagem em diferentes temperaturas de banana da variedade terra (*Musa sapientum*, Linneo). **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, v. 4, n. 2, p. 218-234, 2010.

SILVA, C.R.R.; FONSECA, E.B.A; MOREIRA, M.A. A cultura da Mangueira, 2000. Disponível em: <www.editora.ufla.br/Boletim/pdfextensao/bol_24.pdf>. Acesso em: 26 jul 2016.

SILVA, S.E.L; GARCIA, T.B. A cultura da gravioleira (*Annona muricata* L.). Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, p.19, 1999.

Silva. R.B. et al. Revista brasileira de Tecnologia Agroindustrial. Ponta Grossa, v. 10, n. 2, p. 2069-2080, jul. /dez. 2016.

TONON, R.V.; BRABET, C.; HUBINGER, M. D. Influence of drying air temperature and carrier agent concentration on the physicochemical properties of acai juice powder. *Ciência e Tecnologia de Alimentos Campinas*, v. 2, n. 29, p. 444-450, 2009.

VIEIRA, L.M.; SOUSA, M.S.B.; MANCINI-FILHO, J.; LIMA, A. Fenólicos totais e capacidade antioxidante *in vitro* de polpas de frutos tropicais. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.33, n.3, p.888-897, 2011.