



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
AGRÍCOLA**



DISSERTAÇÃO

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM PROCESSAMENTO E ARMAZENAMENTO
DE PRODUTOS AGRÍCOLAS**

PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS E SECAGEM DA POLPA DE NONI E UMBU

KAROLINE THAYS ANDRADE ARAÚJO

**CAMPINA GRANDE – PARAÍBA
FEVEREIRO – 2018**

PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS E SECAGEM DA POLPA DE NONI E UMBU

KAROLINE THAYS ANDRADE ARAÚJO

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas

ORIENTADORES: Prof. Dr. Alexandre José de Melo Queiroz

Prof.^a Dr.^a Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo

CAMPINA GRANDE – PARAÍBA

FEVEREIRO – 2018

- A663p Araújo, Karoline Thays Andrade.
Propriedades termofísicas e secagem da polpa de noni e umbu /
Karoline Thays Andrade Araújo. – Campina Grande, 2018.
118 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade
Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais,
2018.
- "Orientação: Prof. Dr. Alexandre José de Melo Queiroz, Profa. Dra.
Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo".
- Referências.
1. Secagem de Produtos Agrícolas. 2. Polpa de Umbu (*Spondias
tuberosa* L.) – Secagem. 3. Polpa de Noni (*Morinda citrifolia* L.) –
Secagem. 4. Umbu e Noni – Desidratação – Calor Específico e
Isostérico. 5. Isotermas. I. Queiroz, Alexandre José de Melo.
II. Figueirêdo, Rossana Maria Feitosa de. III. Título.

CDU 631.563.2(043)



PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO

KAROLINE THAYS ANDRADE ARAÚJO


PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS E SECAGEM DA POLPA DE NONI E UMBU


APROVADO: 28 de fevereiro de 2018

BANCA EXAMINADORA


Dr. Alexandre José de Melo Queiroz
Orientador - UAEA/CTRN/UFCG


Dra. Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo
Orientadora - UAEA/CTRN/UFCG


Dra. Josivanda Palmeira Gomes
Examinadora - UAEA/CTRN/UFCG


Dr. Bruno Adelino de Melo
Examinador - PDJ/CNPq

“Entrega o teu caminho ao Senhor; confia nEle, e Ele o fará.”

(Salmos 37:5)

AGRADECIMENTOS

A Deus, que tudo pode, e ao seu filho amado, Jesus Cristo, por minha vida.

Aos meus pais, Hamilton Barbosa de Araújo e Ana Silvia Andrade de Araújo, por aceitarem a missão de cuidar, educar e amar a mim e aos meus irmãos.

Aos meus irmãos, Thiago Danillo Andrade Araújo e Hamilcaa Thiany Andrade Araújo pelo companheirismo, amor e irmandade que temos um para com o outro.

Às minhas tias Ana Cristina Andrade Silva Santos, Ana Nery Cordeiro da Silva e Maria José Barbosa de Araújo por todo cuidado, acolhimento e carinho a mim dispensados em minha estadia na cidade de Campina Grande.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Alexandre José de Melo Queiroz e Prof^a. Dr^a. Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo, pela oportunidade de crescimento pessoal e profissional, pelos conhecimentos, paciência e atenção a mim dispensados.

À Prof^a. Dr^a. Josivanda Palmeira Gomes pelas oportunidades a mim confiadas ao longo da minha graduação em Engenharia Agrícola e pelo carinho e atenção que sempre tem com todos os alunos.

A todos os meus familiares pelo companheirismo nessa jornada chamada vida, em especial aos meus primos Thales Felipe, Ohana Andrade e Yalorisa Andrade, aos meus queridos amigos Franklin Gomes, Renato Costa, Ayanne Barreto e Sabrina Cordeiro.

Às amigas Regilane Marques, Inácia Moreira, Raphaela Maceió e Lumara Santos pela parceria, apoio e ensinamentos compartilhados nessa caminhada.

A todos(as) os(as) professores(as) e funcionários(as) que fazem parte da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola, em especial a Dermeval Araújo Furtado, Mozaniel Gomes da Silva, Soahd Arruda Rached Farias e Aldaniza Gonçalves de Moraes.

A todos que fazem parte do Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (LAPPA).

À Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e à Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola (UAEA), por possibilitarem o desenvolvimento deste trabalho.

À CAPES e ao CNPq, pelo financiamento da pesquisa e concessão da bolsa de estudos.

A vocês todo meu respeito e admiração.

Meus sinceros agradecimentos!

“Depois de muitas quedas, eu descobri que, às vezes, quando tudo dá errado, acontecem coisas tão maravilhosas que jamais teriam acontecido se tudo tivesse dado certo.

Eu percebi que quando me amei de verdade pude compreender que, em qualquer circunstância, eu estava no lugar certo, na hora certa.

Então pude relaxar... pude perceber que o sofrimento emocional é um sinal de que estou indo contra a minha verdade.

Parei de desejar que a minha vida fosse diferente e comecei a ver que tudo o que acontece contribui para o meu crescimento.

Desisti de querer ter sempre razão e com isso errei muito menos vezes.

Desisti de ficar revivendo o passado e de me preocupar com o futuro. Isso me mantém no presente, que é onde a vida acontece.

Descobri que na vida a gente tem mais é que se jogar, porque os tombos são inevitáveis.

Percebi que a minha mente pode me atormentar e me decepcionar. Mas quando eu a coloco a serviço do meu coração, ela se torna uma grande e valiosa aliada.

Também percebi que sem amor, sem carinho e sem verdadeiros amigos a vida é vazia e se torna amarga.

Ser feliz é reconhecer que vale a pena viver, apesar de todos os desafios, incompreensões e períodos de crise.

Pedras no caminho? Guardo todas, um dia vou construir um castelo...”

Mário Quintana

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	vi
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Objetivo geral	2
1.1.1 – Objetivos específicos	2
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 – Noni (<i>Morinda citrifolia</i> L.)	3
2.1.1 – Polpa de noni e seus constituintes	4
2.2 – Umbu (<i>Spondias tuberosa</i> Arruda Câmara)	4
2.2.1 – Polpa de umbu e seus constituintes	5
2.3 – Propriedades termofísicas	7
2.3.1 – Massa específica	8
2.3.2 – Calor específico	9
2.3.3 – Difusividade térmica	9
2.3.4 – Condutividade térmica	10
2.4 – Secagem	10
2.4.1 – Cinética de secagem	13
2.4.2 – Modelos matemáticos	13
2.5 – Isotermas de adsorção de água	16
2.5.1 – Calor isostérico	17
3 – MATERIAL E MÉTODOS	20
3.1 – Matérias-primas	20
3.2 – Processamento dos frutos	20
3.3 – Análises químicas, físicas e físico-químicas das polpas integrais	21
3.4 – Elaboração das polpas combinadas	22
3.5 – Propriedades termofísicas	22
3.5.1 – Massa específica	22
3.5.2 – Calor específico	23
3.5.3 – Difusividade térmica	25
3.5.4 – Condutividade térmica	26

3.6 – Secagem das polpas combinadas de noni com umbu	27
3.7 – Isotermas de adsorção de água	28
3.7.1 – Calor isostérico	30
3.8 – Análise estatística	31
4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1 – Caracterização química, física e físico-química das polpas integrais de umbu e noni	32
4.2 – Propriedades termofísicas	38
4.2.1 – Massa específica	38
4.2.2 – Calor específico	41
4.2.3 – Difusividade térmica	44
4.2.4 – Condutividade térmica	45
4.3 – Secagem	47
4.3.1 – Secagem da polpa combinada de noni com umbu (C ₁)	47
4.3.2 – Secagem da polpa combinada de noni com umbu (C ₂)	53
4.3.3 – Secagem da polpa combinada de noni com umbu (C ₃)	57
4.4 – Isotermas de adsorção de água	62
4.4.1 – Isotermas de adsorção de água dos pós da polpa combinada de noni com umbu (C ₁)	62
4.4.2 – Isotermas de adsorção de água dos pós da polpa combinada de noni com umbu (C ₂)	66
4.4.3 – Isotermas de adsorção de água dos pós da polpa combinada de noni com umbu (C ₃)	70
4.5 – Calor isostérico	74
4.5.1 – Calor isostérico do pó da polpa combinada de noni com umbu (C ₁)	74
4.5.2 – Calor isostérico do pó da polpa combinada de noni com umbu (C ₂)	78
4.5.3 – Calor isostérico do pó da polpa combinada de noni com umbu (C ₃)	82
5 – CONCLUSÕES	86
6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
APÊNDICE A	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Frutos do noni (<i>Morinda citrifolia</i> L.)	3
Figura 2.2 – Frutos do umbuzeiro (<i>Spondias tuberosa</i> A.)	5
Figura 2.3 – Esquema do secador com circulação de ar sobre as bandejas	12
Figura 3.1 – Fluxograma do processamento para obtenção das polpas de noni e umbu	20
Figura 4.1 – Efeito da temperatura na massa específica da polpa de umbu, noni e suas combinações	40
Figura 4.2 – Efeito da temperatura no calor específico das polpas de umbu, noni e suas combinações	42
Figura 4.3 – Curvas de cinética de secagem da polpa combinada C ₁ (25% noni + 75% umbu) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C	48
Figura 4.4 – Curvas de cinética de secagem da polpa combinada C ₁ (25% noni + 75% umbu) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C com ajustes pelo modelo de Page	52
Figura 4.5 – Curvas de cinética de secagem da polpa combinada C ₂ (50% noni + 50% umbu) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C	53
Figura 4.6 – Curvas de cinética de secagem da polpa combinada C ₂ (50% noni + 50% umbu) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C com ajustes pelo modelo de Page	57
Figura 4.7 – Curvas de cinética de secagem da polpa combinada C ₃ (75% noni + 25% umbu) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C	58
Figura 4.8 – Curvas de cinética de secagem da polpa combinada C ₃ (75% noni + 25% umbu) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C com ajustes pelo modelo de Page	61
Figura 4.9 – Isotermas de adsorção de água estimadas pelo modelo de GAB, dos pós da polpa combinada C ₁ nas temperaturas de: (a) 20 °C; (b) 30 °C; e (c) 40 °C	65
Figura 4.10 – Isotermas de adsorção de água estimadas pelo modelo de GAB, dos pós da polpa combinada C ₂ nas temperaturas de: (a) 20 °C; (b) 30 °C; e (c) 40 °C	69

Figura 4.11 – Isotermas de adsorção de água estimadas pelo modelo de GAB, dos pós da polpa combinada C ₃ nas temperaturas de: (a) 20 °C; (b) 30 °C; e (c) 40 °C	73
Figura 4.12 – Valores de ln(a _w) em função do inverso da temperatura absoluta, para diferentes teores de água de equilíbrio (% b.s.) para o pó da polpa combinada C ₁ (25% noni + 75% umbu) seca em estufa a 40 °C	74
Figura 4.13 – Valores de ln(a _w) em função do inverso da temperatura absoluta, para diferentes teores de água de equilíbrio (% b.s.) para o pó da polpa combinada C ₁ (25% noni + 75% umbu) seca em estufa a 50 °C	75
Figura 4.14 – Valores de ln(a _w) em função do inverso da temperatura absoluta, para diferentes teores de água de equilíbrio (% b.s.) para o pó da polpa combinada C ₁ (25% noni + 75% umbu) seca em estufa a 60 °C	75
Figura 4.15 – Valores de ln(a _w) em função do inverso da temperatura absoluta, para diferentes teores de água de equilíbrio (% b.s.) para o pó da polpa combinada C ₁ (25% noni + 75% umbu) seca em estufa a 70 °C	76
Figura 4.16 – Valores experimentais e preditos do calor isostérico integral de sorção (Q _{st}) estimados em função do teor de água de equilíbrio do pó do combinado de polpa (25% noni + 75% umbu) seco em estufa a: a) 40; b) 50; c) 60; e d) 70 °C	78
Figura 4.17 – Valores de ln(a _w) em função do inverso da temperatura absoluta, para diferentes teores de água de equilíbrio (% b.s.) para o pó da polpa combinada C ₂ (50% noni + 50% umbu) seca em estufa a 40 °C	79
Figura 4.18 – Valores de ln(a _w) em função do inverso da temperatura absoluta, para diferentes teores de água de equilíbrio (% b.s.) para o pó da polpa combinada C ₂ (50% noni + 50% umbu) seca em estufa a 50 °C	79

Figura 4.19 – Valores de $\ln(a_w)$ em função do inverso da temperatura absoluta, para diferentes teores de água de equilíbrio (% b.s.) para o pó da polpa combinada C ₂ (50% noni + 50% umbu) seca em estufa a 60 °C	80
Figura 4.20 – Valores de $\ln(a_w)$ em função do inverso da temperatura absoluta, para diferentes teores de água de equilíbrio (% b.s.) para o pó da polpa combinada C ₂ (50% noni + 50% umbu) seca em estufa a 70 °C	80
Figura 4.21 – Valores experimentais e preditos do calor isostérico integral de sorção (Q _{st}) em função do teor de água de equilíbrio do pó da polpa combinada C ₂ (50% noni + 50% umbu) seco em estufa: a) 40; b) 50; c) 60; e d) 70 °C	82
Figura 4.22 – Valores de $\ln(a_w)$ em função do inverso da temperatura absoluta para diferentes teores de água de equilíbrio (% b.s.) para o pó da polpa combinada C ₃ (75% noni + 25% umbu) seca em estufa a 40 °C	83
Figura 4.23 – Valores de $\ln(a_w)$ em função do inverso da temperatura absoluta, para diferentes teores de água de equilíbrio (% b.s.) para o pó da polpa combinada C ₃ (75% noni + 25% umbu) seca em estufa a 50 °C	83
Figura 4.24 – Valores de $\ln(a_w)$ em função do inverso da temperatura absoluta, para diferentes teores de água de equilíbrio (% b.s.) para o pó da polpa combinada C ₃ (75% noni + 25% umbu) seca em estufa a 60 °C	84
Figura 4.25 – Valores de $\ln(a_w)$ em função do inverso da temperatura absoluta para diferentes teores de água de equilíbrio (% b.s.) para o pó da polpa combinada C ₃ (75% noni + 25% umbu) seca em estufa a 70 °C	84
Figura 4.26 – Valores experimentais e preditos do calor isostérico integral de sorção (Q _{st}) em função do teor de água de equilíbrio (% b.s.) do pó da polpa combinada C ₃ (75% noni + 25% umbu) seco em estufa: a) 40; b) 50; c) 60; e d) 70 °C	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	– Composição físico-química da polpa de umbu	6
Tabela 2.2	– Composição em 100 g do fruto do umbu in natura	6
Tabela 2.3	– Modelos matemáticos de isotermas de sorção de água	17
Tabela 3.1	– Equações para calcular a massa específica de produtos alimentícios	22
Tabela 3.2	– Equações usadas para calcular o calor específico de produtos alimentícios	24
Tabela 3.3	– Equações usadas para calcular a difusividade térmica de produtos alimentícios	26
Tabela 3.4	– Equações para calcular a condutividade térmica de produtos alimentícios	26
Tabela 3.5	– Modelos matemáticos ajustados às curvas de cinética de secagem das polpas combinadas de noni com umbu	28
Tabela 4.1	– Valores médios dos parâmetros químicos, físicos e físico-químicos da polpa de umbu integral	32
Tabela 4.2	– Valores médios dos parâmetros químicos, físicos e físico-químicos da polpa de noni integral	35
Tabela 4.3	– Massa específica (kg/m^3) da polpa de umbu, noni e suas combinações em função de diferentes temperaturas	38
Tabela 4.4	– Valores da massa específica teórica e erros percentuais para a polpa de umbu e noni em diferentes temperaturas	40
Tabela 4.5	– Calor específico ($\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$) da polpa de umbu, noni e suas combinações em função de diferentes temperaturas	41
Tabela 4.6	– Valores do calor específico teórico ($\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$) e erros percentuais para a polpa de umbu e noni em diferentes temperaturas	43
Tabela 4.7	– Difusividade térmica (m^2/s) das polpas de umbu, noni e suas combinações	44
Tabela 4.8	– Valores da difusividade térmica teórica e erros percentuais para a polpa de umbu e noni em diferentes temperaturas	45
Tabela 4.9	– Condutividade térmica ($\text{W/m } ^\circ\text{C}$) da polpa de umbu, noni e suas combinações em função de diferentes temperaturas	46

Tabela 4.10 – Valores das condutividades térmicas teóricas e erros percentuais para a polpa de umbu e noni em diferentes temperaturas	47
Tabela 4.11 – Teores de água e tempos de secagem da polpa combinada C ₁ (25% noni + 75% umbu) em diferentes temperaturas	49
Tabela 4.12 – Parâmetros dos modelos Henderson e Pabis, Exponencial Dois Termos, Logarítmico, Page e Newton, com seus respectivos coeficientes de determinação (R ²) e desvios quadráticos médios (DQM) ajustados à cinética de secagem da polpa combinada C ₁ (25% noni + 75% umbu)	51
Tabela 4.13 – Teores de água e tempos de secagem da polpa combinada C ₂ (50% noni + 50% umbu) em diferentes temperaturas	54
Tabela 4.14 – Parâmetros dos modelos Henderson e Pabis, Exponencial Dois Termos, Logarítmico, Page e Newton, com seus respectivos coeficientes de determinação (R ²) e desvios quadráticos médios (DQM) da cinética de secagem da polpa combinada C ₂ (50% noni + 50% umbu)	55
Tabela 4.15 – Teores de água e tempos de secagem da polpa combinada C ₃ (75% noni + 25% umbu) em diferentes temperaturas	59
Tabela 4.16 – Parâmetros dos modelos Henderson e Pabis, Exponencial Dois Termos, Logarítmico, Page e Newton, com seus respectivos coeficientes de determinação (R ²) e desvios quadráticos médios (DQM) da cinética de secagem da polpa combinada C ₃ (75% noni + 25% umbu)	60
Tabela 4.17 – Parâmetros dos modelos GAB, Oswin, Halsey e Smith ajustados as isotermas de adsorção de água dos pós da polpa combinada C ₁ , obtidos em diferentes temperaturas, com seus respectivos coeficientes de determinação (R ²) e desvios percentuais médios (P)	63
Tabela 4.18 – Parâmetros dos modelos GAB, Oswin, Halsey e Smith ajustados as isotermas de adsorção de água dos pós da polpa combinada C ₂ , obtidos em diferentes temperaturas, com seus respectivos coeficientes de determinação (R ²) e desvios percentuais médios (P)	67

Tabela 4.19 – Parâmetros dos modelos GAB, Oswin, Halsey e Smith ajustados as isotermas de adsorção de água dos pós da polpa combinada C ₃ , obtidos em diferentes temperaturas, com seus respectivos coeficientes de determinação (R ²) e desvios percentuais médios (P)	70
Tabela 4.20 – Valores do calor isostérico líquido (q _{st}) e calor isostérico integral de sorção (Q _{st}) para diferentes teores de água de equilíbrio do pó da polpa combinada C ₁ (25% noni + 75% umbu) seca em estufa a 40, 50, 60 e 70 °C	77
Tabela 4.21 – Valores do calor isostérico líquido (q _{st}) e calor isostérico integral de sorção (Q _{st}) para diferentes teores de água de equilíbrio do pó da polpa combinada C ₂ (50% noni + 50% umbu) seca em estufa a 40, 50, 60 e 70 °C	81
Tabela 4.22 – Valores do calor isostérico líquido (q _{st}) e calor isostérico integral de sorção (Q _{st}) para diferentes teores de água de equilíbrio do pó da polpa combinada C ₃ (75% noni + 25% umbu) seca em estufa a 40, 50, 60 e 70 °C	85

RESUMO

O conhecimento das propriedades termofísicas de produtos agrícolas é de fundamental importância para os projetos de engenharia, uma vez que fornece informações para o desenvolvimento e otimização de processos e equipamentos para o processamento e armazenamento dos mesmos. O presente trabalho teve como objetivo determinar as características químicas, físico-químicas e as propriedades termofísicas (massa específica, calor específico, difusividade e condutividade térmica) das polpas integrais de noni e umbu e das polpas combinadas em diferentes proporções, as cinéticas de secagem das polpas combinadas em diferentes temperaturas (40, 50, 60 e 70 °C) e as isotermas de adsorção de água dos pós dos combinados de polpa de noni com umbu. As análises químicas e físico-químicas foram determinadas de acordo com as normas do Instituto Adolfo Lutz; a massa específica pelo método do picnômetro; o calor específico em calorímetro de mistura; para a difusividade térmica utilizou-se o cilindro de Dickerson e a condutividade térmica foi determinada, indiretamente, com os resultados de massa específica, calor específico e difusividade térmica. A secagem foi em secador de bandejas, para as isotermas de adsorção de água utilizou-se o Aqualab e, a partir das isotermas, foi calculado o calor isostérico de sorção. As polpas de noni e de umbu integral apresentaram baixo teor de lipídeos e proteínas e predominância da intensidade de amarelo; a polpa de noni integral apresentou alto teor de ácido ascórbico. As massas específicas das polpas de umbu e de noni integrais e as polpas combinadas apresentaram reduções com o aumento da temperatura. O calor específico apresentou tendência de aumento com aumento da temperatura em todas as polpas integrais e combinadas. A polpa de umbu apresentou difusividade térmica maior que a polpa de noni. A condutividade térmica das polpas apresentou tendência de aumento com o aumento da temperatura. O modelo Page foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais da cinética de secagem nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C. Os modelos ajustados às isotermas de adsorção de água predisseram satisfatoriamente as curvas, com o modelo de GAB, de modo geral, obtendo os melhores ajustes e as isotermas foram classificadas como Tipo II. Houve uma tendência de redução do calor isostérico integral de sorção com o aumento do teor de água de equilíbrio. Quanto menor o teor de água de equilíbrio maior a energia necessária para a remoção da água contida no produto.

Palavras-chave: *Morinda citrifolia* L., *Spondias tuberosa* Arruda Câmara, desidratação, calor específico, isotermas, calor isostérico.

ABSTRACT

The knowledge of the thermophysical properties of agricultural products is of fundamental importance for engineering projects, since it provides information for the development and optimization of processes and equipment for their processing and storage. The aim of the present work was to determine the chemical, physicochemical and thermophysical characteristics (specific mass, specific heat, diffusivity and thermal conductivity) of the noni and umbu whole pulps and the combined pulps in different proportions, the drying kinetics of the mixed pulps at different temperatures (40, 50, 60 and 70 °C) and the water adsorption isotherms of the powders of the combined noni pulp with umbu. The chemical and physico-chemical analyzes were determined according to the norms of the Adolfo Lutz Institute; the specific mass by the pycnometer method; the specific heat in the calorimeter of mixture; for the thermal diffusivity the Dickerson's cylinder was used and the thermal conductivity was indirectly determined with the results of specific mass, specific heat and thermal diffusivity. Drying was done in trays dryer, for the water adsorption isotherms the Aqualab was used and, from the isotherms, the isosteric sorption heat was calculated. The pulps of noni and integral umbu presented low lipid and protein content and predominance of yellow intensity; the whole noni pulp presented high ascorbic acid content. The specific masses of the whole umbu and noni pulps and the combined pulps showed reductions with increasing temperature. The specific heat showed a tendency of increase with temperature increase in all the whole and combined pulps. The umbu pulp showed higher thermal diffusivity than the noni pulp. The thermal conductivity of the pulps showed a tendency to increase with increasing temperature. The Page model was the best fit for experimental data on drying kinetics at temperatures of 40, 50, 60 and 70°C. The models adjusted to the water adsorption isotherms satisfactorily predicted the curves, with the GAB model, in general, obtaining the best adjustments and the isotherms were classified as Type II. There was a trend of reduction of the integral isosteric sorption heat with the increase of the equilibrium water content. The lower the equilibrium water content the greater the energy required to remove the water contained in the product.

Key words: *Morinda citrifolia* L, *Spondias tuberosa* Arruda Câmara, dehydration, specific heat, isotherms, isosteric heat.

1 – INTRODUÇÃO

A produção brasileira de frutas estimada para 2017 foi de aproximadamente 44 milhões de toneladas (IBGE, 2017). Esse volume mantém o Brasil como terceiro maior produtor de frutas do mundo, atrás apenas da China e da Índia, respectivamente, e suas produções são destinadas principalmente aos seus mercados internos. As condições de clima, solo e sua posição geográfica, aliados à extensão territorial, é o que possibilita ao Brasil a grande oferta de frutas tropicais e de clima temperado, com destaque para a banana, laranja, uva, limão, abacaxi, mamão, maçã, melancia, manga e caju.

Algumas frutas, mesmo apresentando excelentes propriedades sensoriais, ainda são pouco conhecidas pela maior parte da população e, geralmente, consumidas apenas pelas pessoas que vivem na região de origem ou de produção. Segundo a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO, 2012), somente no Brasil, cerca de 120 espécies de “novas frutas”, tropicais, incluindo nativas e exóticas, disputam lugar nesse concorrido mercado que é dominado por poucas espécies. O termo exótico pode ser utilizado para identificar certas frutas com formato, textura, cor, aroma e sabor bem incomuns e pouco conhecidos, geralmente estas não são originárias do Brasil, ou seja, foram trazidas na época da colonização.

A agroindústria mantém uma busca constante pela exploração de novos produtos, que aumentem a diversificação e oferta de sabores ou que se enquadrem como alimentos funcionais, sendo esta intensificada à medida em que as pesquisas têm comprovado os efeitos benéficos à saúde de fitonutrientes naturalmente presente nos vegetais.

Dentre as frutas exóticas com alto valor nutricional, se destaca o noni (*Morinda citrifolia* L.), planta da família das rubiáceas, nativa do Sudeste da Ásia e que produz frutos de importantes propriedades nutricionais. Há mais de 2000 anos estes frutos são utilizados na Polinésia, China e Índia, e nos últimos anos o seu cultivo foi iniciado também no Brasil (POLTRONIERI et al., 2009).

A baixa aceitabilidade do noni em vista de suas características sensoriais, costuma ser contornada pela mistura com polpas de outras frutas e, assim, frutas com sabor marcante e acidez elevada mascaram o sabor do noni, que lembra o de queijos fortes. Dentre as frutas nativas do Brasil destaca-se com tais características o fruto do umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda), que é uma planta nativa da caatinga, totalmente adaptada às condições de clima e solo do semiárido Nordeste. O umbu é um fruto pequeno e arredondado, de casca lisa ou com pequenos pelos que lhe conferem uma textura

levemente aveludada, com coloração verde-amarelada, sabor ácido e odor agradável, sendo rico em vitamina C. Para garantir a produção comercial de grande parte das frutas, quando não consumidas assim que colhidas, é necessário submetê-las a alguns processamentos, entre os quais o resfriamento ou congelamento, a fim de preservar suas características.

Sendo o noni e o umbu frutas relativamente pouco conhecidas e exploradas em nível industrial, o processamento das polpas é realizado de forma rudimentar, com baixo conteúdo tecnológico, fato que se explica, entre outros, pela falta de conhecimento de suas propriedades físicas, necessárias para o dimensionamento correto de equipamentos e processos.

Assim sendo, justificam-se trabalhos que contribuam com conhecimentos sobre a combinação dessas polpas em situações de processamento.

1.1 – Objetivo geral

Caracterizar a polpa integral do noni e do umbu quanto às propriedades termofísicas e estudar a secagem da polpa de noni combinada com a polpa de umbu.

1.1.1 – Objetivos específicos

- Caracterizar as polpas integrais de noni e umbu quanto ao teor de água, sólidos solúveis totais, atividade de água, acidez total titulável, pH, açúcares redutores e não redutores, cinzas, lipídeos, proteínas, ácido ascórbico e cor;
- Determinar a massa específica, calor específico, difusividade térmica e condutividade térmica nas temperaturas de 5, 30 e 65 °C das polpas de noni integral, de umbu integral e das polpas combinadas de noni (25, 50 e 75%) com umbu;
- Estudar a cinética de secagem de combinados de polpa de noni nas proporções de 25, 50 e 75% com polpa de umbu, nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C.
- Determinar as isotermas de adsorção de água das amostras secas dos combinados de polpas de noni com umbu;
- Determinar o calor isostérico de sorção das amostras secas dos combinados das polpas de noni com umbu.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Noni (*Morinda citrifolia* L.)

A *Morinda citrifolia* L. (noni) é uma planta popular, cujo potencial relacionado às propriedades medicinais é relatado há mais de 2000 anos, principalmente devido ao seu vasto uso pelos povos da Polinésia. A planta é um arbusto que tem origem nas ilhas do Oceano Pacífico, no sudeste da Ásia e em áreas tropicais e subtropicais (McCLATCHEY, 2002; WANG et al., 2002). Seu cultivo ocorre na Polinésia, Índia, Caribe, regiões centro e norte da América do Sul, locais que oferecem condições adequadas de desenvolvimento (DIXON et al., 1999).

As várias partes da planta (folhas, raízes, frutos, caules e cascas) são consumidas de diversas maneiras: como alimento, fitoterápico e ainda para tingimento de tecidos (WANG et al., 2002). Essa utilização ocorre há muitos anos, principalmente com dois propósitos: as raízes e as cascas são utilizadas para tingir roupas e cerâmicas e todas as partes da planta têm sido utilizadas como um suplemento alimentar (PALU et al., 2008).



Figura 2.1 – Frutos do noni (*Morinda citrifolia* L.) (Fonte: <https://food.ndtv.com/>)

Conforme a medicina tradicional e popular, a planta tem a capacidade de prevenir ou curar diversas enfermidades como alergia, artrite, asma, infecções bacterianas, câncer, diabetes, hipertensão, distúrbios menstruais e musculares, obesidade, úlceras gástricas, cefaleias, insônia, depressão, estresse, problemas respiratórios, esclerose múltipla e até dependência química (LAVAUT e LAVAUT, 2003; McCLATCHEY, 2002; WANG et al., 2002).

2.1.1 – Polpa de noni e seus constituintes

A fruta contém 90% de água e os principais componentes da matéria seca parecem ser sólidos solúveis totais, fibras alimentares e proteínas (CHAN-BLANCO et al., 2006). Em quantidade substancial estão os hidratos de carbono, incluindo proporções variáveis de sacarose, frutose e glicose (JENSEN et al., 2005). O teor de proteína do fruto é 11,3% da matéria seca a partir do suco e os aminoácidos principais são o ácido aspártico, ácido glutâmico e isoleucina (CHUNHIENG, 2003). Elevada porcentagem de minerais, 8,4% da matéria seca também é verificada sendo os principais o potássio, enxofre, cálcio e fósforo. As principais vitaminas encontradas no fruto são ácido ascórbico e provitamina A (CHAN-BLANCO et al., 2006).

Cerca de 160 compostos fitoquímicos já foram identificados na planta *Morinda citrifolia* L., sendo os principais são os compostos fenólicos, ácidos orgânicos e alcaloides. Os compostos fenólicos foram descritos como maior grupo de micronutrientes funcionais, os mais importantes relatados são as antraquinonas (damnacanthal, morindona, morindina) a rutina, asperulosido e escopoletina (CHAN-BLANCO et al., 2006; WANG; SU, 2001).

Existem aproximadamente 51 compostos voláteis verificados no fruto maduro incluindo ácidos orgânicos (ácido hexanoico, octanoico e ácido asperulosídico), álcoois (3-metil-3-buteno-1-ol), ésteres (metil octanoato e metil decanoato), cetonas (2-heptanona) e lactonas (E-6-dodeceno-γ-lactona) (CHAN-BLANCO et al., 2006). As análises de aromas mostram que os ácidos orgânicos, especialmente o ácido hexanoico e octanoico constituem 70% de todos os compostos voláteis identificados e estes são responsáveis pelo odor característico do noni (CHAN-BLANCO et al., 2007).

2.2 – Umbu (*Spondias tuberosa* Arruda Câmara)

O umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda Câmara) é uma planta xerófila pertencente à família Anacardiaceae que é formada por cerca de 80 gêneros e 600 espécies nativas da caatinga, de ocorrência na região semiárida brasileira, com predominância no Nordeste. Apresenta fruto tipo drupa, medindo de 10 a 14 cm de comprimento, glabra ou levemente pilosa, de coloração amarelo-esverdeado e, quando maduro, podendo pesar entre 5 e 80 g, com epicarpo (casca) muito pouco espesso, mesocarpo (polpa) variando de fina a grossa, de sabor ácido. O endocarpo constitui o caroço, de tamanho variável, sendo bastante duro e resistente, é constituído de uma camada mais externa que se apresenta densa e fibrosa, e de

outra camada intermediária, de constituição frouxo-fibrosa, cuja função, aparentemente, é a de absorção de água, enquanto que a mais interna, que fica em contato com a semente, apresenta consistência igual à mais externa (MENDES, 1990; LIMA, 2010).



(a)



(b)

Figura 2.2 – Frutos do umbuzeiro (*Spondias tuberosa* A.)

(Fonte: <http://www.cerratinga.org.br>)

O umbu é colhido de árvores que crescem espontaneamente e seu extrativismo é praticado principalmente nos Estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Sergipe, Alagoas, Bahia, na parte semiárida de Minas Gerais e em partes do Maranhão (CAVALCANTI et al., 2001).

2.2.1 – Polpa de umbu e seus constituintes

O fruto do umbuzeiro apresenta na sua composição química 14,5 mg de ácido ascórbico por 100 mL de suco, além de minerais como potássio, cálcio, magnésio e fibras solúveis e insolúveis (LIMA, 1996). A composição físico-química da polpa e do fruto de umbu “*in natura*” foi estudada por diversos autores conforme Tabelas 2.1 e 2.2.

Tabela 2.1 – Composição físico-química da polpa de umbu

Parâmetros	Bastos et al. (2016)	Silva et al. (2015)	Marinho et al. (2012)
pH	2,42	2,35	2,21
Acidez total titulável (%)	1,88	1,81	1,82
Teor de água (%)	-	89,04	91,08
Cinzas (%)	0,37	0,37	0,37
Atividade de água (a_w) a 25 °C	-	-	0,99
Sólidos solúveis totais (°Brix)	8,50	9,00	8,68
Ácido ascórbico (mg/100 g)	5,47	4,96	9,10
Açúcares redutores (%)	4,96	4,92	-
Açúcares não redutores (%)	3,56	5,58	-
Açúcares totais (%)	8,52	10,51	-

Tabela 2.2 – Composição em 100 g do fruto do umbu in natura

Componentes	Valor
Teor de água (%)	90,20
Energia (kcal)	34,00
Proteínas (g)	0,50
Carboidratos (g)	8,80
Fibras (g)	1,30
Cinzas (g)	0,40
Cálcio (mg)	11,00

Fonte: TACO (2011).

Com relação ao teor de minerais, o umbu é considerado um fruto muito rico em fósforo, chegando a atingir 32,7 mg/100 g deste mineral nos frutos verdes. A raiz tuberosa do umbuzeiro, conhecida como xilopódio, contém proteínas, fibra bruta, extrato etéreo, taninos, amido, enxofre, fósforo, cálcio e magnésio (NARAIN et al. 1992; OLIVEIRA, 2006).

2.3 – Propriedades termofísicas

É relevante ressaltar que quanto maior o crescimento populacional, maior será a demanda por alimentos, dessa forma, exige-se que a indústria alimentícia acompanhe esse crescimento investindo na modernização e adequação tecnológica da produção dos alimentos, buscando maior produtividade e melhor qualidade. Para isso, se faz necessário o investimento em pesquisas científicas voltadas ao processamento de alimentos que envolvem transferência de calor, o que passa pelo conhecimento das propriedades termofísicas para os cálculos dos processos. Há um grande déficit de conhecimento de tais propriedades para a maioria dos produtos, uma vez que os inúmeros dados encontrados na literatura não abrangem referência às frutas tropicais e, para produtos brasileiros, nem mesmo são encontrados.

Informações sobre as propriedades termofísicas, tais como densidade ou massa específica, tensão superficial, viscosidade, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica, são de fundamental importância para o desenho e dimensionamento de equipamentos e a otimização dos processos térmicos utilizados no processamento de alimentos, como secadores que envolvem aquecimento e resfriamento, bombeamento, aspersão e pulverização de materiais.

Falhas em equipamentos ou no projeto de processos podem ser atribuídas à falta dessas informações quando da seleção de valores de propriedades termofísicas usadas na análise inicial dos sistemas em estudo. A necessidade de se conhecer as propriedades térmicas com precisão tem levado ao estudo da influência da composição e da temperatura nestas propriedades (MOURA et al., 2003; INCROPERA e DEWITT, 2003). As variações na sua composição e na sua estrutura são os principais fatores na avaliação das propriedades dos alimentos, os quais são geralmente substâncias não homogêneas e cujas propriedades químicas, físicas e, conseqüentemente, térmicas variam fortemente com as condições de processo. Tudo isso pode levar a um processamento inadequado do produto, gerando prejuízos que poderiam ser facilmente evitados.

Dessa maneira, para as matérias-primas destinadas à industrialização, que estão sujeitas aos processos de aquecimento e resfriamento, como por exemplo, polpa de frutas, é interessante que se determinem suas propriedades termofísicas (ARAÚJO et al., 2004).

Muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos a fim de se estabelecer influência da temperatura e concentração nas propriedades termofísicas. Choi e Okos (1983) estudaram as propriedades térmicas de suco de tomate numa faixa ampla de temperatura (20 a 150

°C) e concentração (4,8 a 80% de sólidos totais). Estes pesquisadores relataram que, para o suco de tomate, as propriedades termofísicas condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico diminuíram com o decréscimo da temperatura e conteúdo de água, enquanto a densidade comportou-se de maneira inversa, diminuindo com o aumento da temperatura e do conteúdo de água.

Constenla et al. (1989) desenvolveram um trabalho com suco clarificado de maçã apresentando resultados experimentais de determinações de densidade, viscosidade, calor específico e condutividade térmica, numa faixa de concentração de 12 a 70 °Brix e variação de temperatura de 20 a 90 °C mostrando a influência da concentração e temperatura nessas propriedades.

Diante disso, são necessárias tanto a obtenção de dados precisos de propriedades como a condutividade térmica, a difusividade térmica e o calor específico, quanto a predição do comportamento dessas propriedades durante o processo, onde ocorrem variações de temperatura e composição (BRYAN et al., 1999).

2.3.1 – Massa específica

A massa específica de uma substância é definida como a massa por unidade de volume e expressa em kg/m^3 no Sistema Internacional de Unidade (MUNSON et al., 1997). Dados sobre essa propriedade são necessários para projetar e avaliar equipamentos de processamento de alimentos como evaporadores, bombas, filtros e misturadores, e servem ainda como índice de qualidade do produto final (ALVARADO e ROMERO, 1989).

Souza et al. (2010), ao estudarem as propriedades termofísicas de polpa de umbu, relataram que as amostras apresentaram massa específica de 1100 kg/m^3 para o teor de água de 75% e 1020 kg/m^3 para o teor de água de 95%, nas temperaturas de 10 a 80 °C. Os autores constataram que a massa específica diminuiu com o aumento da temperatura e também com o aumento do teor de água.

Pereira et al. (2002) avaliaram a massa específica de polpa de açaí em três concentrações de sólidos totais (9,7, 12 e 15,2%) e diferentes temperaturas (10 a 50 °C). No referido trabalho os autores observaram um decréscimo da massa específica com o aumento do teor de água e da temperatura da polpa e propuseram um modelo linear para representar a influência dessas variáveis.

2.3.2 – Calor específico

Calor específico é a medida da energia necessária para mudar a temperatura de um alimento em um grau, em uma unidade de massa, sem mudança de estado. Portanto, o calor específico de alimentos ou bebidas pode ser utilizado para calcular a carga térmica imposta aos equipamentos de refrigeração por resfriamento ou congelamento (ASHRAE, 2002). Para se determinar o calor específico o método do calorímetro de mistura é simples e bastante utilizado por diversos pesquisadores como Vieira (1996), que utilizou para o suco de laranja; Jha e Prasad (1993), em nozes; Hense (1990), para filé de cação, e Sharma e Thompson (1973), para grãos de sorgo.

O calor específico de alimentos vem sendo determinado por pesquisadores como: Simões (1997), que determinou o calor específico da polpa de manga e encontrou valores iguais a 2,25kJ/kg °C para a polpa concentrada, 2,36 kJ/kg °C para a polpa integral e 2,49 kJ/kg °C para polpa peneirada; Alvarado e Romero (1989), que obtiveram para o suco de melancia, com teor de água de 92,6% à temperatura de 18 °C, um calor específico de 1,97 kJ/kg °C; e Lima et al. (2003), que determinaram as propriedades termofísicas de polpa de umbu com diferentes teores de sólidos e constataram que o calor específico diminuiu com o aumento do teor de sólidos solúveis totais, variando de 3,2 a 3,7 kJ/kg °C.

2.3.3 – Difusividade térmica

A difusividade térmica de um meio ou produto, representada por α (com unidade no SI, m²/s), indica o quão rápido o calor se propaga através de uma amostra durante o aquecimento ou resfriamento (RAHMAN, 2009), ou seja, é a razão entre a habilidade em transferir calor e a capacidade em armazená-lo.

Segundo Jaramillo-Flores e Hernandez-Sanchez (2000), a difusividade térmica de um alimento depende da sua composição (incluindo conteúdo de água), estrutura e temperatura. Nos processos de pasteurização ou esterilização, bem como no processo de congelamento, onde não é esperada uma mudança na composição, ocorre uma mudança na temperatura e, por vezes, uma alteração na estrutura e no valor da difusividade térmica.

A difusividade térmica vem sendo determinada por vários autores através do método proposto por Dickerson (1965), entre estes Lima et al. (2003), ao trabalharem com propriedades termofísicas da polpa de umbu, constataram que a difusividade térmica diminuiu com o aumento da concentração, verificando que, para as concentrações de 10,

20 e 30 °Brix, os valores obtidos foram, respectivamente, de $1,52 \times 10^{-7}$, $1,45 \times 10^{-7}$ e $1,35 \times 10^{-7}$ m²/s.

Mercali et al. (2011), ao analisarem as propriedades termofísicas de polpa de acerola e mirtilo, ambas com 14,24 °Brix, obtiveram, respectivamente, $1,52 \times 10^{-7}$ e $1,51 \times 10^{-7}$ m²/s de difusividade térmica, sendo esses valores aproximados e geralmente encontrados em polpas com elevado teor de água.

2.3.4 – Condutividade térmica

É uma propriedade do material que descreve a taxa com que o fluxo de calor escoou sobre a influência de um gradiente de temperatura e que é descrito pela equação de Fourier da condução de calor (INCROPERA et al., 2008).

A importância da condutividade térmica, quando se tem o processamento térmico de um alimento, está vinculada ao fato de que, durante um tratamento de aquecimento ou resfriamento, podem ocorrer mudanças na estrutura e nas propriedades físicas e químicas do produto, o que pode gerar grandes mudanças nesta propriedade (SWEAT, 1986). Assim, a condutividade térmica de alimentos depende tanto da sua composição como de qualquer fator que afete o fluxo de calor através do material, como a densidade, o arranjo dos poros, a fração de gelo (PARK et al., 1999), a temperatura e o teor de água (MOHSENIN, 1980).

Shamsudin et al. (2005) avaliaram o efeito da temperatura nas propriedades termofísicas de suco de goiaba, constatando que a condutividade térmica não foi influenciada com variação da temperatura.

2.4 – Secagem

Secagem é uma técnica antiga de conservação de alimentos que consiste em remoção de água, ou qualquer outro líquido do alimento, na forma de vapor para o ar não saturado. Esta técnica vem sendo constantemente estudada e aperfeiçoada para obtenção de produtos com menor atividade de água e maior qualidade. O teor de água dos produtos alimentícios é reduzido até atingir níveis seguros e, com isso, inibe-se o crescimento de micro-organismos, reduz-se a possibilidade de proliferação de insetos e pragas, evitando a perda da qualidade. A massa e o volume dos alimentos também são alterados, podendo facilitar o processo de embalagem, transporte e armazenamento destes produtos.

A conservação de frutas através da desidratação ou secagem é um dos processos comerciais mais usados na conservação de produtos agropecuários sem que eles percam suas propriedades biológicas e nutritivas. A redução do teor de água do produto e, conseqüentemente, de sua atividade de água, tem por objetivo evitar o desenvolvimento de microrganismos e de reações químicas indesejáveis que podem deteriorar o produto tornando-o impróprio para o consumo (MADAMBA et al., 2007). De acordo com Garcia et al. (2004), a operação de secagem é fundamental no sistema de produção porque, além de reduzir a umidade, para permitir a conservação de sua qualidade fisiológica no armazenamento, possibilita a antecipação da colheita evitando perdas de natureza diversas.

Dessa forma, o processo de secagem deve ocorrer de forma controlada, para que possa acontecer de maneira uniforme, evitando elevados gradientes de umidade e temperatura no interior do material, passíveis de provocar a perda da qualidade do produto. Sabendo-se que os efeitos da secagem alteram as propriedades físicas e químicas do produto e que, por sua vez, afetam o processo de transferência de calor e massa, é fundamental se conhecer seus efeitos e o controle (FARIAS et al., 2002).

Uma das principais motivações para a realização de trabalhos sobre secagem de alimentos é obter informações técnicas sobre o produto que possam ser utilizadas na otimização do processo de secagem, de forma a garantir a qualidade que satisfaça às exigências da legislação e dos consumidores.

De acordo com Park et al. (2001), as vantagens de se utilizar o processo de secagem são várias, dentre as quais se tem: a facilidade na conservação do produto; estabilidade dos componentes aromáticos à temperatura ambiente por longos períodos de tempo; proteção contra degradação enzimática e oxidativa; redução do peso; economia de energia por não necessitar de refrigeração e a disponibilidade do produto durante qualquer época do ano.

As condições de operação nos experimentos de secagem variam muito entre os trabalhos publicados, pois dependem, principalmente, das características de termorresistência do produto. Diógenes et al. (2013), por exemplo, secaram grãos de abóbora em secador com circulação forçada de ar, nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C, e velocidade do ar de secagem de aproximadamente 1 m/s. Os tempos necessários para reduzir o teor de água médio do produto de 24,79% b.u. para 2,80% b.u. foram de 1260, 1230, 1110, 960 e 725 min, respectivamente, nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C. A explicação dada pelos autores é que quanto maior a temperatura do ar, maior a taxa de evaporação de água, ou seja, mais rápida é a secagem do produto.

Os métodos de secagem são classificados quanto ao uso de equipamentos (natural ou artificial), à periodicidade no fornecimento de calor (contínuo ou intermitente) e à movimentação da massa de sementes (estacionário ou contínuo) (GARCIA et al., 2004).

A secagem artificial utiliza equipamentos em que o alimento é colocado e o processo de desidratação ocorre por um dado período de tempo sendo esse processo classificado como batelada. No entanto, alimentos úmidos podem ser continuamente colocados no equipamento e alimentos secos continuamente removidos, sendo classificado como processo contínuo. Na maioria dos processos de secagem artificial, ar quente com uma velocidade de 0,5 a 3,0 m/s e baixa umidade é utilizado para a transferência de calor por convecção para o alimento, porém, os mecanismos de transferências de calor por condução e radiação também ocorrem.

Um decréscimo da umidade relativa do ar provoca uma secagem mais eficiente do que com o incremento da temperatura para uma mesma umidade relativa do ar. Na prática, aumentar a temperatura de secagem é mais usual, por ter maior facilidade, já que os secadores comerciais são providos de termostato e a retirada de umidade do ar é um procedimento mais trabalhoso por exigir filtros especiais (desumidificadores de ar).

O tipo de secador mais simples e utilizado na secagem artificial é o secador de bandejas. Em um secador de bandeja (Figura 2.3) o alimento sólido é espalhado uniformemente sobre uma bandeja com fundo tipo tela (de metal ou plástico) a uma espessura de 10 a 100 mm. A circulação de ar no secador é feita por um ventilador situado atrás de resistências elétricas usadas para o aquecimento do ar de entrada. O controle da temperatura é por meio de um termostato. Após a secagem, o secador é aberto e as bandejas descarregadas. Durante a secagem, são feitas pesagens de uma pequena bandeja com uma amostra do produto para verificar o fim do processo.

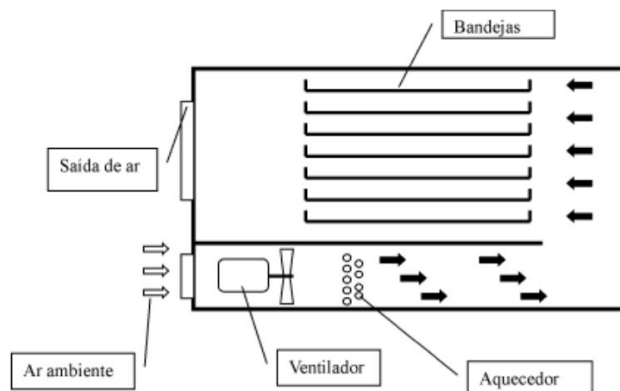


Figura 2.3 - Esquema do secador com circulação de ar sobre as bandejas

2.4.1 – Cinética de secagem

A análise da cinética de secagem fornece informações sobre o comportamento da transferência de calor e massa entre o produto e o agente de secagem, normalmente o ar atmosférico, o qual é de importância fundamental para a modelagem matemática e o projeto de secadores (GUEDES et al., 2000). É através deste estudo que se estabelecem as equações do teor de água em função do tempo de secagem para os diferentes períodos de secagem (PRADO, 2004).

A taxa de secagem pode ser acelerada com o aumento do ar de secagem e/ou com o aumento do fluxo de ar que passa pelo produto por unidade de tempo. A quantidade de ar utilizada para a secagem depende de vários fatores, entre eles: o teor de água inicial do produto e a espessura da camada (GOUVEIA et al., 2003).

O método de cálculo da cinética de secagem é aplicado de modo diferente, dependendo do período de secagem considerado, cujo período de taxa decrescente de secagem é quase sempre o único observado para a secagem de produtos agrícolas e alimentícios, sendo que as transferências internas é que são as limitantes (PARK et al., 2004).

O teor de água de equilíbrio é atingido quando o alimento é deixado por um tempo suficientemente longo em determinada condição de temperatura e umidade relativa do ar que o envolve. Nessa condição, a pressão parcial de vapor da água na superfície do produto é igual à pressão parcial de vapor de água contida no ar (CELESTINO, 1998).

Ao analisar a cinética de secagem de frutas, vários autores consideram que a temperatura do ar de secagem apresenta maior influência na taxa de secagem (SILVA et al., 2016; VARGAS et al., 2016; SILVA et al., 2015; PEREZ et al., 2013).

2.4.2 – Modelos matemáticos

O controle do processo de secagem em camada fina é baseado na curva de secagem do produto obtida pela pesagem da amostra periodicamente (MONTE et al., 2006). Para a modelagem dessas curvas de equilíbrio higroscópico, têm sido utilizadas relações matemáticas semiteóricas (Page, Henderson e Pabis, Logarítmico, Exponencial Dois-termos), uma vez que nenhum modelo teórico desenvolvido tem sido capaz de prever com precisão o teor de água de equilíbrio em todas as faixas de temperaturas e umidade

relativa do ar, apesar de sua validade estar restrita às condições sob os quais os dados experimentais foram obtidos (BROOKER et al., 1992; McMINN, 2006).

Estes modelos se baseiam, geralmente, em variáveis externas em relação ao produto, como a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem, não fornecendo, entretanto, indicações sobre os fenômenos de transporte de energia e de água no interior do produto considerando-se ainda, que todo o processo de secagem ocorre apenas no período de taxa decrescente (CORRÊA et al., 2006).

Os experimentos de secagem de alimento, muitas vezes, são realizados com amostras de diferentes lotes ou de um processo contínuo, as quais necessariamente não apresentam o mesmo teor de água inicial ao longo de todo o experimento. A necessidade de utilizar uma variável que seja capaz de indicar a variação de teor de água do produto, independente de teor de água inicial do mesmo, é interessante para esse tipo de situação. Assim, foi definida a razão do teor de água adimensional (Equação 2.1).

$$RX = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (2.1)$$

em que:

RX – razão do teor de água do produto (adimensional)

X – teor de água do produto

X_0 – teor de água inicial do produto

X_{eq} – teor de água de equilíbrio

O numerador da razão (Equação 2.1) representa a quantidade de água livre a retirar num tempo t , enquanto o denominador refere-se à quantidade total de água que pode ser removida no processo naquelas condições de operação. Os modelos de secagem utilizam o conceito de razão do teor de água adimensional em função do tempo total de secagem.

Diversos autores utilizaram modelos exponenciais (simples, com dois, três ou quatro termos) para ajustá-los aos seus dados experimentais de produtos agrícolas secos (DIÓGENES et al., 2013; RESENDE et al., 2010; SANTOS et al., 2013; SOUSA et al., 2015). Na Equação 2.2 tem-se o modelo de Exponencial Dois Termos.

$$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \cdot \exp(-k \cdot a \cdot t) \quad (2.2)$$

em que:

RX – razão do teor de água do produto (adimensional)

a, k – constantes do modelo

t – tempo (min)

Vários pesquisadores aplicaram o modelo de Henderson e Pabis (1961) (Equação 2.3) na estimativa da secagem de diversos produtos agrícolas (SILVA et al., 2017; LEITE et al., 2017; SANTOS et al., 2015; MORAIS et al., 2013).

$$RX = a. \exp(-k. t) \quad (2.3)$$

em que:

RX – razão do teor de água do produto (adimensional)

a, k – constantes do modelo

t – tempo (min)

Outro modelo semiempírico bastante utilizado na secagem de produtos agrícolas é o modelo Logarítmico (Equação 2.4).

$$RX = a. \exp(-k. t) + c \quad (2.4)$$

em que:

RX – razão do teor de água do produto (adimensional)

a, k, c – constantes do modelo

t – tempo (min)

Zuniga et al. (2015) constataram que dentre os modelos utilizados para estimar as curvas de secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C da amêndoa do baru (*Dipteryx alata*), o modelo Logarítmico foi o que apresentou os maiores coeficientes de determinação.

Araújo et al. (2015) determinaram a cinética de secagem das sementes de pitaia vermelha nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C com velocidade do ar de secagem de 1 m/s e ajustaram o modelo de Logarítmico aos dados experimentais encontrando coeficientes de determinação superiores a 0,99%.

Em algumas situações a teoria difusional não é adequada para ajustar o comportamento da taxa de secagem em virtude de interferência no efeito de resistência interna do material. Para essas situações pode-se aplicar alguns modelos empíricos, como o modelo de Page (PAGE, 1949), mostrado na Equação 2.5.

$$RX = \exp(-k \cdot t^n) \quad (2.5)$$

em que:

RX – razão do teor de água do produto (adimensional)

k – constante de velocidade de secagem (min^{-1})

n – constante do modelo (adimensional)

t – tempo (min)

Araújo et al. (2017) ao ajustarem diferentes modelos de secagem às curvas de secagem de amendoim em camada delgada nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, constataram que o modelo de Page foi o que ajustou melhor.

Outro modelo semiempírico bastante utilizado na secagem de produtos agrícolas é o de Newton (Equação 2.6).

$$RX = \exp(-k \cdot t) \quad (2.6)$$

em que:

RX – razão do teor de água do produto (adimensional)

k – constante do modelo

t – tempo (min)

2.5 – Isotermas de adsorção de água

O comportamento higroscópico, estabelecido mediante o conhecimento e entendimento das isotermas de adsorção de água para os alimentos é de fundamental importância para a ciência e tecnologia de alimentos, fornecendo informações para o desenvolvimento e otimização de processos, como nos projetos e estudos de sistemas de secagem, manuseio, processamento, armazenamento, embalagem e previsão da vida útil (JAMALI et al., 2006).

A determinação das isotermas de sorção de água expressa as variações da atividade de água do material acompanhando as condições de umidade relativa do ambiente, podendo levar ao desenvolvimento de microrganismos ou à deterioração química.

No equilíbrio higroscópico o material encontra-se no teor de água de equilíbrio, que é definido como o teor de água do material quando as pressões de vapor de água em sua superfície e no meio circundante são iguais, expressando uma equivalência entre a

umidade relativa do ar e a atividade de água do material e servindo de parâmetro para se estabelecer a susceptibilidade à deterioração (HELDMAN, 1975).

Para prever o comportamento das isotermas de sorção de água alguns modelos matemáticos (Tabela 2.3) podem ser ajustados aos dados experimentais, mediante análise estatística por regressão não linear.

Tabela 2.3 - Modelos matemáticos de isotermas de sorção de água

Modelo	Equação
GAB	$X_e = \frac{X_m - CKa_w}{(1 - Ka_w)(1 - Ka_w + CKa_w)}$
Oswin	$X_e = a \left(\frac{aw}{(1 - aw)} \right)^b$
Halsey	$X_e = \left(\frac{-k}{\ln aw} \right)^{\frac{1}{n}}$
Smith	$X_e = a - b[\ln(1 - a_w)]$

em que: X_e – teor de água de equilíbrio; a_w – atividade de água; X_m - teor de água de na monocamada molecular; C e K - parâmetros que dependem da natureza do produto; a e b - constantes dos modelos.

2.5.1 – Calor isostérico

O calor isostérico é essencial nos estudos de secagem e armazenamento de produtos agrícolas, serve para estimar as necessidades energéticas do processo de secagem fornecendo dados sobre o estado da água no produto. É um bom parâmetro para se estimar a quantidade mínima de calor requerida para remover uma quantidade de água e permite algumas deduções sobre a microestrutura e as mudanças físicas que acontecem na superfície dos alimentos (LIMA et al., 2008).

Por meio do calor isostérico é possível se ter uma ideia sobre a demanda energética nos processos de desidratação e secagem de materiais biológicos. De acordo com Aviara e Ajibola (2002) o calor isostérico é uma propriedade termodinâmica de sorção de água crucial na análise do fenômeno de transferência de calor e de massa, pois determina o ponto final de secagem e a quantidade mínima de energia requerida para a secagem do alimento.

Um método largamente usado para se calcular o calor isostérico de sorção, seja pelo processo de adsorção ou pelo de dessorção, é dado pela equação de Clausius-Clapeyron (IGLESIAS e CHIRIFE, 1976):

$$\left[d \ln \left(\frac{a_w}{dT} \right) \right] = \frac{q_{st}}{R T^2} \quad (2.7)$$

em que:

a_w - atividade de água (decimal)

q_{st} - calor isostérico líquido de sorção (kJ kg^{-1})

R - constante universal dos gases ($0,462 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

T - temperatura absoluta (K)

Integrando a Equação 2.7 e assumindo que o calor isostérico líquido de sorção (q_{st}) é independente da temperatura, pode-se encontrar o calor isostérico líquido de sorção, para cada teor de água de equilíbrio, conforme a Equação 2.8 (WANG e BRENNAN, 1991).

$$\ln(a_w) = - \left(\frac{q_{st}}{R} \right) \cdot \frac{1}{T} + C \quad (2.8)$$

em que:

a_w - atividade de água (decimal)

q_{st} - calor isostérico líquido de sorção (kJ kg^{-1})

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

T - temperatura absoluta (K)

C - constante do modelo (adimensional)

Para a equação de Clausius-Clapeyron, o calor isostérico líquido de sorção (q_{st}) foi determinado a partir das inclinações das retas do gráfico $\ln(a_w) \times (1/T)$ para os diversos teores de água de equilíbrio (Equação 2.9).

$$q_{st} = \text{coeficiente angular} \times R \quad (2.9)$$

em que:

R - constante universal dos gases ($8,314 \text{ kJ kmol K}^{-1}$), sendo para o vapor d'água $0,4619 \text{ (kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1})$

O calor isostérico integral de sorção (Q_{st}), em kJ kg^{-1} é obtido adicionando-se aos valores de calor isostérico líquido de sorção (q_{st}) o valor da entalpia de vaporização da água pura (H_L), na temperatura média aritmética de acordo com a Equação 2.10.

$$Q_{st} = q_{st} + H_L \quad (2.10)$$

em que:

Q_{st} - calor isostérico integral de sorção (kJ kg^{-1})

q_{st} - calor isostérico líquido de sorção (kJ kg^{-1})

H_L – entalpia de vaporização da água pura (kJ kg^{-1})

A entalpia de vaporização da água, para uma temperatura T , foi determinada utilizando a Equação 2.11:

$$H_L = 2502,2 - 2,39.T \quad (2.11)$$

em que:

H_L - entalpia de vaporização da água (kJ kg^{-1})

T - temperatura média ($^{\circ}\text{C}$)

3 – MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (LAPPA) da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola (UAEA), do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais (CTRN) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), *Campus* Campina Grande, PB.

3.1 – Matérias-primas

Os nonis (*Morinda citrifolia* L.) e os umbus (*Spondias tuberosa* Arruda Câmara), maduros, foram adquiridos no comércio no município de Campina Grande – Paraíba, colhidos no período da safra de janeiro/fevereiro 2017.

3.2 – Processamento dos frutos

As polpas de noni e umbu foram processadas seguindo as etapas do fluxograma da Figura 3.1.

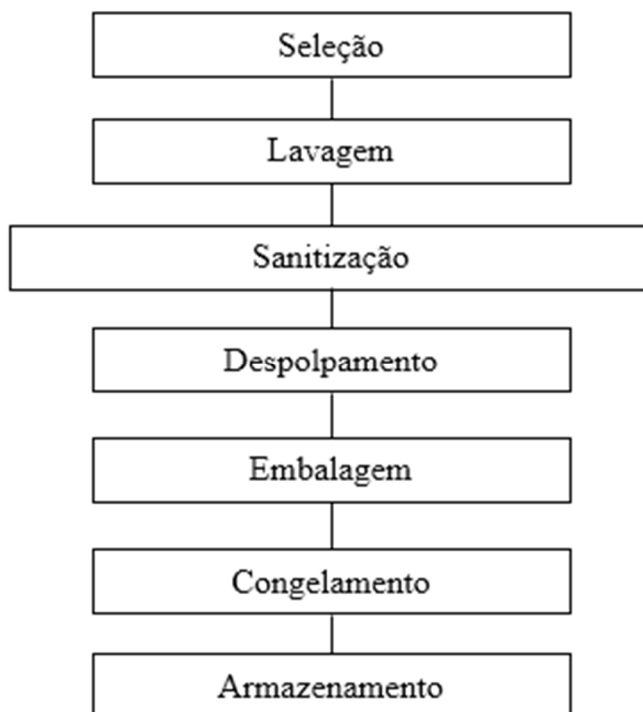


Figura 3.1 – Fluxograma do processamento para obtenção das polpas de noni e umbu

Os frutos adquiridos foram selecionados quanto ao estágio de maturação selecionando-se os frutos maduros e com ausência de danos físicos. Em seguida os frutos foram lavados em água corrente, sanitizados em solução de hipoclorito de sódio a 100 ppm, enxaguados em água corrente e despulpados separadamente em despulpadeira de aço inoxidável. As polpas integrais obtidas foram fracionadas, embaladas em sacos plásticos de polietileno de baixa densidade, lacradas, identificadas, congeladas e armazenadas em freezer a -20 °C até o momento da utilização nos experimentos.

3.3 – Análises químicas, físicas e físico-químicas das polpas integrais

Inicialmente, foram realizadas análises químicas e físico-químicas, em triplicata, nas polpas integrais de noni e umbu.

As seguintes análises foram determinadas de acordo com as normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz (2008): teor de água determinado em estufa a vácuo a 70 °C até massa constante; os sólidos solúveis totais (SST) em refratômetro portátil do tipo Abbe; acidez total titulável pelo método titulométrico, titulando-se a amostra com solução de hidróxido de sódio 0,1 M, usando-se fenolftaleína como indicador; pH por leitura direta em pHmetro da marca Tecnal, modelo TEC-2, calibrado com soluções tampão de pH 4,0 e 7,0; cinzas por incineração em mufla a 550 °C; proteínas pelo método de Kjeldahl com digestão da amostra em H₂SO₄, liberação da amônia por adição de NaOH e titulação da amônia com HCl.

Foi também determinada a atividade de água a 25 °C por leitura direta no higrômetro Aqualab 3TE (Decagon Devices); os parâmetros de cor em espectrofotômetro da marca Hunter Lab, Mini Scan XE Plus, modelo 4500L, que faz leituras de luminosidade (L*), intensidade de vermelho (+a*), verde (-a*), amarelo (+b*) e azul (-b*); os açúcares redutores e não redutores pelo método de Lane e Eynon (1923), que é baseado na redução de cobre pelos grupos redutores dos açúcares utilizando-se o reagente de Fehling, com os resultados expressos em % glicose e % sacarose, respectivamente; os lipídios pelo método de Bligh e Dyer (1959), onde utilizou-se para extração solventes orgânicos (clorofórmico e metanol), os quais foram quantificados através da pesagem do resíduo após a eliminação do solvente em estufa a 105 °C. O ácido ascórbico (mg/100 g) foi determinado por titulometria, utilizando-se a solução de 2,6 diclofenolindofenol-sódio (DCFI) até obtenção de coloração róseo claro persistente e como solução extratora o ácido oxálico (AOAC, 1997 modificada por BENASSI e ANTUNES, 1998).

3.4 – Elaboração das polpas combinadas

Foram elaboradas polpas combinadas (formulações) a partir da mistura das polpas integrais de noni e umbu em diferentes proporções: C₁ - 25% de polpa de noni com 75% de polpa de umbu; C₂ - 50% de polpa de noni com 50% de polpa de umbu; e C₃ - 75% de polpa de noni com 25% de polpa de umbu.

3.5 – Propriedades termofísicas

As polpas integrais de umbu e noni e as polpas combinadas (C₁, C₂ e C₃) foram submetidas às determinações de massa específica, calor específico, difusividade térmica e condutividade térmica.

3.5.1 – Massa específica

A massa específica das polpas foi determinada, em triplicata, utilizando-se o método picnométrico nas temperaturas de 5, 35 e 65 °C. O picnômetro foi previamente calibrado com água destilada nas temperaturas utilizadas nas determinações de massa específica. A massa específica foi calculada pela relação entre a massa e o volume.

Para predição da massa específica teórica de produtos alimentícios existem algumas equações que são encontradas em diversos trabalhos, estando as mesmas apresentadas na Tabela 3.1, sendo as utilizadas neste trabalho.

Tabela 3.1 – Equações para calcular a massa específica de produtos alimentícios

Produto	Equação	Fonte
Polpa e suco de frutas	$\rho = 1002 + 4,61B - 0,460T + 7,001 \times 10^{-3}T^2 - 9,175 \times 10^{-5}T^3$	Alvarado e Romero (1989)
Suco de pêssego	$\rho = 1006,56 - 0,5155T + 4,1951B + 0,0135 \times 10^{-3}B^2$	Ramos e Ibarz (1998)

em que: ρ - massa específica (kg/m³); B – concentração (°Brix); T – temperatura (°C)

Foi determinado o erro percentual (Equação 3.1) que foi utilizado para avaliar o ajuste das equações teóricas aos dados experimentais de massa específica.

$$E = \left(\frac{V_{\text{Cal}} - V_{\text{exp}}}{V_{\text{exp}}} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

em que:

E - erro percentual (%)

V_{exp} - valor experimental

V_{cal} - valor calculado

3.5.2 – Calor específico

As determinações do calor específico foram feitas por meio do método de mistura em calorímetro (MOHSENIN, 1980). O calorímetro de mistura utilizado era construído com uma ampola de garrafa térmica comercial, inserida em um tubo de PVC de 200 mm de diâmetro. O espaço entre a ampola e o cilindro de PVC era preenchido com lã de vidro, para garantir o máximo de isolamento térmico. O fechamento da ampola foi feito com rolha de borracha com um furo no centro, por onde passa a haste do termopar para aferição da temperatura interna.

Inicialmente, foi determinada a capacidade calorífica do calorímetro (C_{cal}) e, para tal colocou-se no calorímetro uma massa de água (m₁) à temperatura ambiente (T₁), depois adicionou-se uma massa de água (m₂) na temperatura de refrigeração (T₂), agitou-se a mistura e anotou-se a temperatura de equilíbrio (T₃).

Após a determinação da capacidade calorífica do calorímetro foram determinados os calores específicos das polpas integrais e combinadas nas temperaturas de 5, 35 e 65 °C. Para tal, adicionou-se ao calorímetro contendo uma massa de água (m₃) na temperatura (T₃) uma massa da polpa (m_p) a temperatura (T₄), agitou-se o calorímetro e mediu-se a temperatura de equilíbrio (T₅). Para um melhor controle da temperatura das amostras foi usado um banho ultratermostático modelo SL 152/10, da marca Solab. A capacidade calorífica foi calculada de acordo com a Equação (3.2) e o calor específico (C_p) pela Equação (3.3).

$$C_1 m_1 (T_1 - T_3) + C_{\text{cal}} (T_1 - T_3) = C_2 m_2 (T_3 - T_2) \quad (3.2)$$

em que:

C_{cal} - capacidade calorífica do calorímetro (kJ/°C)

C_1 - calor específico da água na temperatura T1 (kJ/°C)

C_2 - calor específico da água na temperatura T2 (kJ/°C)

m_1 - massa da água na temperatura ambiente (T1) (g)

m_2 - massa da água na temperatura refrigerada (T2) (g)

T1 - temperatura da água ambiente (°C)

T2 - temperatura da água refrigerada (°C)

T3 - temperatura da água de equilíbrio (°C)

$$C_p = \frac{C_{pH_2O} \cdot m_3 \cdot (T_5 - T_3) + C_{cal} \cdot (T_5 - T_4)}{m_p \cdot (T_5 - T_4)} \quad (3.3)$$

em que:

C_p - calor específico da polpa (kJ/kg °C)

C_{pH_2O} - calor específico da água (kJ/kg °C)

C_{cal} - capacidade calorífica do calorímetro (kJ/°C)

m_p - massa da polpa (kg)

m_3 - massa de água (kg)

T5 - temperatura de equilíbrio (°C)

T3 - temperatura da água (°C)

T4 - temperatura da polpa (°C)

As equações apresentadas na Tabela 3.2 foram propostas por diversos autores para determinação do calor específico teórico em alimentos, sendo as mesmas utilizadas neste trabalho.

Tabela 3.2 – Equações usadas para calcular o calor específico de produtos alimentícios

Equação	Fonte
$C_p = 1464,8 - 483,32X_w - 0,47T$	Giraldo-Gómez et al. (2010)
$C_p = 4,18 - (6,839 \times 10^{-5}T - 0,0503)S$	Manohar et al. (1991)

em que: C_p - calor específico (kJ/kg °C); X_w - teor de água (adimensional); T – temperatura (°C); S – sólidos totais (%)

Foi determinado o erro percentual (Equação 3.1) que foi utilizado para avaliar o ajuste das equações teóricas aos dados experimentais do calor específico.

3.5.3 – Difusividade térmica

A determinação da difusividade térmica foi baseada no método de Dickerson (1965), empregando-se para tal um cilindro metálico de latão cromado, isolado termicamente nas extremidades e com dois termopares acoplados, um para verificar a temperatura interna no centro do cilindro e o outro na sua superfície externa, de modo a registrar as variações da temperatura das amostras. O cilindro foi preenchido com a amostra e mergulhado em um banho termostático com circulação da água ajustado para aquecimento até a temperatura de 60 °C e as temperaturas no cilindro (interna e externa) foram registradas em intervalos regulares a cada 1 min.

Antes de calcular a difusividade térmica foi determinada a taxa de aquecimento da amostra, plotando-se os dados da temperatura interna (T_c) e externa (T_s) do cilindro, onde foi obtido o coeficiente angular da reta, que é a constante da velocidade de aquecimento (A) do banho. A diferença entre ($T_s - T_c$) foi obtida quando as curvas (T_s) e (T_c) se tornaram paralelas entre si, o que ocorre quando os dados satisfazem as condições da Equação 3.4.

$$|(T_s - T_c)_i - (T_s - T_c)_{i+1}| \leq 0,1^\circ\text{C} \quad (3.4)$$

em que:

T_s - temperatura na superfície do cilindro (°C)

T_c - temperatura interna no centro do cilindro (°C)

A difusividade térmica é então determinada utilizando-se a Equação 3.5 proposta por Dickerson (1965):

$$\alpha_A = \frac{A \cdot R^2}{4 \cdot (T_s - T_c)} \quad (3.5)$$

em que:

α_A - difusividade térmica da amostra (m^2/s)

A - taxa de aquecimento do banho (°C/s)

R - raio da célula (m)

$T_s - T_c$ - diferença entre a temperatura externa e a temperatura interna da célula (°C)

Existem várias equações na literatura utilizadas para o cálculo da difusividade térmica, das quais algumas se encontram algumas na Tabela 3.3, sendo as utilizadas neste trabalho.

Tabela 3.3 – Equações usadas para calcular a difusividade térmica de produtos alimentícios

Equação	Fonte
$\alpha = (0,057363X_w + 0,000288T) \times 10^{-6}$	Singh (1982)
$\alpha = 8,29 \times 10^{-8} + 5,27 \times 10^{-8} X_w + 2,76 \times 10^{-10} T$	Giraldo-Gómez et al. (2010)

em que: α – difusividade térmica (m²/s); X_w – fração mássica da água (adimensional); T – temperatura (°C)

Foi determinado o erro percentual (Equação 3.1) que foi utilizado para avaliar o ajuste das equações teóricas aos dados experimentais da difusividade térmica.

3.5.4 – Condutividade térmica

As condutividades térmicas das polpas foram determinadas por meio da relação entre a difusividade térmica (α), massa específica (ρ) e calor específico (C_p) calculadas conforme a Equação (3.6).

$$k = \alpha \cdot \rho \cdot C_p \quad (3.6)$$

Na Tabela 3.4 se encontram equações propostas por autores diversos para estimar a condutividade térmica de produtos alimentícios, as quais foram utilizadas neste trabalho.

Tabela 3.4 – Equações para calcular a condutividade térmica de produtos alimentícios

Produto	Equação	Fonte
Suco de maçã	$K = 0,27928 - 3,5722 \times 10^{-3} B + 1,1357 \times 10^{-3} T$	Constenla et al. (1989)
Suco de laranja	$K = 0,0797 + 0,538 X_w + 0,000580 T$	Telis-Romero et al. (1998)

em que: K - condutividade térmica (Wm.°C); B - concentração (°Brix); X_w - fração mássica da água (adimensional); T - temperatura (°C)

Foi determinado o erro percentual (Equação 3.1) que foi utilizado para avaliar o ajuste das equações teóricas aos dados experimentais da condutividade térmica.

3.6 – Secagem das polpas combinadas de noni com umbu

As polpas combinadas de noni com umbu (C₁, C₂ e C₃) foram secadas em bandejas de alumínio, em camada fina de 10 mm em um secador de bandejas nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C. Os experimentos de secagem foram feitos em triplicata com as amostras pesadas em intervalo de tempo regulares até atingir massa constante. Após atingir o equilíbrio, foram levadas para estufa a 105 °C durante 24 h para ser determinada a massa seca e, com os dados de perda de massa das amostras durante as secagens, foram calculados os teores de água.

Com os valores do teor de água foram calculadas as razões do teor de água utilizando-se a Equação (3.7).

$$RX = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (3.7)$$

em que:

X - teor de água do produto (b.s.)

X₀ - teor de água inicial (b.s.)

X_{eq} - teor de água de equilíbrio (b.s.)

Em seguida foram construídas as curvas de cinética de secagem (razão do teor de água em função do tempo de secagem) e os modelos matemáticos (Tabela 3.5) Exponencial de Dois Termos (Equação 3.8), Henderson e Pabis (Equação 3.9), Logarítmico (Equação 3.10), Page (Equação 3.11) e Newton (Equação 3.12) foram ajustados às curvas experimentais utilizando-se o programa computacional Statistica® 7.0 por meio de análise de regressão não linear, pelo método Quase-Newton.

A qualidade dos ajustes dos modelos aos dados experimentais foi avaliada por meio dos valores dos coeficientes de determinação (R²) e dos desvios quadráticos médios (DQM), de acordo com a Equação (3.13).

Tabela 3.5 - Modelos matemáticos ajustados às curvas de cinética de secagem das polpas combinadas de noni com umbu

Designação do modelo matemático	Equação	Referência	Equação n°
Exp. de Dois Termos	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-k \cdot a \cdot t)$	Sousa et al. (2015)	3.8
Henderson e Pabis	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	Silva et al. (2017)	3.9
Logarítmico	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$	Araújo et al. (2015)	3.10
Page	$RX = \exp(-k \cdot t^n)$	Araújo et al. (2017)	3.11
Newton	$RX = \exp(-k \cdot t)$	Mendonça et al. (2015)	3.12

em que: RX - razão do teor de água (adimensional); a, b, c, k, n - constantes dos modelos; t - tempo (min).

$$DQM = \sqrt{\frac{(RX_{pred} - RX_{exp})^2}{n}} \quad (3.13)$$

em que:

DQM - desvio quadrático médio

RX_{pred} - razão do teor de água predito pelo modelo

RX_{exp} - razão do teor de água experimental

n - número de observações

3.7 – Isotermas de adsorção de água

As isotermas de adsorção de água das polpas combinadas secas foram determinadas utilizando-se o higrômetro Aqualab, modelo 3TE, fabricado por Decagon Decives, nas temperaturas de 20, 30 e 40 °C, utilizando-se o método gravimétrico estático indireto de Crapiste e Rotstein (1982). Após o equilíbrio termodinâmico, as amostras foram levadas para a estufa para determinação da massa seca e, conseqüentemente, do teor de água de equilíbrio, determinado pela relação entre a massa de água e a massa seca da amostra (Equação 3.14).

$$X_e = \frac{m_e - m_s}{m_s} 100 \quad (3.14)$$

em que:

X_e - teor de água de equilíbrio (% base seca)

m_e - massa da amostra no equilíbrio (g)

m_s - massa seca da amostra (g)

Os modelos de GAB (Equação 3.15), Oswin (Equação 3.16), Halsey (Equação 3.17) e Smith (Equação 3.18) foram ajustados às isotermas de adsorção de água, utilizando-se o programa Statistica® 7.0, por meio de análise de regressão não linear, pelo método Quase-Newton.

$$X_e = \frac{X_m - CKa_w}{(1 - Ka_w)(1 - Ka_w + CKa_w)} \quad (3.15)$$

$$X_e = a \left(\frac{a_w}{(1 - a_w)} \right)^b \quad (3.16)$$

$$X_e = \left(\frac{-k}{\ln a_w} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.17)$$

$$X_e = a - b[\ln(1 - a_w)] \quad (3.18)$$

em que:

X_e - teor de água de equilíbrio

a_w - atividade de água

X_m - teor de água na monocamada molecular

C e K - parâmetros que dependem da natureza do produto

a e b - constantes dos modelos

Para avaliar a qualidade dos ajustes dos modelos aos dados experimentais, foi tomado como base o coeficiente de determinação (R^2) e o desvio percentual médio (P) (Equação 3.19).

$$P = \frac{100}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{X_{exp} - X_{teo}}{X_{exp}} \right| \quad (3.19)$$

em que:

P - desvio percentual médio (%)

X_{exp} - valores obtidos experimentalmente

X_{teo} - valores preditos pelo modelo

n - número de dados experimentais

3.7.1 – Calor isostérico

O calor isostérico de sorção foi calculado a partir das isotermas de adsorção de água das polpas combinadas secas. Inicialmente, calculou-se o calor isostérico líquido de sorção (q_{st}) e o calor isotérico integral de sorção (Q_{st}) para diferentes teores de água de equilíbrio, conforme equações 3.20 a 3.23, respectivamente.

$$\ln(a_w) = -\left(\frac{q_{st}}{R}\right) \cdot \frac{1}{T} + C \quad (3.20)$$

em que:

a_w - atividade de água (decimal)

q_{st} - calor isostérico líquido de sorção (kJ kg^{-1})

R - constante universal dos gases ($0,4619 \text{ kJ/kg K}$, vapor d'água)

T - temperatura absoluta (K)

C - constante do modelo (adimensional)

$$q_{st} = \text{coeficiente angular} \times R \quad (3.21)$$

em que:

R - constante universal dos gases ($0,4619 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, vapor d'água)

$$Q_{st} = q_{st} + H_L \quad (3.22)$$

em que:

Q_{st} - calor isostérico integral de sorção (kJ kg^{-1})

q_{st} - calor isostérico líquido de sorção (kJ kg^{-1})

H_L - entalpia de vaporização da água pura (kJ kg^{-1})

A entalpia de vaporização da água pura (H_L), para uma temperatura T , foi determinada utilizando a Equação 3.23:

$$H_L = 2502,2 - 2,39 \cdot T \quad (3.23)$$

em que:

H_L - entalpia de vaporização da água pura (kJ kg^{-1})

T - temperatura média (°C)

3.8 – Análise estatística

Para os parâmetros químicos, físicos e físico-químicos das polpas integrais de noni e umbu foram apresentados os valores médios e os seus respectivos desvios padrão.

Para a análise estatística dos dados das propriedades termofísicas, foi usado o delineamento inteiramente casualizado (DIC) em esquema fatorial 3 x 5, três temperaturas (5, 35 e 65 °C), cinco tipos de polpa (umbu, noni, C₁, C₂ e C₃) e três repetições, usando-se o programa computacional Assistat versão 7.6 (SILVA e AZEVEDO, 2016), com a comparação entre médias por meio do teste de Tukey.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Caracterização química, física e físico-química das polpas integrais de umbu e noni

Na Tabela 4.1 se encontram os resultados obtidos para os parâmetros químicos, físicos e físico-químicos da polpa de umbu integral.

Tabela 4.1 – Valores médios dos parâmetros químicos, físicos e físico-químicos da polpa de umbu integral

Parâmetros analisados	Média e desvio padrão
Teor de água (%)	87,67 ± 0,14
Acidez total titulável (% ácido cítrico)	1,32 ± 0,00
pH	2,29 ± 0,02
Ácido ascórbico (mg/100 g)	26,43 ± 0,12
Atividade de água (25 °C)	0,989 ± 0,001
Cinzas (%)	0,30 ± 0,01
Sólidos solúveis totais (°Brix)	8,73 ± 0,22
Açúcares totais (% glicose)	6,05 ± 0,02
Açúcares redutores (% glicose)	4,05 ± 0,01
Açúcares não-redutores (% sacarose)	1,90 ± 0,01
Lipídeos (%)	0,30 ± 0,01
Proteínas (%)	0,75 ± 0,01
Luminosidade (L*)	51,01 ± 0,31
Intensidade de vermelho (+ a*)	2,14 ± 0,12
Intensidade de amarelo (+ b*)	35,17 ± 0,48

Observa-se que a polpa de umbu integral apresentou teor de água de 87,67%, valor inferior ao determinado por Silva et al. (2015), ao determinarem as propriedades físico-químicas do umbu in natura, com teor de água de 89,04%; por Marinho et al. (2012), para a polpa de umbu com teor de água de 91,08%; e por Paula et al. (2012), para a polpa de umbu em estágio de maturação madura com teor de água de 89,48%. As diferenças entre os teores de água do presente trabalho e os dados da literatura ocorrem de acordo com o estágio de maturação, espécie, condições edafoclimáticas, entre outros fatores.

A acidez total titulável da polpa de umbu integral foi de 1,32% de ácido cítrico, sendo próxima à encontrada por Lima et al. (2015) na caracterização de diferentes genótipos de umbu-cajazeira (*Spondias* sp.), em que constataram teores de 1,27% de ácido cítrico para amostras do município de Santo Estevão – BA e 1,41% de ácido cítrico para frutos do município de Serrinha – BA. Valor superior foi quantificado por Silva et al. (2011) ao estudarem a composição físico-química da polpa de umbu, sendo verificada uma acidez de 1,82% de ácido cítrico. Gomes et al. (2012) relataram que a variação da acidez pode ser devido às diferenças no estágio de maturação dos frutos, região de produção e condições do processamento.

O pH da polpa de umbu foi de 2,29, sendo considerada uma polpa muito ácida. Valores próximos foram quantificados por Bastos et al. (2016) analisando a polpa de umbu, que encontraram pH de 2,42; por Silva et al. (2015), que mediram um pH de 2,35 para o umbu; por Marinho et al. (2012), que verificaram pH de 2,21, e por Silva et al. (2011), com pH de 2,47, ao trabalharem com frutos de umbu e umbu-cajazeira, respectivamente. Este valor classifica a polpa de umbu como muito ácida, característica importante que desfavorece o desenvolvimento de microrganismos bacterianos (LEITE et al., 2016).

É possível verificar que o teor de ácido ascórbico da polpa de umbu integral foi de 26,43 mg/100 g. Paula et al. (2012), ao avaliarem o valor nutricional do umbu, constataram valor de vitamina C próximo de 24,97 mg/100 g. Segundo Santos et al. (2010), o teor de ácido ascórbico presente naturalmente nas frutas é um parâmetro nutricional de grande importância devido ao seu elevado poder antioxidante na prevenção e combate de diversas doenças. Silva et al. (2011), ao avaliaram a composição físico-química de polpas de umbu de diferentes genótipos, verificaram teores de ácido ascórbico de 26,17 mg/100 g, 25,46 mg/100 g e 25,87 mg/100 g. A vitamina C é um elemento essencial à saúde, não podendo ser sintetizada pelo organismo humano, sendo necessária a sua administração através da alimentação ou da suplementação artificial (PENTEADO, 2003), por isso a importância de se consumir alimentos ricos em vitamina C como os frutos do umbuzeiro.

A atividade de água é de grande importância na conservação de alimentos, pois têm influência direta no controle da taxa de deterioração por microrganismos e reações enzimáticas e químicas que ocorrem durante a armazenagem (FELLOWS, 2006). Geralmente, polpa de frutas tendem a uma atividade de água superior a 0,980. Verifica-se atividade de água (a_w) de 0,989 para a polpa de umbu integral sendo próxima à encontrada por Leite et al. (2016), que foi de 0,980 para a polpa do umbu-cajá, e semelhante à

quantificada por Maciel et al. (2016) para as polpas de goiaba e acerola, com atividades de água de 0,99.

O conteúdo mineral, ou cinzas da polpa de umbu, foi de 0,30%, se aproxima dos valores encontrados por Silva et al. (2015), que foi de 0,37%, para a polpa de umbu in natura, e por Maciel et al. (2016), para a polpa da goiaba com teor de cinzas de 0,33%. Leite et al. (2016) verificaram valores superiores de 0,44% e 0,54% de teor de cinzas para as polpas de jaca e umbu-cajá, respectivamente. O teor de cinzas depende do tipo de solo e da composição do mesmo (KHAN et al., 2014).

O teor de sólidos solúveis totais da polpa de umbu foi de 8,73 °Brix, sendo inferior ao determinado por Menezes et al. (2017) para amostras de umbu, que foi de 10,25 °Brix, e por Lima et al. (2015), que apresentou 9,54 °Brix, também para a polpa de umbu. Paula et al. (2012) determinaram teor de sólidos solúveis inferior ao encontrado neste trabalho, sendo o valor de 6,47 °Brix. A concentração de sólidos solúveis totais do fruto em ponto de consumo pode variar entre frutos em função dos fatores genéticos e ambientais, mesmo se os frutos forem colhidos com a mesma aparente maturidade (MARTINSEEN e SCHAARE, 1998).

Os teores de açúcares totais, redutores e não-redutores da polpa de umbu foram de 6,05% de glicose, 4,05% de glicose e 1,90% de sacarose, respectivamente, próximos aos quantificados por Silva et al. (2015), que encontraram teor de açúcares redutores da ordem de 4,92% de glicose em umbu; por Lima et al. (2015), ao avaliarem genótipos de umbu, cujo teor de açúcares totais foi de 8,69% de glicose e de 4,25% de sacarose para o teor de açúcares não-redutores. Os teores de açúcares variam de acordo com o estágio de maturação dos frutos, tendo em vista que os açúcares presentes em polpas de fruta estão diretamente relacionados ao teor de sólidos solúveis totais (SOUSA et al., 2012).

Os resultados observados para os teores de lipídeos e proteínas foram de 0,30 e 0,75%, respectivamente, superando os valores determinados por Santos et al. (2010), ao estudarem a composição do umbu-cajá, em que encontraram para os lipídeos e proteínas resultados de 0,11 e 0,63%, respectivamente. Castro et al. (2016), ao estudarem a composição centesimal da polpa de umbu-cajá, encontraram valores para o teor de proteínas de 0,90%, valor um pouco superior ao determinado neste estudo. A variação dos parâmetros citados provavelmente pode ser atribuída às diferenças de espécies, local de colheita dos frutos e tipos de solo e clima.

Dos parâmetros da cor, luminosidade (L*), intensidade de vermelho (+a*) e intensidade de amarelo (+b*), verifica-se que a polpa apresentou luminosidade acima de 50

e predominância da intensidade de amarelo. Marinho et al. (2012), ao avaliarem a cor em polpa de umbu, verificaram os valores de $L^* = 44,0$; $a^* = +0,6$ e $b^* = +25,65$. Silva et al. (2011), avaliando a caracterização físico-química da polpa de umbu determinaram valores de luminosidade (L^*) de 43,93, intensidade de vermelho ($+a^*$) de +0,47 e intensidade de amarelo ($+b^*$) de +26,42, corroborando com os dados deste trabalho, em que a polpa de umbu tem predominância de tom de amarelo.

Na Tabela 4.2 são apresentados os valores dos parâmetros da caracterização química, física e físico-química da polpa de noni integral, onde se observa elevado teor de água, compatível com a determinação de outros autores, como Beltrão et al. (2014), ao analisarem a polpa do noni em diferentes estádios de maturação, onde determinaram teor de água de 91,19% para os frutos maduros; Praxedes et al. (2012) que, ao avaliaram as características físico-químicas de frutos de noni encontraram teor de água de 91,07%; e Nunes et al. (2014) que, ao determinaram as características químicas e físico-químicas da polpa de noni encontraram teor de água de 91,1%.

Tabela 4.2 – Valores médios dos parâmetros químicos, físicos e físico-químicos da polpa de noni integral

Parâmetros analisados	Média e desvio padrão
Teor de água (%)	90,38 ± 0,06
Acidez total titulável (% ácido cítrico)	0,47 ± 0,00
pH	4,33 ± 0,03
Ácido ascórbico (mg/100 g)	112,38 ± 0,26
Atividade de água (25 °C)	0,988 ± 0,006
Cinzas (%)	0,77 ± 0,01
Sólidos solúveis totais (°Brix)	9,19 ± 0,08
Açúcares totais (% glicose)	11,30 ± 0,04
Açúcares redutores (% glicose)	5,24 ± 0,02
Açúcares não-redutores (% sacarose)	5,76 ± 0,08
Lipídeos (%)	0,09 ± 0,02
Proteínas (%)	1,07 ± 0,06
Luminosidade (L^*)	63,53 ± 0,18
Intensidade de vermelho ($+ a^*$)	1,35 ± 0,10
Intensidade de amarelo ($+ b^*$)	16,67 ± 0,30

Na determinação da acidez total titulável em polpa de noni, o ácido cítrico foi usado como padrão por convenção, já que ainda não existem na literatura dados sobre o ácido predominante neste fruto. O valor da acidez total titulável determinada de 0,47% de ácido cítrico é semelhante ao encontrado por Secretti et al. (2015), que foi de 0,46% de ácido cítrico. Faria et al. (2014) encontraram o valor de 0,44% de ácido cítrico na polpa de noni in natura e Nery et al. (2013) caracterizaram frutos de noni cultivados em Fortaleza – Ceará e encontraram acidez de 0,53% de ácido cítrico.

O pH é um parâmetro essencial na conservação de produtos agrícolas, trata-se de um fator de importância fundamental na limitação dos tipos de microrganismos capazes de se desenvolverem no alimento (GAVA et al., 2008). O pH encontrado para a polpa de noni foi de 4,33, próximo ao determinado por Beltrão et al. (2014) em polpa do noni, que foi de 4,43. Silva et al. (2012) encontraram pH de 4,66 para a polpa de noni madura, e Lemos et al. (2015) encontraram valor de pH de 4,77 ao caracterizarem físico-quimicamente as sementes com resíduo de polpa de noni.

Verifica-se que o teor de ácido ascórbico presente na polpa de noni, de 112,38 mg/100 g, foi próximo aos encontrados nos estudos de Praxedes et al. (2012) e Nery et al. (2013), de 113 mg/100 g e 117,33 mg/100 g, respectivamente, ambos para a polpa do fruto de noni. Alencar et al. (2016) reportaram um valor mais elevado, de 166,66 mg/100 g em polpa de noni integral. As discrepâncias nos teores de ácido ascórbico encontrados nos frutos podem estar relacionadas com o grau de maturação dos frutos analisados, condições edafoclimáticas de produção, além da metodologia utilizada para quantificação (SILVA e NAVES, 2001).

A atividade de água (a_w) da polpa de noni, com valor de 0,988 foi semelhante ao encontrado por Lemos et al. (2015), que foi de 0,992 e por Correia et al. (2011), cuja atividade de água em polpa de noni cultivada no estado do Ceará foi de 0,93. A atividade de água é o fator que mais influencia na alteração dos alimentos por estar relacionada com o crescimento e a atividade metabólica dos micro-organismos e com as reações hidrolíticas, geralmente polpa de frutas tendem a uma atividade de água superior a 0,98 (GAVA et al., 2008).

O teor de cinzas da polpa de noni foi de 0,77%, sendo superior ao encontrado por Faria et al. (2014), que foi de 0,66% para o noni produzido em Cuiabá – MT, e por Nunes et al. (2014), que encontraram, ao caracterizarem a polpa de noni, um teor de cinzas de 0,70%. Costa et al. (2013) estudaram a atividade antioxidante e outras características da polpa de noni e determinaram 0,93% de cinzas. Palioto et al. (2015) determinaram a

composição centesimal de frutos de noni cultivados no Paraná e encontraram teor de cinzas de 0,75%. O teor de cinzas depende do solo, clima, variedade, entre outros fatores, onde o fruto foi cultivado (LEMOS et al., 2015), o que justifica a variação dos valores do teor de cinzas na literatura.

Os teores de sólidos solúveis totais são utilizados como uma determinação aproximada de teores de açúcares (MANICA et al., 1998), não representando o teor exato de açúcares porque outras substâncias também se encontram dissolvidas (CHITARRA e CHITARRA, 2005). Neste estudo, o valor dos sólidos solúveis totais foi de 9,19 °Brix, sendo próximo ao encontrado por Canuto et al. (2010), que foi de 9,0 °Brix para frutos de noni cultivados na Amazônia; por Nery et al. (2013), que encontraram teor de sólidos solúveis totais de 10,6 °Brix ao caracterizarem físico-quimicamente a polpa do noni cultivada em Fortaleza – CE; e por Beltrão et al. (2014), ao caracterizarem frutos de noni com teor de sólidos solúveis totais de 9,21 °Brix.

Os teores de açúcares redutores e açúcares não-redutores da polpa de noni, de 5,24% de glicose e 5,76% de sacarose, foram próximos aos encontrados por Beltrão et al. (2014), que foram de 5,23% de glicose e 5,66% de sacarose para os açúcares redutores e açúcares não-redutores, respectivamente, em polpas de noni; e por Correia et al. (2011) que determinaram 5,45% de glicose e 5,32% de sacarose para os açúcares redutores e não-redutores da polpa de noni cultivado no estado do Ceará.

Os resultados observados para os lipídeos de 0,09% foi próximo do teor determinado por Canuto et al. (2010), que foi de 0,1% para frutos de noni cultivados na Amazônia, e mais que o dobro do reportado por Faria et al. (2014), que determinaram um valor de 0,04% para frutos de noni cultivados na cidade de Cuiabá – MT.

Costa et al. (2013) encontraram teor de proteínas de 2,24% para a polpa de noni, valor superior ao encontrado neste trabalho. Cunha et al. (2012) realizaram a caracterização nutricional de frutos de noni cultivados em Limoeiro do Norte – CE e encontraram teor de proteínas próximo ao determinado neste estudo, que foi de 0,89%. Variações nestes parâmetros podem ser atribuídas à influência das condições edafoclimáticas e à variabilidade genética dos espécimes dos quais se obtiveram os frutos.

Observa-se que a luminosidade L^* superou o valor de 60 e a intensidade de amarelo predominou sobre a intensidade de vermelho. Tolentino et al. (2014) determinaram para os parâmetros de cor da polpa de noni valores próximos aos encontrados neste trabalho para luminosidade e intensidade de amarelo, obtendo valores médios de $L^* = 54,2$; $a^* = -4,40$ e

+b* = 18, 27. Lemos et al. (2015) ao caracterizarem sementes com resíduo de polpa de noni, determinaram valores de L*=51,29; +a*=2,70 e +b*=5,26 para os parâmetros de cor.

4.2 – Propriedades termofísicas

4.2.1 – Massa específica

Na Tabela A.1 (Apêndice A) tem-se a análise de variância das massas específicas das polpas de umbu, noni e dos combinados das mesmas em função das diferentes temperaturas. Verifica-se um efeito significativo a 1% de probabilidade, pelo teste Tukey, para o fator temperatura e para a interação desta com a massa específica das polpas estudadas.

Na Tabela 4.3 se encontram os valores médios da massa específica das polpas de umbu, noni e dos combinados das mesmas em função da temperatura.

Tabela 4.3 – Massa específica (kg/m³) da polpa de umbu, noni e suas combinações em função de diferentes temperaturas

Temp. (°C)	Umbu	Noni	C ₁ *	C ₂ *	C ₃ *
5	1047,5 aA	1003,6 aC	1022,4 aB	1018,5 aB	1005,9 aC
35	1034,3 bA	946,1 bD	1004,1 bB	994,3 bC	936,7 bE
65	1013,2 cA	904,0 cD	983,4 cB	951,8 cC	907,7 cD

DMS para colunas = 0,0077; DMS para linhas = 0,0090; MG = 984,8 kg/m³; CV = 0,46%; DMS - Diferença mínima significativa; MG - Média geral; CV - Coeficiente de variação em %

Obs: As médias seguidas pela mesma letra minúscula nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

*: C₁ (25% de Noni + 75% de Umbu); C₂ (50% de Noni + 50% de Umbu); e C₃ (75% de Noni + 25% de Umbu)

Observam-se reduções de massa específica com o aumento da temperatura, com diferenças estatisticamente significativas entre as temperaturas para as diferentes amostras. Esse comportamento era esperado e confirmado por outros autores que também trabalharam com polpa de frutas, como Lima et al. (2003), ao determinarem as propriedades termofísicas na polpa de umbu, Dantas Júnior et al. (2007), ao analisarem a massa específica da polpa de manga espada, Muniz et al. (2006), ao caracterizarem as propriedades termofísicas de polpas de bacuri, Pereira et al. (2002), ao determinarem a massa específica de polpa de açaí em função do teor de sólidos totais e da temperatura, e

Mercali et al. (2011) em polpas de acerola e mirtilo nas temperaturas de 30 a 80 °C e concentração entre 2 e 16 °Brix.

Verifica-se que a massa específica é maior para os combinados com maior porcentagem de polpa de umbu, e o menor valor, de 907,7 kg/m³, para o combinado (C₃) com 75% de polpa de noni e 25% de polpa de umbu na temperatura de 65 °C.

Souza et al. (2010) analisaram as propriedades termofísicas da polpa de umbu nas temperaturas de 10 a 80 °C e teores de água de 75 a 95%, constatando-se reduções da massa específica com o aumento da temperatura e do teor de água, onde, para a menor temperatura (10 °C) e teor de água de 75%, a massa específica foi de 1100 kg/m³ e para a maior temperatura (80 °C) a massa específica foi de 1020 kg/m³. Neste estudo, o maior valor de massa específica, de 1047,5 kg/m³ para polpa de umbu na temperatura de 5 °C encontra-se na faixa intermediária, ressaltando-se o teor de água diferente das amostras dos autores citados.

Bon et al. (2010) avaliaram a massa específica da polpa de manga Tommy Atkins nas temperaturas de 20 a 80 °C e teores de água de 1,08; 1,47; 2,24; 3,84 e 8,25%, encontrando o menor resultado de massa específica na temperatura de 20 °C, que foi de 1005,0 kg/m³, sendo próximo à massa específica de C₃, elaborada com (75% de noni + 25% de umbu) na temperatura de 5°C.

Guedes et al. (2010), avaliando as propriedades físicas da melancia, constataram que a massa específica diminuiu com o aumento da temperatura e aumentou com o aumento da concentração sendo que, para os menores valores de temperatura e concentração analisados, a massa específica encontrada foi de 1035,0 kg/m³, enquanto para os maiores valores de temperatura e concentração a massa específica determinada foi de 1020,2 kg/m³. Para a concentração de 8 °Brix e temperatura de 30 °C, esses pesquisadores encontraram um valor de massa específica de 1029,5 kg/m³ e a 60 °C de 1015,2 kg/m³, se assemelhando aos valores determinados neste estudo para a polpa de umbu com concentração de sólidos solúveis totais de 8,73 °Brix nas temperaturas de 35 e 65 °C, com as massas específicas de 1034,2 e 1013,2 kg/m³.

Na Figura 4.1 está representada graficamente a massa específica em função da temperatura para as polpas de umbu, noni e suas combinações. Observa-se que a polpa de umbu apresentou as maiores massas específicas nas diferentes temperaturas analisadas, conseqüentemente a combinação (C₁), com maior percentual de polpa de umbu, apresentou valores de massa específica superiores às demais combinações.

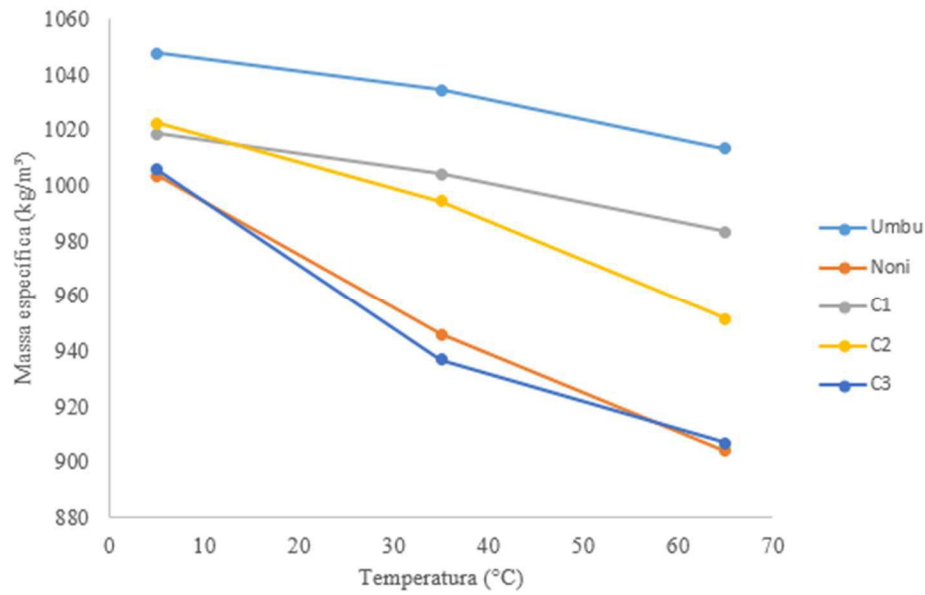


Figura 4.1 - Efeito da temperatura na massa específica da polpa de umbu, noni e suas combinações

Na Tabela 4.4 tem-se os valores teóricos de massa específica para as polpas de umbu e noni, que foram calculadas por meio de equações propostas em literatura, conforme Alvarado e Romero (1989), proposto para polpas de frutas em geral, e por Ramos e Ibarz (1998), proposto para suco de pêssgo, com os respectivos erros percentuais em relação aos valores determinados experimentalmente.

Tabela 4.4 – Valores da massa específica teórica e erros percentuais para a polpa de umbu e noni em diferentes temperaturas

Equação	Temp. (°C)	Umbu		Noni	
		Massa específica teórica (kg/m ³)	Erro percentual (%)	Massa específica teórica (kg/m ³)	Erro percentual (%)
Alvarado e Romero (1989)	5	1040,1	0,71	1042,3	3,85
	35	1030,8	0,33	1032,9	9,18
	65	1016,7	0,35	1018,8	12,70
Ramos e Ibarz (1998)	5	1040,6	0,66	1042,5	3,88
	35	1025,1	0,88	1027,1	8,56
	65	1009,7	0,35	1011,6	11,90

Verifica-se que as duas equações utilizadas são adequadas para predizer os valores teóricos da massa específica das amostras de polpa de umbu e noni nas diferentes temperaturas avaliadas, uma vez que apresentaram baixos valores de erros percentuais.

Pereira et al. (2002), ao avaliarem a equação de Alvarado e Romero para estimar a massa específica da polpa de açaí dos tipos A (4,8 °Brix), B (3,9 °Brix) e C (3,0 °Brix), reportaram erros percentuais inferiores a 1,4%.

Muniz et al. (2006), ao aplicarem também a equação de Alvarado e Romero para estimar a massa específica teórica de polpa de bacuri nas temperaturas 25 e 30 °C, e com sólidos solúveis totais de 5,0; 7,5; 10; 12,5; 17,5; 20 °Brix, encontraram erros inferiores a 3,5%. Erros percentuais entre 3,8 e 5,8% foram encontrados em estimativas de massa específica teórica de polpa de cupuaçu relatados por Araújo et al. (2002), nas temperaturas de 10, 20, 30, 40 e 50 °C, com sólidos solúveis totais de 9 °Brix.

4.2.2 – Calor específico

Na Tabela A.2 (Apêndice A) tem-se a análise de variância do calor específico da polpa de umbu, noni e dos combinados das mesmas em função das diferentes temperaturas. Verifica-se um efeito significativo a 1% de probabilidade, pelo teste de Tukey, para o fator temperatura e para interação deste com o calor específico das polpas estudadas.

Na Tabela 4.5 verifica-se que com o aumento da temperatura nas polpas de umbu, noni e suas combinações houve tendência de aumento do calor específico. Observa-se uma diferença percentual de até 74% entre o calor específico mínimo de 2,44 kJ/kg °C e o máximo de 4,24 kJ/kg °C.

Tabela 4.5 – Calor específico (kJ/kg °C) da polpa de umbu, noni e suas combinações em função de diferentes temperaturas

Temp.(°C)	Umbu	Noni	C ₁ *	C ₂ *	C ₃ *
5	2,44 cA	2,72 cA	2,53 cA	2,60 cA	2,65 cA
35	3,54 bA	3,60 bA	3,55 bA	3,46 bA	3,57 bA
65	4,05 aA	4,24 aA	4,17 aA	4,13 aA	4,18 aA

DMS para colunas = 0,36; DMS para linhas = 0,42; MG = 3,43 kJ/kg °C; CV = 6,15%; DMS - Diferença mínima significativa; MG - Média geral; CV - Coeficiente de variação (%)

Obs: médias seguidas pela mesma letra minúscula nas colunas e maiúscula nas linhas não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

* - C₁ (25% de Noni + 75% de Umbu); C₂ (50% de Noni + 50% de Umbu); e C₃ (75% de Noni + 25% de Umbu).

Nota-se que houve diferença estatística entre os valores de calor específico para as diferentes amostras de polpa conforme se alterou as temperaturas. O efeito da temperatura sobre o valor de calor específico foi observado para todas as amostras.

O mesmo comportamento para o calor específico foi determinado por Sousa et al. (2016), para polpas de pequi com diferentes concentrações de sólidos solúveis totais (6, 8, 10 e 12 °Brix) e em diferentes temperaturas (10, 20, 30, 40 e 50 °C), em que, com o aumento da temperatura, os valores médios do calor específico também aumentaram estatisticamente e, com o aumento da concentração, as médias apresentaram pouca diferença significativa entre si.

Souza et al. (2010) encontraram valores de calor específico superiores para a polpa de umbu que variou de 3,66 a 4,18 kJ/kg °C para teores de água de 70 a 95% e em diferentes temperaturas (5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75 e 85 °C). Lima et al. (2003) também estudaram as propriedades termofísicas da polpa de umbu, avaliando a influência de sólidos solúveis totais nas concentrações de 10, 20 e 30 °Brix, onde encontraram valores de calor específico de 3,67, 3,48 e 3,21 kJ/kg °C, respectivamente, que se enquadram na faixa dos valores determinados no presente trabalho.

Observa-se que para uma mesma temperatura não houve diferenças significativas entre o calor específico das polpas de umbu, noni e dos seus combinados.

A Figura 4.2 apresenta os valores do calor específico das polpas de umbu, noni e dos seus combinados em função da temperatura.

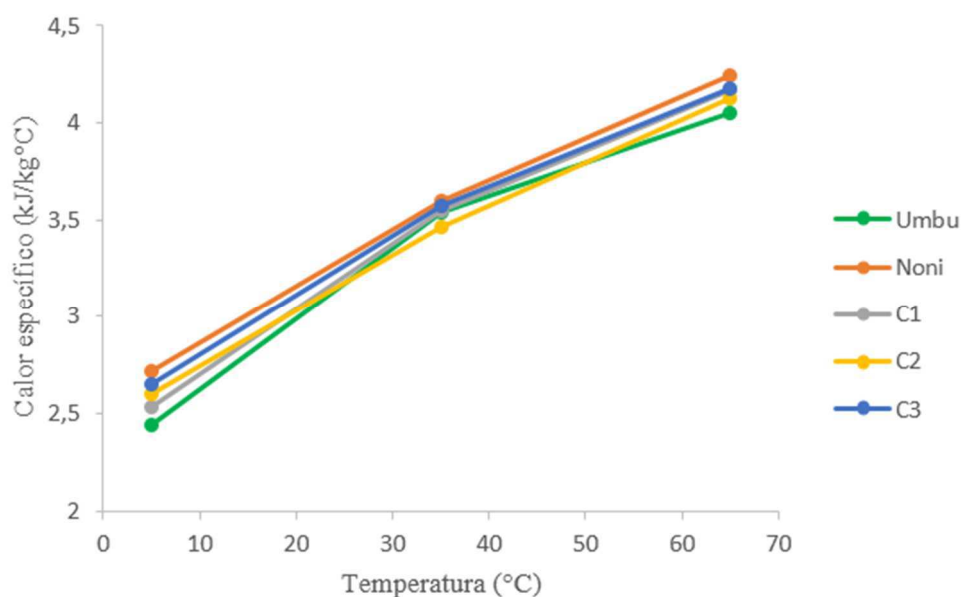


Figura 4.2 - Efeito da temperatura no calor específico das polpas de umbu, noni e suas combinações

Conforme se vê nas curvas dos valores experimentais médios apresentadas na Figura 4.2, o calor específico das amostras para uma mesma temperatura são muito próximos, havendo aumento do calor específico com o aumento da temperatura. O calor específico apresentado por Choi e Okos (1983) para sucos de frutas foi entre 3,00-4,00 kJ/kg °C. Outros pesquisadores relataram valores para o calor específico nos mesmos intervalos de teor de água e temperatura, como 3,346 kJ/kg °C para a pasta de açaí (PEREIRA et al., 2002), 3,616 kJ/kg °C para a polpa de bacuri (MUNIZ et al., 2006) e 2,962 kJ/kg °C para polpa de banana (ALVARADO, 1994).

Souza et al. (2011) encontraram valores experimentais médios para calor específico mínimo de 2,70 kJ/kg °C e 3,92 kJ/kg °C para polpa de jaca com um teor de água de 65 a 95%. Muramatsu et al. (2010) mediram as propriedades termofísicas de três tipos de suco (uva, laranja e pepino), à temperaturas variando de 10 a 50 °C e concentrações de sólidos solúveis totais de 10 a 50 °Brix, constatando que os valores do calor específico situaram-se de 2,6 a 4,1 kJ/kg °C.

Na Tabela 4.6 encontra-se os valores do calor específico teórico para as polpas de umbu e noni em função das diferentes temperaturas, calculados segundo as equações de Giraldo-Gómez et al. (2010) e Manohar et al. (1991) com seus respectivos erros percentuais em relação aos valores experimentais.

Tabela 4.6 – Valores do calor específico teórico (kJ/kg °C) e erros percentuais para a polpa de umbu e noni em diferentes temperaturas

Equação	Temp. (°C)	Umbu		Noni	
		Calor específico teórico (kJ/kg °C)	Erro percentual (%)	Calor específico teórico (kJ/kg °C)	Erro percentual (%)
Giraldo-	5	4,093	70,24	4,224	55,50
Gómez et al.	35	4,095	15,63	4,226	17,25
(2010)	65	4,098	1,12	4,229	0,36
Manohar et al. (1991)	5	3,608	50,06	3,798	39,82
	35	3,611	1,96	3,801	5,46
	65	3,614	10,81	3,805	10,36

Para a polpa de umbu observa-se que o calor específico teórico calculado com a equação de Giraldo-Gómez et al. (2010) se distanciou do valor experimental na temperatura mais baixa, apresentando melhores previsões conforme se aumentou a temperatura. Para a equação de Manohar et al. (1991) a melhor previsão se deu nas temperaturas de 35 e 65 °C. Comportamento semelhante foi observado nos valores calculados para a polpa de noni, confirmando melhores previsões com o aumento de temperatura na equação de Giraldo-Gomez e estimativas mais precisas nas temperaturas de 35 e 65 °C na equação de Manohar. Considerando que o erro percentual máximo para que a equação seja adequada para estimar com precisão os valores teóricos deve ser de 10%, observa-se que as equações não permitiram boa previsão a 5 °C com as duas equações e a 35 °C com a equação de Giraldo-Gómez et al.

4.2.3 – Difusividade térmica

Na Tabela A.11 (Apêndice A), tem-se a análise de variância da difusividade térmica da polpa de umbu, noni e suas combinações. Verifica-se um efeito significativo a 1% de probabilidade, pelo teste de Tukey, entre as médias das amostras de polpas de umbu, noni e dos seus combinados.

Na Tabela 4.7 são apresentados os valores médios de difusividade térmica das polpas de umbu, noni e suas combinações. Verifica-se efeito altamente significativo, pelo Teste F, o que sugere diferenças entre as médias da difusividade térmica.

Tabela 4.7 – Difusividade térmica (m²/s) das polpas de umbu, noni e suas combinações

Amostras	Umbu	Noni	C ₁ *	C ₂ *	C ₃ *
Difusividade (m ² /s)	3,44 x 10 ⁻⁷ a	2,71 x 10 ⁻⁷ e	3,37 x 10 ⁻⁷ b	3,29 x 10 ⁻⁷ c	2,83 x 10 ⁻⁷ d

DMS = 0,83232 x 10⁻⁷; MG = 3,08 x 10⁻⁷; CV = 12,36%; DMS - Diferença mínima significativa; MG - Média geral; CV - Coeficiente de variação (%)

Obs: As médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

*C₁ (25% de Noni + 75% de Umbu); C₂ (50% de Noni + 50% de Umbu); e C₃ (75% de Noni + 25% de Umbu).

Silva et al. (2010) estudaram as características termofísicas da polpa de jenipapo em temperaturas de 5 a 80 °C e teores de água de 6 a 24% e encontraram, para a difusividade térmica, valores de 1,59 x 10⁻⁷ a 5,58 x 10⁻⁷ m²/s, situando-se os valores

encontrados para as polpas de umbu, noni e seus combinados dentro desse intervalo. Mercali et al. (2011) estudaram as propriedades físicas da polpa de acerola e mirtilo e encontraram para a difusividade térmica da polpa de acerola, contendo 8% de sólidos solúveis totais, o valor de $1,53 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ e para a polpa de mirtilo, com teor de sólidos solúveis totais de 16 e 14,24%, os valores de $1,47 \times 10^{-7}$ e $1,51 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, inferiores, portanto, aos valores de difusividade térmica determinados neste estudo. Giraldo-Gómez et al. (2010) avaliaram as propriedades termofísicas de suco de abacaxi e as difusividades térmicas determinadas foram de $1,10 \times 10^{-7}$ a $1,33 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, sendo que as amostras apresentaram teores de água de 55 a 90%, valores inferiores aos encontrados para polpa de umbu, noni e dos seus combinados.

Na Tabela 4.8 se encontram as difusividades térmicas teóricas obtidas por meio de equações e os erros percentuais. Observa-se que os valores das difusividades térmicas teóricas calculados foram superiores aos valores experimentais, com erros superiores a 50%, não sendo recomendado o uso das equações testadas para estimar a difusividade térmica das polpas de noni e umbu.

Tabela 4.8 – Valores da difusividade térmica teórica e erros percentuais para a polpa de umbu e noni em diferentes temperaturas

Equação	Umbu		Noni	
	Difusividade térmica (m^2/s)	Erro (%)	Difusividade térmica (m^2/s)	Erro (%)
Singh (1982)	$5,04 \times 10^{-7}$	80,68	$5,19 \times 10^{-7}$	77,81
Giraldo-Gómez et al. (2010)	$4,54 \times 10^{-7}$	57,03	$4,44 \times 10^{-7}$	51,55

4.2.4 – Condutividade térmica

Na Tabela 4.9 tem-se a condutividade térmica das polpas de umbu, noni e dos seus combinados nas diferentes temperaturas analisadas. Observa-se que a condutividade térmica apresentou valores variando de 0,07 a 0,15 W/m °C, com tendência de aumento com o aumento da temperatura em todas as polpas avaliadas; demonstrando a influência desse fator sobre a condutividade térmica do material estudado.

Tabela 4.9 – Condutividade térmica (W/m °C) da polpa de umbu, noni e suas combinações em função de diferentes temperaturas

Temp. (°C)	Umbu	Noni	C ₁ *	C ₂ *	C ₃ *
5	0,11	0,07	0,09	0,08	0,08
35	0,13	0,09	0,12	0,12	0,09
65	0,14	0,10	0,15	0,13	0,11

*C₁ (25% de Noni + 75% de Umbu); C₂ (50% de Noni + 50% de Umbu); e C₃ (75% de Noni + 25% de Umbu).

Villa-Vélez et al. (2012), ao avaliarem a condutividade térmica do suco de uvaia verificaram para a temperatura de 0 °C um valor de 0,450 W/m °C e para a temperatura de 40 °C de 0,475 W/m °C, observando também aumento com a temperatura. Zabalaga et al. (2016) determinaram experimentalmente as propriedades termofísicas de espécies de banana (*Musa cavendishii*) durante a secagem por convecção e encontraram valores de condutividade térmica de 0,894 a 0,154 W/m °C para teores de água entre 0,71 e 0,29 kg/kg.

Souza et al. (2010) ao determinarem as propriedades termofísicas da polpa de umbu em diferentes temperaturas e teores de água, observaram um aumento no valor da condutividade térmica com o aumento da temperatura, estando os valores de condutividade térmica entre 0,5 e 2,5 W/m °C. Valores superiores de condutividade térmica aos das polpas de umbu, noni e dos seus combinados foram encontrados por Muramatsu et al. (2010) ao medirem as propriedades termofísicas de sucos de uva e laranja, sob temperaturas variando de 10 a 50 °C e concentrações de sólidos totais de 10 a 50%, com valores de condutividade térmica variando entre 0,42 e 0,62 W/m °C para suco de uva e de 0,46-0,61 W/m °C para suco de laranja, e com a condutividade térmica aumentando linearmente com o aumento da temperatura e diminuindo com o aumento da concentração.

Giraldo-Gómez et al. (2010), ao determinarem a condutividade térmica do suco de lulo (*Solanum quitoense* Lam) com frações mássicas de água variando entre 0,50 e 0,90 kg/kg e temperaturas de 4 a 78,6 °C, verificaram comportamento semelhante aos da polpa de umbu, noni e dos seus combinados, com elevações da condutividade térmica com o aumento da temperatura. Bon et al. (2010), ao estudarem a condutividade térmica da polpa de manga (Tommy Atkins) nas temperaturas de 20, 40, 60 e 80 °C, e nos teores de água entre 1,0 a 9,0% (b.s.), verificaram que a condutividade térmica variou de 0,35 a 0,65 W/m °C.

Na Tabela 4.10 encontram-se as condutividades térmicas teóricas das polpas de umbu e noni nas diferentes temperaturas analisadas, calculadas segundo as equações de Constenla (1989) e Telis-Romero et al. (1998), com seus respectivos erros percentuais em relação aos valores experimentais. Ambas as equações apresentaram erros percentuais maiores que 100%, não sendo aconselhado o seu uso para as amostras estudadas.

Tabela 4.10 – Valores das condutividades térmicas teóricas e erros percentuais para a polpa de umbu e noni em diferentes temperaturas

Equação	Temp. (°C)	Umbu		Noni	
		Condutividade		Condutividade	
		térmica (W/m °C)	Erro (%)	térmica (W/m °C)	Erro (%)
Constenla (1989)	5	0,254	192,88	0,252	252,85
	35	0,288	128,44	0,286	209,72
	65	0,322	115,93	0,320	208,04
Telis-Romero et al. (1998)	5	0,472	445,30	0,487	559,33
	35	0,473	275,12	0,487	427,28
	65	0,473	234,78	0,487	368,80

4.3 – Secagem

4.3.1 – Secagem da polpa combinada de noni com umbu (C₁)

Na Figura 4.3 são apresentados os dados experimentais da cinética de secagem da polpa combinada C₁ (25% noni + 75% umbu) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, expressos através da razão do teor de água em função do tempo de secagem.

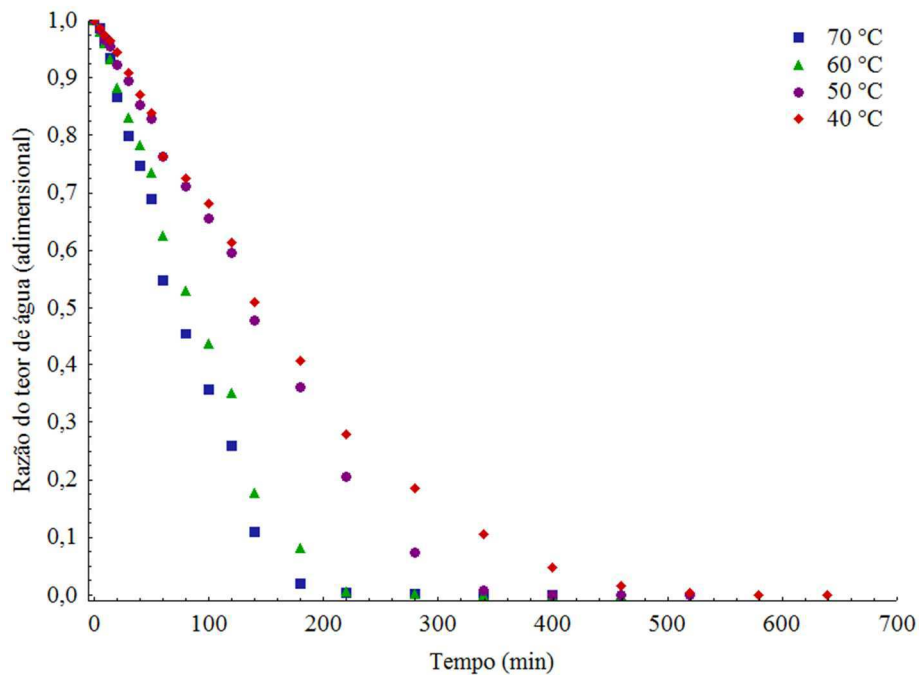


Figura 4.3 – Curvas de cinética de secagem da polpa combinada C₁ (25% noni + 75% umbu) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C

Verifica-se que o tempo de secagem diminuiu com o aumento da temperatura evidenciando aumento na taxa de remoção de água da polpa combinada.

Esses resultados corroboram os dados de autores que, ao trabalharem com produtos agrícolas, também verificaram a influência da temperatura no tempo de secagem: Silva et al. (2017) ao secarem polpa de cupuaçu; Castro et al. (2016) na secagem em camada fina de polpa de taturubá; Silva Filho et al. (2016), na secagem de polpa de manga cv. Haden; Camicia et al. (2015) na secagem de sementes de feijão-caupi; Menezes et al. (2013) na secagem do bagaço de maracujá-amarelo; Melo et al. (2013), na secagem da polpa de mandacaru; Sousa et al. (2011) na secagem do nabo forrageiro; Borges et al. (2011) na secagem da polpa de banana; Botelho et al. (2011) na secagem de fatias de cenoura; e Reis et al. (2011) na secagem de pimenta cumari.

A velocidade de secagem varia principalmente em função do teor de água inicial e final, do tipo e espécie de amostra, do tipo e tamanho do secador, da temperatura de secagem, umidade relativa do ar de secagem, entre outros fatores (BORSATO et al., 1999; VILLELA e SILVA, 1992). Corrêa et al. (2010) relataram que na secagem de produtos agrícolas existe uma clara dependência da velocidade de secagem com a temperatura do ar.

Moraes Filho et al. (2014) realizaram a secagem do resíduo agroindustrial da acerola (*Malpighia emarginata* DC.) em um secador de bandejas nas temperaturas de 60,

70 e 80 °C e com velocidade do ar de secagem de 4,0, 5,0 e 6,0 m/s observando que, com o aumento da velocidade do ar de secagem as resistências difusionais e convectivas foram minimizadas, facilitando a transferência de massa e calor do material para o ar, favorecendo, dessa forma a redução do tempo de secagem.

Na Tabela 4.11 tem-se os tempos de secagens e os teores de água finais da polpa combinada C₁ nas diferentes temperaturas de secagem. Os tempos decorridos para a cinética de secagem da polpa combinada C₁ foram 10,6 h (640 min); 8,6 h (520 min); 7,6 h (460 min); 6,6 h (400 min), para as temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, respectivamente, onde o valor médio do teor de água inicial foi de 88,58 ± 0,19% b.u. e o teor médio de água final foi de 8,06 ± 4,60% b.u. Constata-se que o tempo de secagem e o teor de água final (equilíbrio) diminuíram com o aumento da temperatura de secagem. Melo et al. (2013), ao secarem em camada de espuma a polpa do fruto de mandacaru com espessuras da camada de 0,5, 1,0 e 1,5 cm e nas temperaturas de 70, 80 e 90 °C, obtiveram tempos de secagem de aproximadamente 90 minutos para a maior temperatura e menor espessura e de aproximadamente 300 minutos para a menor temperatura e maior espessura analisadas, sendo tempos de secagem inferiores aos verificados no presente trabalho. Estas diferenças nos tempos de secagem estão principalmente relacionadas à composição físico-química das amostras.

Tabela 4.11 – Teores de água e tempos de secagem da polpa combinada C₁ (25% noni + 75% umbu) em diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	Teor de água inicial (% b.u.)	Teor de água final (% b.u.)	Tempo de secagem (min)
40	88,72	14,77	640
50	88,35	7,33	520
60	88,50	5,26	460
70	88,74	4,87	400

Silva Filho et al. (2016) determinaram a cinética de secagem em camada de espuma da polpa da manga cv. Haden nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C e espessuras da camada de 0,5, 1,0 e 1,5 cm, verificando que a espessura influenciou significativamente em todas as secagens, ocorrendo de forma mais rápida nas espessuras menores, de modo que, na temperatura de 70 °C os tempos de secagem foram 480, 660 e 780 min; na temperatura de 60 °C os tempos foram de 630, 720 e 825 min; a temperatura de 50 °C resultou nos

maiores tempos de secagem 690, 780 e 900 min, para as espessuras de 0,5, 1,0 e 1,5 cm, respectivamente, sendo esses tempos de secagem superiores aos verificados no presente trabalho.

Na Tabela 4.12 estão os parâmetros dos modelos Henderson e Pabis, Exponencial Dois Termos, Logarítmico, Page e Newton ajustados aos dados da cinética de secagem da polpa combinada C₁ (25% noni + 75% umbu), com os respectivos coeficientes de determinação (R²) e desvios quadráticos médios (DQM). Observa-se que todos os modelos matemáticos avaliados se ajustaram bem aos dados experimentais de secagem para a faixa de temperatura estudada, com R² superiores a 0,94 e DQM inferiores a 0,08 podendo ser utilizados na predição das cinéticas de secagem da polpa combinada C₁. Entretanto, dentre os modelos avaliados, o que melhor se ajustou aos dados experimentais foi o de Page apresentando os maiores R² (> 0,98) e os menores DQM (< 0,03) para a faixa de temperatura de 40 a 70 °C.

Valores semelhantes de R² e de DQM para o modelo de Page foram observados por Sousa et al. (2015) ao realizarem a secagem de *Spondias sp.* em camada fina nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C; por Melo et al. (2013) ao determinarem a cinética de secagem em camada de espuma da polpa do fruto do mandacaru; e por Furtado et al. (2010) ao secarem a polpa de seriguela pelo método de secagem camada de espuma nas temperaturas de 60, 70 e 80 °C.

Verifica-se que o parâmetro “a” dos modelos de Henderson e Pabis e Exponencial de Dois Termos aumentou com o aumento da temperatura de secagem. Comportamento também verificado por Castro et al. (2016) ao ajustarem o modelo de Henderson e Pabis aos dados experimentais da cinética de secagem de polpa de taturubá (*Pouteriamacrophylla (lam.) eyma.*) em camada fina nas temperaturas de 50 a 70 °C. Entretanto, para o modelo Logarítmico o parâmetro “a” não teve um comportamento de aumento ou redução com aumento da temperatura. Silva et al. (2016) avaliaram a cinética de secagem de polpa de carambola e concluíram que o parâmetro “a” do modelo de Midilli e Kucuk não possui significado físico no processo de secagem, visto que é uma constante do modelo.

Constata-se, de maneira geral, que o parâmetro “k” dos modelos Henderson e Pabis, Exponencial Dois Termos, Logarítmico, Page e Newton apresentaram tendência de aumento com o aumento da temperatura de secagem. Esta constante está relacionada à difusividade térmica no processo de secagem e seu comportamento ganha sentido, pois o aumento da temperatura fornece maior quantidade de energia na forma de calor, o que faz

com que a amostra se ajuste mais rapidamente à temperatura em seu entorno, atingindo o teor de água de equilíbrio em menor tempo do que no uso de temperaturas mais baixas (GUPTA et al., 2011).

Tabela 4.12 - Parâmetros dos modelos Henderson e Pabis, Exponencial Dois Termos, Logarítmico, Page e Newton, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM) ajustados à cinética de secagem da polpa combinada C_1 (25% noni + 75% umbu)

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros			R^2	DQM
		a	k			
Henderson e Pabis	40	1,0593	0,0056		0,9868	0,0422
	50	1,0698	0,0051		0,9690	0,0639
	60	1,0844	0,0081		0,9773	0,0576
	70	1,0863	0,0118		0,9795	0,0551
Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros			R^2	DQM
		a	k			
Exponencial de Dois Termos	40	0,0014	2,0967		0,9801	0,0514
	50	0,0015	3,1104		0,9574	0,0750
	60	0,0017	4,1396		0,9648	0,0718
	70	0,0018	5,1256		0,9685	0,0683
Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros			R^2	DQM
		a	k	c		
Logarítmico	40	1,1572	0,0044	0,1171	0,9940	0,0270
	50	1,4425	0,0028	0,4079	0,9918	0,0328
	60	1,1946	0,0064	0,1294	0,9866	0,0443
	70	1,1499	0,0101	0,0771	0,9950	0,0471
Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros			R^2	DQM
		k	n			
Page	40	0,0009	1,3441		0,9982	0,0161
	50	0,0004	1,4777		0,9946	0,0268
	60	0,0006	1,5277		0,9983	0,0157
	70	0,0013	1,4697		0,9959	0,0247
Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros			R^2	DQM
		k				
Newton	40		0,0051		0,9805	0,0513
	50		0,0046		0,9579	0,0745
	60		0,0072		0,9653	0,0713
	70		0,0106		0,9689	0,0678

O parâmetro “n” do modelo de Page que, segundo Araújo et al. (2017), reflete a resistência interna do produto à secagem aumentou com o aumento da temperatura de secagem. Comportamento também verificado por Sousa et al. (2011) ao realizarem a modelagem matemática para descrição da cinética de secagem de polpa de oiti (*Licania tomentosa*) nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

Na Figura 4.4 estão representados os ajustes do modelo matemático de Page aos dados experimentais da cinética de secagem da polpa combinada C₁ (25% noni + 75% umbu) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C. Este modelo foi considerado o melhor para estimar as curvas de cinética de secagem da polpa combinada C₁ e sua representação na Figura 4.4 demonstra a dispersão dos dados estimados em relação aos dados experimentais. Observa-se que as curvas ajustadas ficaram próximas aos dados experimentais evidenciando os altos valores de R² e baixos DQM, que os maiores tempos de secagem foram nas menores temperaturas e as curvas a 60 e 70 °C ficaram muito próximas. As curvas de cinética de secagem de um produto depende de vários fatores como velocidade do ar de secagem, teor de água inicial, teor de água final, umidade relativa do ar, temperatura, composição, pressão, entre outros (MOREIRA et al., 2018).

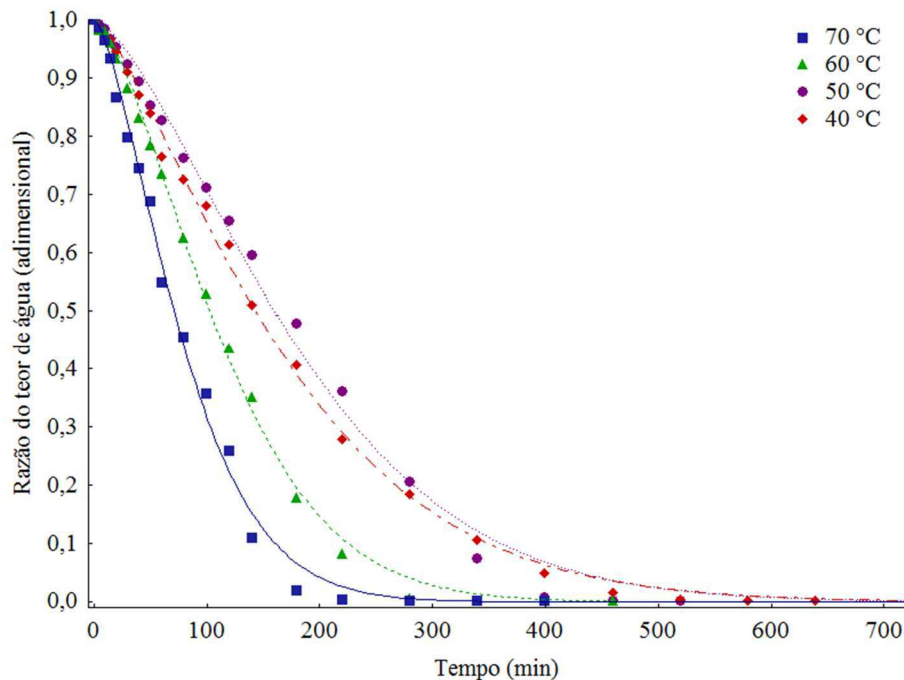


Figura 4.4 – Curvas de cinética de secagem da polpa combinada C₁ (25% noni + 75% umbu) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C com ajustes pelo modelo de Page

No Apêndice A, Figuras A.1 a A.4, tem-se a representação gráfica dos ajustes dos modelos de Henderson e Pabis, Exponencial Dois Termos, Logarítmico e Newton, aos dados experimentais das curvas de cinética de secagem da polpa combinada C₁.

4.3.2 – Secagem da polpa combinada de noni com umbu (C₂)

Na Figura 4.5 são apresentados os dados experimentais das cinéticas de secagem da polpa combinada C₂ (50% noni + 50% umbu) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, expressos através da razão do teor de água em função do tempo de secagem. Observa-se que a perda de água é mais acentuada no início da secagem reduzindo esse ritmo com o decorrer do tempo. Nota-se ainda que a temperatura influenciou diretamente no tempo de secagem, em que as polpas desidratadas nas maiores temperaturas demandaram menor intervalo de tempo para atingir o teor de água de equilíbrio. Silva et al. (2016) observaram o efeito da temperatura (40, 50 e 60 °C) sobre as curvas de secagem em camada delgada da polpa de carambola notando que com o aumento da temperatura do ar de secagem, ocorre uma elevação das taxas de remoção de água do produto e diminuição do tempo de secagem para a polpa atingir o equilíbrio.

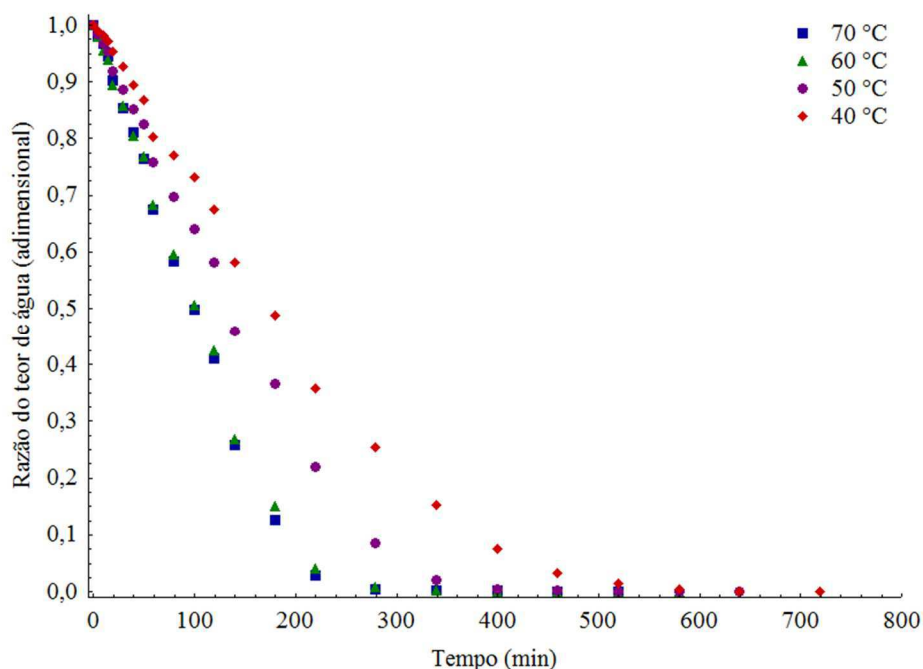


Figura 4.5 – Curvas de cinética de secagem da polpa combinada C₂ (50% noni + 50% umbu) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C

Dieb et al. (2015) ao determinarem as curvas de cinética de secagem da polpa de graviola pelo processo de secagem em camada de espuma nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, confirmaram o efeito da temperatura no sentido de diminuir o tempo de secagem, considerando, todavia, que temperaturas muito elevadas podem comprometer a qualidade do produto.

Ferreira et al. (2012) explicaram que a influência da temperatura se dá pelo aumento do potencial de transferência de calor entre o ar e o produto.

Na Tabela 4.13 tem-se os tempos de secagens e os teores de água finais da polpa combinada C₂ nas diferentes temperaturas de secagem. Os tempos decorridos na secagem dos combinados de polpa (50% noni + 50% umbu) foram de 12 h (720 min), 10,66 h (640 min), 9,66 h (580 min) e 8,66 h (520 min), para as temperaturas do ar de secagem de 40, 50, 60 e 70 °C, respectivamente, em que o teor de água inicial médio foi de 88,94 ± 0,12% b.u. (91,67% b.s.) e o final de 9,12 ± 1,72% b.u. (6,12% b.s.).

Tabela 4.13 – Teores de água e tempos de secagem da polpa combinada C₂ (50% noni + 50% umbu) em diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	Teor de água inicial (% b.u.)	Teor de água final (% b.u.)	Tempo de secagem (min)
40	89,07	11,37	720
50	88,89	9,44	640
60	89,01	8,30	580
70	88,85	7,37	520

Constata-se que o tempo de secagem e o teor de água final (equilíbrio) diminuíram com o aumento da temperatura de secagem. Silva et al. (2014), ao desidratarem banana em camada fina nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, também observaram redução nos tempos de secagem, sendo necessários 3625 minutos para a menor temperatura de secagem e 1200 minutos para a maior temperatura, até as amostras atingirem o teor de água de equilíbrio. Considerando que trata-se do mesmo intervalo de temperatura avaliado neste estudo, evidencia-se a influência do tipo de produto.

Carvalho (2014) produziu polpa de abóbora em pó pelo processo de secagem em leito de espuma nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C, reportando tempos médios de 1830, 930, 360, 270 e 150 minutos, respectivamente, para que se atingisse o teor de água de equilíbrio.

São apresentados na, Tabela 4.14 os parâmetros dos modelos Henderson e Pabis, Exponencial Dois Termos, Logarítmico, Page e Newton ajustados aos dados da cinética de secagem em estufa da polpa combinada C₂ (50% noni + 50% umbu), os respectivos coeficientes de determinação (R²) e os desvios quadráticos médios (DQM).

Tabela 4.14 - Parâmetros dos modelos Henderson e Pabis, Exponencial Dois Termos, Logarítmico, Page e Newton, com seus respectivos coeficientes de determinação (R²) e desvios quadráticos médios (DQM) da cinética de secagem da polpa combinada C₂ (50% noni + 50% umbu)

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros			R ²	DQM
		a	k			
Henderson e Pabis	40	1,0635	0,0049		0,9838	0,0486
	50	1,0607	0,0063		0,9810	0,0536
	60	1,0702	0,0086		0,9808	0,0543
	70	1,0780	0,0089		0,9786	0,0571
Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros			R ²	DQM
		a	k			
Exponencial de Dois Termos	40	0,0018	2,4792		0,9760	0,0591
	50	0,0017	3,3969		0,9747	0,0619
	60	0,0016	4,7379		0,9736	0,0637
	70	0,0004	5,8678		0,9717	0,0680
Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros			R ²	DQM
		a	k	c		
Logarítmico	40	1,1849	0,0037	0,1428	0,9929	0,0300
	50	1,1456	0,0051	0,1019	0,9885	0,0418
	60	1,1213	0,0076	0,0621	0,9852	0,0477
	70	1,1412	0,0077	0,0761	0,9842	0,0492
Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros			R ²	DQM
		k	n			
Page	40	0,0006	1,3784		0,9980	0,0174
	50	0,0007	1,4033		0,9960	0,0247
	60	0,0008	1,4722		0,9964	0,0237
	70	0,0018	1,4837		0,9964	0,0236
Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros			R ²	DQM
		k				
Newton	40		0,0045		0,9764	0,0586
	50		0,0058		0,9751	0,0615
	60		0,0079		0,9740	0,0633
	70		0,0081		0,9698	0,0679

Observa-se que o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais foi o de Page, em razão de ter apresentado os maiores valores de R^2 ($> 0,98$) e os menores valores de DQM ($< 0,03$). Consta-se ainda que todos os outros modelos testados (Henderson e Pabis, Exponencial Dois Termos, Logarítmico e Newton) também podem ser usados para estimar as curvas de cinética de secagem da polpa combinada C₂ (50% noni + 50% umbu).

Pê et al. (2016), ao realizarem a modelagem matemática da secagem em camada de espuma de polpa de caqui, obtiveram $R^2 > 0,96$ e desvios quadráticos médios inferiores a 0,01, para os modelos de Page, Logarítmico e Midilli.

Em geral, o parâmetro “k” representa o efeito das condições externas de secagem enquanto os demais parâmetros refletem a resistência interna do produto à secagem para determinadas condições externas como velocidade, temperatura e umidade relativa do ar (BROOKER, 1992). Consta-se que os valores de “k” aumentaram com o aumento da temperatura em todos os modelos avaliados, assim como os valores de “n”, no entanto, os valores de “a” (Exponencial de Dois Termos e Logarítmico) e “c” (Logarítmico) tiveram tendência de redução com o aumento da temperatura. Castro et al. (2016), ao realizarem a descrição matemática da secagem de polpa de taturubá (*Pouteriamacrophylla* (lam. e Eyma.) em camada fina, encontraram o mesmo comportamento para o parâmetro “n” do modelo Page. Silva Filho et al. (2016) ao realizarem a modelagem matemática da cinética de secagem da polpa de manga cv. Espada também observaram que os parâmetros “k” para os modelos de Henderson e Pabis, Logarítmico e Page aumentaram com o aumento da temperatura de secagem.

Dentre os modelos empregados, o de Page foi o que melhor representou os dados experimentais para prever a cinética de secagem das amostras, apresentando os maiores valores para R^2 , acima de 0,99, para todas as temperaturas. Este comportamento também foi observado por Silva et al. (2015), ao realizarem o estudo experimental da secagem de polpa de *Achachairu* em camada fina nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, e por Gonçalves et al. (2016) ao secarem a polpa de banana verde (*Musa acuminata*) em estufa com temperaturas de 55, 65 e 75 °C.

Oliveira et al. (2015), ao analisarem a modelagem matemática das curvas de cinética de secagem de morangos nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C, verificaram que o modelo Logarítmico foi o melhor para estimar as curvas, apresentando coeficientes de determinação entre 0,9993 e 0,9995, valores próximos aos encontrados em nosso estudo para o mesmo modelo.

Na Figura 4.6 estão representados os ajustes do modelo matemático de Page aos dados experimentais da cinética de secagem da polpa combinada C₂ (50% noni + 50% umbu) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C. Este modelo foi considerado como o melhor para estimar as curvas de cinética de secagem da polpa combinada C₂ (50% noni + 50% umbu), verifica-se a proximidade dos dados estimados em relação aos dados experimentais, corroborando com os altos valores de R² e reduzidos DQM.

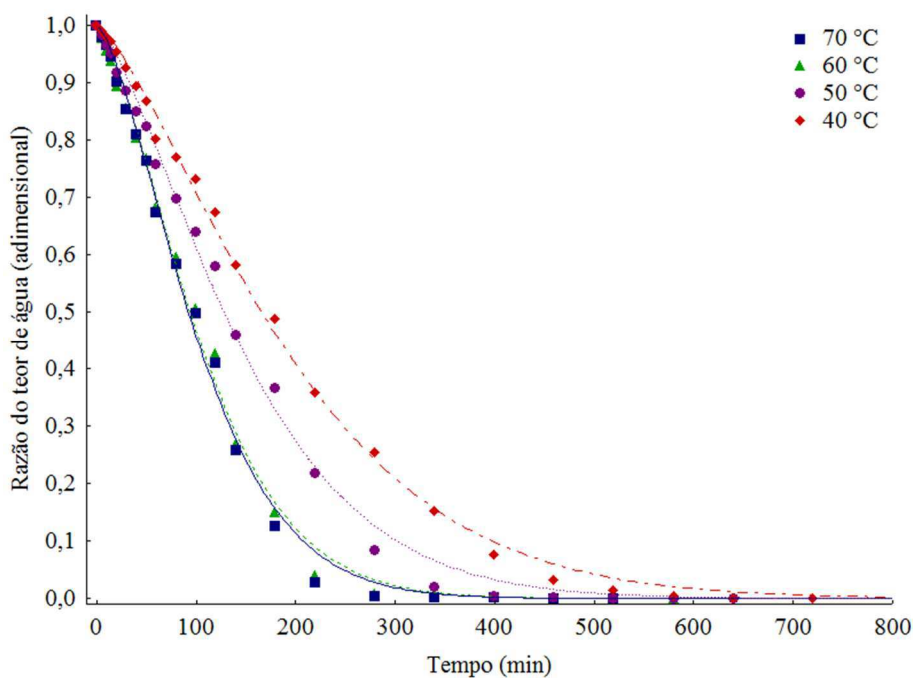


Figura 4.6 – Curvas de cinética de secagem da polpa combinada C₂ (50% noni + 50% umbu) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C com ajustes pelo modelo de Page

No Apêndice A Figuras A.5 a A.8, tem-se a representação gráfica das curvas de cinética de secagem da polpa combinada C₂ com ajustes pelos modelos de Henderson e Pabis, Exponencial Dois Termos, Logarítmico e Newton.

4.3.3 – Secagem da polpa combinada de noni com umbu (C₃)

Verifica-se na Figura 4.7 os dados experimentais da cinética de secagem da polpa combinada C₃ (75% noni + 25% umbu) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, expressos através da razão do teor de água em função do tempo de secagem. A razão do teor de água reduziu rapidamente no início da secagem e, posteriormente, diminuiu lentamente à medida que se aumentou o tempo de secagem. Comportamento também verificado por

Araújo et al. (2017) ao secarem acerola em leito de espuma; por Silva et al. (2017) ao estudarem a cinética de secagem da polpa de cupuaçu; por Alves et al. (2016) na cinética de secagem em camada de espuma da polpa de abacate cv. Quintal; por Nunes et al. (2014) ao realizarem a descrição da cinética de secagem da polpa de jabuticaba; e por Gurgel et al. (2014) ao secarem polpa de graviola pelo processo de secagem em camada de espuma.

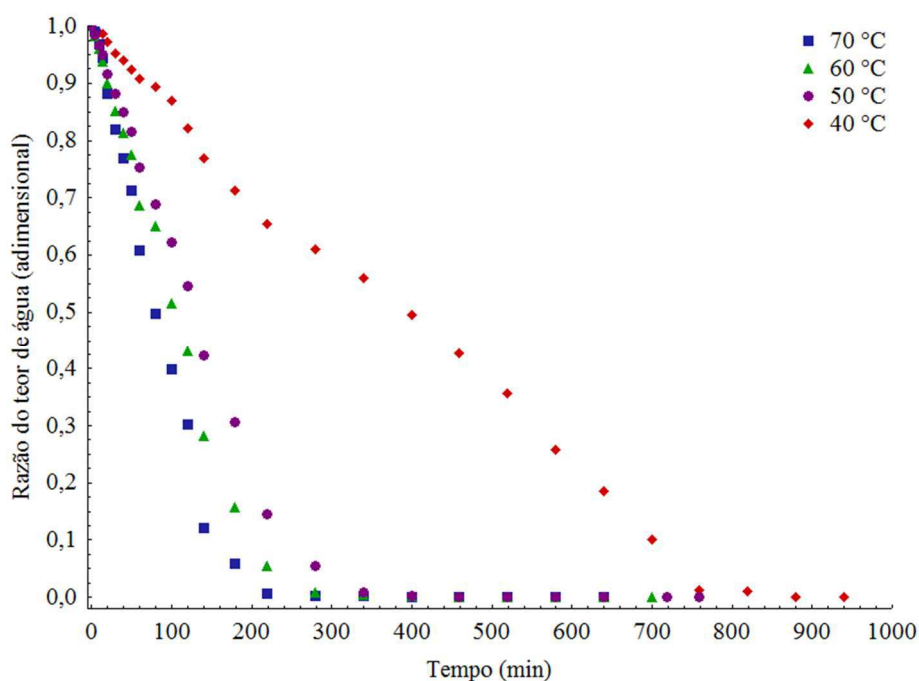


Figura 4.7 – Curvas de cinética de secagem da polpa combinada C₃ (75% noni + 25% umbu) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C

Assim como verificado por Anjos et al. (2015) e por Madureira et al. (2011) as curvas de secagem evidenciam a influência da temperatura. Em todas as condições estudadas, as curvas de secagem apresentaram uma região linear nos primeiros minutos, seguida por um comportamento não linear.

Na Tabela 4.15 tem-se os teores de água de equilíbrio e os tempos de secagem da polpa combinada C₃. As secagens da polpa combinada C₃ (75% noni + 25% umbu) foram procedidas durante 15,66 h (940 min), na temperatura de 40 °C, 12,66 h (760 min), na temperatura de 50 °C, 11,66 h (700 min), na temperatura de 60 °C, e 10,66 h (640 min), na temperatura de 70 °C. O teor de água inicial médio foi de $88,95 \pm 0,52\%$ b.u. (91,87% b.s.). Constata-se que o teor de água de equilíbrio e o tempo de secagem diminuíram com o aumento da temperatura.

Tabela 4.15 – Teores de água e tempos de secagem da polpa combinada C₃ (75% noni + 25% umbu) em diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	Teor de água inicial (% b.u.)	Teor de água final (% b.u.)	Tempo de secagem (min)
40	89,73	13,54	940
50	88,66	8,36	760
60	88,69	4,59	700
70	88,70	3,70	640

Tempos de secagem inferiores ao da polpa C₃ foram verificados por Araújo et al. (2017), ao secarem a polpa de acerola em leito de espuma, em que encontraram tempos de secagem de 510 min para a temperatura de 50 °C, 480 min para a temperatura de 55 °C, 390 min para a temperatura de 60 °C, 360 min para a temperatura de 65 °C e 300 min para a temperatura de 70 °C; e por Alves e Rodovalho (2016) na cinética de secagem em camada de espuma da polpa de abacate, verificando tempos de secagem de 600 min; 580 min; 400 min; e de 280 min, para as temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C, respectivamente.

Comparando-se os tempos de secagem da polpa combinada C₁, C₂ e C₃, verifica-se que os menores tempos de secagem foram encontrados na polpa combinada C₁, que apresenta maior percentual de polpa de umbu, evidenciando que a presença da polpa de noni elevou o tempo de secagem das polpas combinadas. A polpa C₃, com maior concentração de polpa de noni, apresentou os maiores tempos de secagem.

São apresentados na Tabela 4.16 os parâmetros dos modelos matemáticos Henderson e Pabis, Exponencial Dois Termos, Logarítmico, Page e Newton, ajustados aos dados experimentais da cinética de secagem da polpa combinada C₃ (75% noni + 25% umbu) e seus respectivos coeficientes de determinação (R²) e desvios quadráticos médios (DQM).

Observa-se que o modelo matemático de Page foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais da secagem da polpa combinada C₃, apresentando os maiores valores dos coeficientes de determinação (R²) e os menores valores de DQM, exceto na temperatura de 40 °C, para a qual o melhor modelo foi o Logarítmico.

Os modelos matemáticos de Logarítmico, Henderson e Pabis e Newton também resultaram em bons ajustes aos dados experimentais para a faixa de temperatura estudada, com R² superiores a 0,95 e DQM inferiores a 0,07.

Tabela 4.16 - Parâmetros dos modelos Henderson e Pabis, Exponencial Dois Termos, Logarítmico, Page e Newton, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM) da cinética de secagem da polpa combinada C₃ (75% noni + 25% umbu)

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros			R^2	DQM
		a	k			
Henderson e Pabis	40	1,0474	0,0024		0,9632	0,0690
	50	1,0669	0,0068		0,9822	0,0536
	60	1,0711	0,0084		0,9814	0,0544
	70	1,0882	0,0109		0,9826	0,0525
Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros			R^2	DQM
		a	k			
Exponencial de Dois Termos	40	0,0011	2,0566		0,9573	0,0744
	50	0,0025	2,4629		0,9755	0,0628
	60	0,0016	4,6642		0,9747	0,0634
	70	0,0017	5,7153		0,9734	0,0650
Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros			R^2	DQM
		a	k	c		
Logarítmico	40	1,9804	0,0008	-0,9773	0,9941	0,0276
	50	1,1132	0,0061	-0,0568	0,9862	0,0472
	60	1,1078	0,0077	-0,0447	0,9844	0,0498
	70	1,1174	0,0101	-0,0355	0,9848	0,0491
Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros			R^2	DQM
		k	n			
Page	40	0,0003	1,3222		0,9815	0,0489
	50	0,0007	1,4428		0,9968	0,0228
	60	0,0008	1,4697		0,9962	0,0246
	70	0,0010	1,5024		0,9968	0,0224
Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros			R^2	DQM
		k				
Newton	40		0,0021		0,9576	0,0742
	50		0,0062		0,9761	0,0620
	60		0,0077		0,9750	0,0630
	70		0,0097		0,9737	0,0645

Oliveira et al. (2015), ao realizarem a modelagem matemática da secagem de morangos nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C, encontraram para todas as temperaturas

avaliadas valores de R^2 maiores que 0,99 para os modelos de Page, Dois Termos e Logarítmico.

Observa-se que o parâmetro “k” do modelo de Henderson e Pabis, Exponencial Dois Termos, Logarítmico, Page e Newton, assim como o parâmetro “a” dos modelos Henderson e Pabis e Exponencial Dois Termos, apresentou tendência de aumento com o aumento da temperatura. O parâmetro “k” é uma aproximação do efeito da temperatura na secagem e valores elevados de temperatura facilitam o processo de secagem por diminuir a energia necessária para remover moléculas de água ligadas ao produto (OLIVEIRA et al., 2015). Analisando a influência da temperatura sobre a cinética de secagem de maçã cv. Fuji, Santos Júnior et al. (2018) observaram uma tendência de aumento no valor do parâmetro “k” em resposta à elevação da temperatura. Silva Filho et al. (2016) também observaram o mesmo comportamento para o parâmetro “k” nos modelos de Henderson e Pabis e Logarítmico na cinética de secagem de polpa de manga cv. Espada.

Na Figura 4.8 são apresentadas as curvas geradas pelos ajustes do modelo matemático de Page aos dados experimentais da polpa combinada C₃ (75% noni + 25% umbu) para as temperaturas de secagem de 40, 50, 60 e 70 °C.

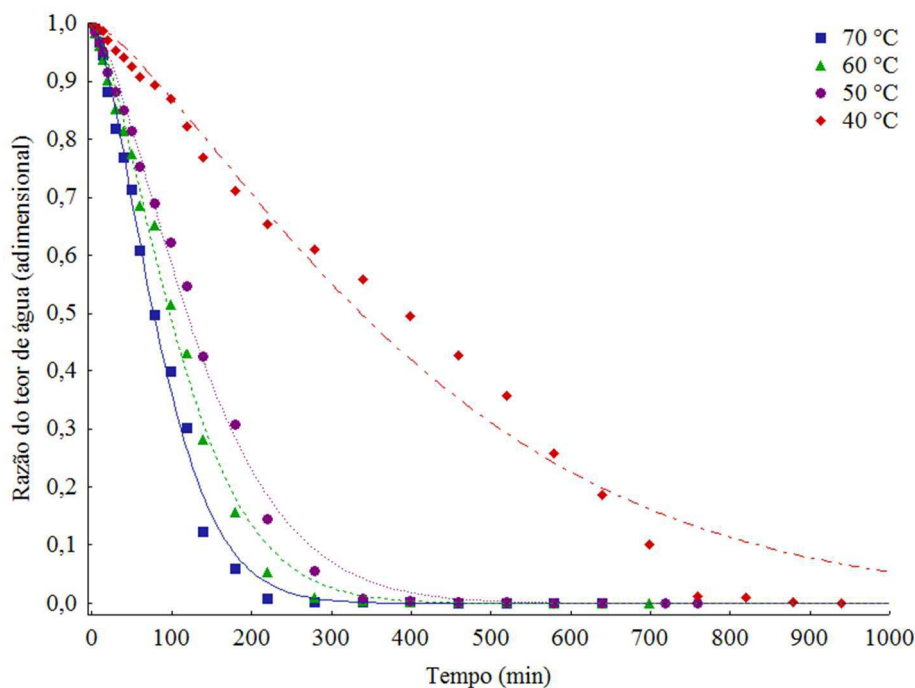


Figura 4.8 – Curvas de cinética de secagem da polpa combinada C₃ (75% noni + 25% umbu) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C com ajustes pelo modelo de Page

Conforme o conjunto de valores dos R^2 e DQM, este modelo matemático foi o melhor para estimar as curvas de cinética de secagem da polpa combinada C_3 . Observa-se que as curvas ajustadas com o modelo de Page estão muito próximas dos dados experimentais, como ficou demonstrado pelos maiores valores de R^2 e menores DQM.

No Apêndice A, Figuras A.9 a A.12, tem-se a representação gráfica dos ajustes dos modelos de Henderson e Pabis, Exponencial Dois Termos, Logarítmico e Newton, aos dados experimentais da polpa combinada C_3 .

4.4 – Isotermas de adsorção de água

4.4.1 – Isotermas de adsorção de água dos pós da polpa combinada de noni com umbu (C_1)

Na Tabela 4.17 estão apresentados os parâmetros dos modelos de GAB, Oswin, Halsey e Smith, ajustados aos dados das isotermas de adsorção de água, a 20, 30 e 40 °C, do pó da polpa combinada C_1 (25% noni + 75% umbu) seca nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C. Os modelos avaliados apresentaram bons ajustes, com $R^2 > 0,88$ e $P < 7\%$, podendo ser utilizados para estimar as isotermas de adsorção dos pós da polpa combinada C_1 . Dentre estes, o modelo de GAB e de Halsey apresentaram os maiores coeficientes de determinação (R^2) e os menores desvios percentuais médios (P), sendo os mais indicados na estimativa das isotermas.

Assim como determinado neste estudo, Moreira et al. (2013) verificaram para as isotermas de adsorção de água do pó da polpa de manga liofilizada, a 25, 30 e 35 °C, que o modelo de GAB foi o que melhor representou as isotermas das amostras, apresentando os menores valores de desvios percentuais médios e mais altos coeficientes de determinação.

Constata-se que o valor do parâmetro X_m do modelo de GAB, que representa o teor de água na monocamada do material adsorvente, variou entre 13,4915 a 26,8084% b.s. e não apresentou tendência definida em relação ao aumento da temperatura da isoterma.

O parâmetro K que, segundo Catelam et al. (2011), representa uma medida das interações entre as moléculas do adsorvato com o adsorvente, teve pequeno decréscimo com o aumento da temperatura da isoterma, exceto para o pó obtido a 70 °C, que aumentou. Quanto ao valor de C , constante relacionada ao calor de sorção da camada molecular, observou-se que o aumento da temperatura de 20 para 40 °C provocou uma redução neste valor e, de acordo com Santos et al. (2014), variações no valor dessa

constante pode estar relacionado às mudanças irreversíveis associadas ao aumento da temperatura como reações enzimáticas e desnaturação de proteínas.

Tabela 4.17 - Parâmetros dos modelos GAB, Oswin, Halsey e Smith ajustados as isotermas de adsorção de água dos pós da polpa combinada C₁, obtidos em diferentes temperaturas, com seus respectivos coeficientes de determinação (R²) e desvios percentuais médios (P)

Modelos	Temp. de secagem (°C)	Parâmetros	Temperatura da isoterma (°C)		
			20	30	40
GAB	40	X _m	24,0772	26,8084	26,2813
		C	2064,28	2191,44	2125,09
		K	0,7589	0,6641	0,6386
		R ²	0,9907	0,9842	0,9680
		P (%)	1,04	2,34	3,61
	50	X _m	25,6959	24,8370	26,6780
		C	2265,66	2059,22	2214,40
		K	0,7083	0,6995	0,6023
		R ²	0,9898	0,9900	0,9408
		P (%)	1,14	2,12	4,36
	60	X _m	19,7333	22,8954	14,8327
		C	6844,37	1943,95	1169,07
		K	0,7700	0,7424	0,7336
		R ²	0,9781	0,9798	0,9459
		P (%)	2,71	2,55	6,82
	70	X _m	20,6139	21,4830	13,4915
		C	1925,34	1863,45	1300,56
		K	0,7360	0,7648	0,8848
		R ²	0,9848	0,9940	0,9731
		P (%)	1,82	2,03	4,24
Oswin	40	a	38,7841	40,7467	39,0551
		b	0,3307	0,2356	0,2206
		R ²	0,9890	0,9732	0,9521
		P (%)	1,20	2,82	4,45
	50	a	39,9362	38,7511	38,4745
		b	0,2860	0,2636	0,2028
		R ²	0,9879	0,9843	0,9234
		P (%)	1,21	2,44	5,03
	60	a	32,6492	37,0420	23,6119
		b	0,3185	0,2965	0,2961
		R ²	0,9639	0,9727	0,9467
		P (%)	3,35	3,08	6,59
	70	a	33,1780	35,7824	25,0507
		b	0,2854	0,3078	0,4054
		R ²	0,9742	0,9904	0,9872
		P (%)	2,51	2,26	3,12

Halsey	40	a	7177,8	29681,21	18090,5
		b	2,5193	2,9032	2,8126
		R ²	0,9931	0,9822	0,9531
		P (%)	1,02	3,34	4,96
	50	a	25786,1	21491,1	23240,6
		b	2,8506	2,8428	2,8966
		R ²	0,9929	0,9865	0,9380
		P (%)	1,19	3,45	5,94
	60	a	5133,05	5957,86	370,99
		b	2,5576	2,5244	2,0271
		R ²	0,9781	0,9815	0,9509
		P (%)	3,37	3,43	6,24
70	a	6823,30	4164,86	1458,19	
	b	2,6346	2,4472	1,6780	
	R ²	0,9875	0,9913	0,9927	
	P (%)	3,34	3,73	2,92	
Smith	40	a	21,9270	27,6611	27,6860
		b	24,4254	17,9596	15,7449
		R ²	0,9900	0,9655	0,9360
		P (%)	1,12	3,34	5,15
	50	a	25,0973	24,9809	28,3356
		b	21,3874	19,2628	14,0570
		R ²	0,9913	0,9844	0,8954
		P (%)	1,04	2,53	5,88
	60	a	18,4905	21,7391	13,5944
		b	20,1391	21,3632	13,8024
		R ²	0,9730	0,9756	0,9399
		P (%)	2,92	2,76	6,80
70	a	19,7132	19,9519	10,0207	
	b	18,8374	21,8404	21,1305	
	R ²	0,9836	0,9930	0,9889	
	P (%)	1,96	2,11	2,53	

Analisando-se os valores de K e C do modelo de GAB, verifica-se que as isotermas de adsorção de água dos pós da polpa combinada C₁ possuem formato sigmoidal, características de curvas classificadas como tipo II, em razão de terem apresentado $0 < K \leq 1$ e $C > 2$ (BLAHOVEC, 2004). A mesma forma de isotermas foi obtida por Muzaffar et al. (2016) para as isotermas de adsorção, nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C, do pó de polpa de tamarindo seco por atomização.

Na Figura 4.9 tem-se as isotermas de adsorção de água, a 20, 30 e 40 °C, dos pós da polpa combinada C₁ (25% noni + 75% umbu) seca nas temperaturas do ar de secagem de 40, 50, 60 e 70 °C, com ajustes pelo modelo de GAB.

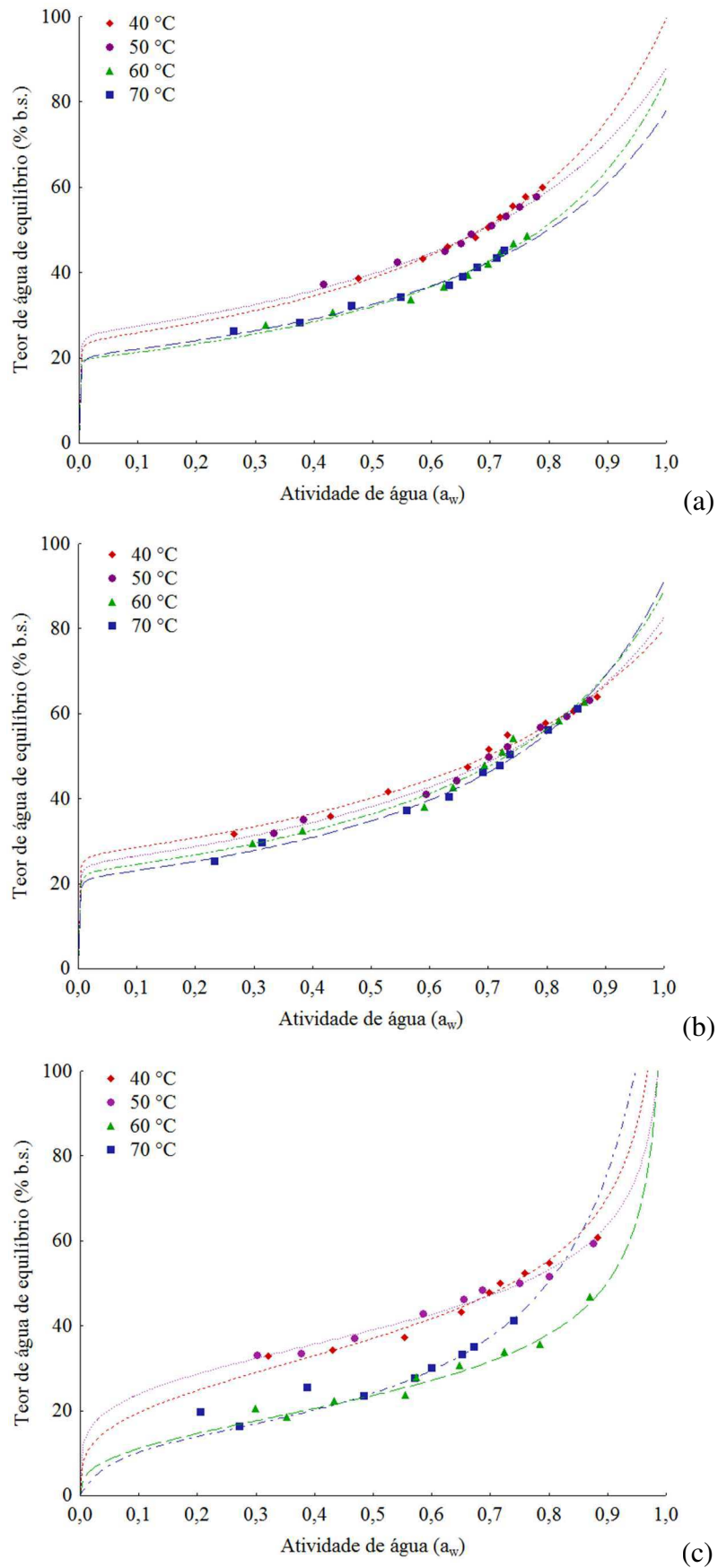


Figura 4.9 – Isotermas de adsorção de água estimadas pelo modelo de GAB, dos pós da polpa combinada C₁ nas temperaturas de: (a) 20 °C; (b) 30 °C; e (c) 40 °C

Observa-se que as isotermas dos pós produzidos nas temperaturas de 40 e 50 °C ficaram muito próximas nas temperaturas das isotermas de 20, 30 e 40 °C e comportamento semelhante ocorreu com as isotermas dos pós produzidos a 60 e 70 °C. Nota-se que as isotermas dos pós das temperaturas de secagem de 40 e 50 °C são mais higroscópicas do que os das temperaturas de 60 e 70 °C.

Geralmente, com o aumento da temperatura da isoterma, ocorre um aumento da pressão de vapor na superfície do produto, o que implica em maior perda de água, para que atinja o equilíbrio (FERREIRA e PENA, 2003; CAMPOS et al., 2009).

4.4.2 – Isotermas de adsorção de água dos pós da polpa combinada de noni com umbu (C₂)

Estão apresentados na Tabela 4.18 os parâmetros dos modelos de GAB, Oswin, Halsey e Smith ajustados às isotermas de adsorção de água, a 20, 30 e 40 °C, dos pós da polpa combinada C₂ (50% noni + 50% umbu) secas nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C. Os modelos avaliados apresentaram bons ajustes, com $R^2 > 0,89$ e $P < 8\%$, sendo indicados para estimar as isotermas dos pós da polpa combinada C₂. Dentre estes modelos, os modelos de GAB e Halsey apresentaram os melhores ajustes na maioria dos casos.

Bezerra et al. (2011), ao analisarem o comportamento das isotermas de adsorção de água dos pós das polpas de manga cv. Rosa e cv. Tommy Atkins também constataram que o modelo de GAB foi o que melhor se ajustou às isotermas de adsorção, com os maiores valores para o coeficiente de determinação (R^2) e os menores desvios percentuais médios (P).

Constata-se que os valores de X_m , teor de água na monocamada do modelo de GAB variaram entre 22,7679 a 30,0266% b.s., com alguns valores superiores aos dos pós C₁. A estimativa desses valores é importante, uma vez que a deterioração de produtos alimentícios é muito pequena quando são armazenadas com teor de água abaixo dos valores da monocamada (X_m) (FERREIRA, 2017).

As isotermas de sorção de alimentos que possuem elevadas concentrações de açúcar, como a maior parte das frutas, geralmente se assemelham às isotermas do tipo II e do tipo III (OLIVEIRA et al., 2013). De acordo com a classificação de Blahovec (2004), as curvas obtidas para os pós da polpa combinada C₂ são classificadas como Tipo II, onde os valores de K e C do modelo de GAB apresentam intervalos de $0 < K \leq 1$ e $C > 2$, respectivamente. Este tipo de curva também foi observado por Braune et al. (2012), ao

estudarem o comportamento higroscópico de polpa da amora preta (*Rubus ssp*) liofilizada. Analisando-se os valores de K e C do modelo de GAB, verifica-se que as isotermas de adsorção de água dos pós da polpa combinada C₂ são classificadas como Tipo II, em razão de terem apresentado $0 < K \leq 1$ e $C > 2$ (BLAHOVEC, 2004).

Tabela 4.18 - Parâmetros dos modelos GAB, Oswin, Halsey e Smith ajustados as isotermas de adsorção de água dos pós da polpa combinada C₂, obtidos em diferentes temperaturas, com seus respectivos coeficientes de determinação (R²) e desvios percentuais médios (P)

Modelos	Temp. de secagem (°C)	Parâmetros	Temperatura da isoterma (°C)		
			20	30	40
GAB	40	Xm	29,2391	24,6592	25,1707
		C	2591,71	2006,91	2063,26
		K	0,6202	0,6747	0,6498
		R ²	0,9686	0,9824	0,9822
		P (%)	2,40	2,62	2,53
	50	Xm	29,6963	24,0786	25,5540
		C	2758,66	2067,83	2130,52
		K	0,5581	0,7055	0,6265
		R ²	0,9589	0,9814	0,9814
		P (%)	2,38	2,64	2,56
	60	Xm	30,0266	23,2453	24,5898
		C	2854,36	2062,44	1897,53
		K	0,5193	0,7346	0,6401
		R ²	0,9267	0,9584	0,9726
		P (%)	2,99	4,21	3,25
	70	Xm	29,3887	22,7679	22,8207
		C	2884,06	2103,04	1960,84
		K	0,5279	0,7397	0,7453
		R ²	0,9241	0,9533	0,9601
		P (%)	3,17	4,25	3,70
Oswin	40	A	42,7180	37,7866	37,7149
		B	0,2174	0,2435	0,2293
		R ²	0,9571	0,9735	0,9761
		P (%)	2,85	3,06	2,86
		50	A	41,4996	37,8636
	B		0,1829	0,2694	0,2182
	R ²		0,9527	0,9782	0,9764
	P (%)		2,51	2,79	2,94
	60		A	40,8591	37,5777
		B	0,1627	0,2879	0,2263
		R ²	0,9170	0,9514	0,9733
		P (%)	3,10	4,41	3,25
		70	A	40,2894	37,1114

		B	0,1651	0,2858	0,2902
		R ²	0,9088	0,9461	0,9665
		P (%)	3,34	4,40	3,16
Halsey	40	a	298371,1	276311,9	244609,0
		b	3,4649	2,9396	2,9126
		R ²	0,9588	0,9805	0,9675
		P (%)	5,05	4,13	4,30
	50	a	509162,3	183538,1	378685,0
		b	4,2523	2,8164	3,0356
		R ²	0,9618	0,9778	0,9705
		P (%)	5,13	4,92	4,60
	60	a	384838,8	6415,49	192566,3
		b	3,0939	2,5355	2,8694
		R ²	0,9808	0,9542	0,9635
		P (%)	5,43	6,89	5,16
70	a	320283,3	6013,84	3785,32	
	b	3,0502	2,5269	2,3941	
	R ²	0,9876	0,9607	0,9775	
	P (%)	4,75	7,28	4,66	
Smith	40	a	30,7607	25,4232	26,2295
		b	16,9374	17,1487	15,9196
		R ²	0,9618	0,9697	0,9653
		P (%)	2,60	3,15	3,48
	50	a	31,5788	23,7790	26,5351
		b	13,8487	19,5160	15,1341
		R ²	0,9647	0,9805	0,9601
		P (%)	2,17	2,81	3,81
	60	a	31,8158	22,2283	25,0270
		b	12,3982	21,1971	15,6742
		R ²	0,9381	0,9554	0,9555
		P (%)	2,64	4,32	4,19
70	a	30,9004	21,6714	21,3671	
	b	12,7429	21,1550	21,8894	
	R ²	0,9324	0,9506	0,9623	
	P (%)	2,89	4,32	3,48	

Na Figura 4.10 tem-se as isotermas de adsorção de água, a 20, 30 e 40 °C, dos pós da polpa combinada C₂ (50% noni + 50% umbu) seca nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, com ajustes pelo modelo de GAB. Verifica-se que as isotermas dos pós produzidos nas temperaturas de 40 e 50 °C ficaram muito próximas na temperatura da isotermas de 20 °C (Figura 4.10a); nas temperaturas das isotermas de 30 °C (Figura 4.10b) e 40 °C (Figura 4.10c) praticamente não se observam diferenças entre as isotermas dos diferentes pós.

Nota-se que as isotermas possuem forma sigmoidal, características de curvas do tipo II, seguindo a classificação de BET, considerada padrão para produtos agrícolas (BRUNAUER et al., 1938).

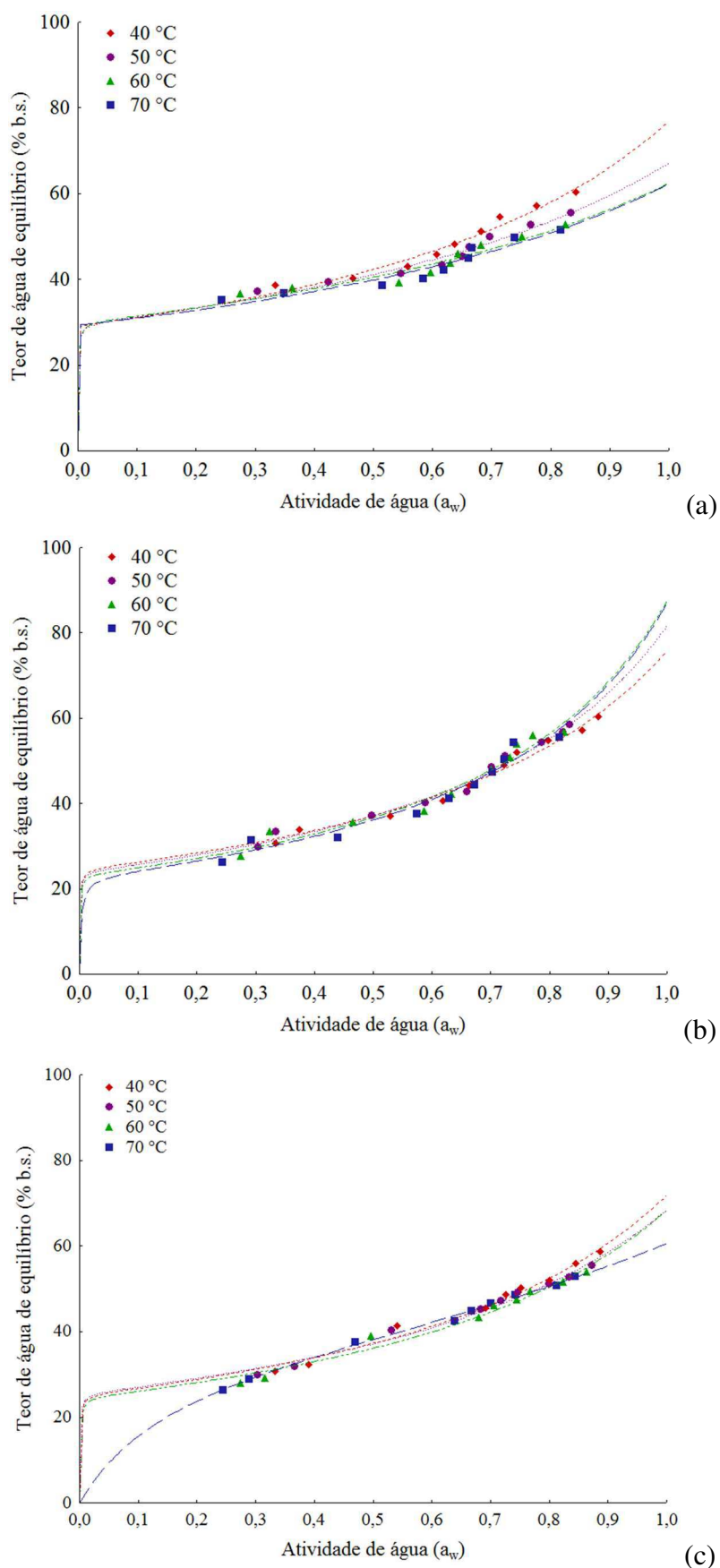


Figura 4.10 – Isotermas de adsorção de água estimadas pelo modelo de GAB, dos pós da polpa combinada C₂ nas temperaturas de: (a) 20 °C; (b) 30 °C; e (c) 40 °C

4.4.3 – Isotermas de adsorção de água dos pós da polpa combinada de noni com umbu (C₃)

Na Tabela 4.19 tem-se os parâmetros dos modelos de GAB, Oswin, Halsey e Smith ajustados às isotermas de adsorção de água, a 20, 30 e 40 °C, dos pós da polpa combinada C₃ (75% noni + 25% umbu) seca nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C. Os modelos avaliados apresentaram bons ajustes com $R^2 > 0,91$ e $P < 8\%$, podendo ser utilizados para prever as isotermas de adsorção de água dos pós C₃. Dentre estes modelos, na maioria dos casos, o modelo de GAB apresentou os melhores ajustes, sendo este modelo o mais indicado na estimativa das isotermas dessas amostras.

Tabela 4.19 - Parâmetros dos modelos GAB, Oswin, Halsey e Smith ajustados as isotermas de adsorção de água dos pós da polpa combinada C₃, obtidos em diferentes temperaturas, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios percentuais médios (P)

Modelos	Temp. de secagem (°C)	Parâmetros	Temperatura da isoterma (°C)		
			20	30	40
GAB	40	Xm	31,2580	24,0719	23,0994
		C	2721,87	1836,57	6027,21
		K	0,4976	0,6359	0,6762
		R^2	0,9847	0,9718	0,9782
		P (%)	1,35	2,75	2,88
	50	Xm	29,6800	20,3705	21,5727
		C	2493,97	1642,78	1682,49
		K	0,4926	0,7396	0,7114
		R^2	0,9785	0,9635	0,9864
		P (%)	1,42	3,99	2,27
	60	Xm	26,3391	18,8265	17,9366
		C	2336,36	1565,12	9747,6
		K	0,5529	0,7860	0,7806
		R^2	0,9437	0,9624	0,9542
		P (%)	2,82	4,58	5,39
	70	Xm	24,6630	16,3758	16,7504
		C	2276,07	1413,74	2442,67
		K	0,5949	0,8157	0,7703
		R^2	0,9362	0,9526	0,9631
		P (%)	3,10	5,02	4,33
Oswin	40	a	41,9016	35,8400	35,7337
		b	0,1490	0,2172	0,2373
		R^2	0,9717	0,9773	0,9768
		P (%)	1,72	2,58	3,02

	50	a	39,5636	33,2149	34,2563
		b	0,1521	0,2866	0,2674
		R ²	0,9763	0,9532	0,9835
		P (%)	1,60	4,78	2,72
	60	a	36,6817	32,2054	30,7053
		b	0,1804	0,3160	0,3056
		R ²	0,9334	0,9428	0,9257
		P (%)	3,07	6,33	7,11
	70	a	35,5346	28,8044	28,2112
		b	0,1968	0,3367	0,3001
		R ²	0,9201	0,9244	0,9390
		P (%)	3,55	6,76	5,93
Halsey	40	a	2966381	460167,0	111776,7
		b	4,1136	3,7554	3,3677
		R ²	0,9559	0,9827	0,9847
		P (%)	3,93	4,87	4,24
	50	a	7479626	18381,83	25010,38
		b	5,0394	2,9174	2,9812
		R ²	0,9826	0,9679	0,9877
		P (%)	3,54	5,50	4,03
	60	a	1061054	5038,84	8534,55
		b	3,9682	2,5751	2,7622
		R ²	0,9418	0,9641	0,9402
		P (%)	6,95	6,67	8,82
70	a	305100,7	1776,25	3996,15	
	b	3,6549	2,3505	2,6096	
	R ²	0,9386	0,9401	0,9563	
	P (%)	7,72	7,99	6,92	
Smith	40	a	34,3540	25,4143	24,1661
		b	10,6890	14,2871	15,8288
		R ²	0,9642	0,9846	0,9816
		P (%)	1,72	2,35	2,58
	50	a	31,6980	20,0494	21,5338
		b	10,8417	18,3304	17,5303
		R ²	0,9801	0,9645	0,9894
		P (%)	1,45	3,81	2,10
	60	a	27,5722	17,7554	17,4759
		b	12,5226	20,0947	18,3934
		R ²	0,9408	0,9553	0,9454
		P (%)	2,72	5,21	5,88
70	a	25,3108	14,9237	15,9598	
	b	13,9512	19,3916	16,8962	
	R ²	0,9408	0,9391	0,9564	
	P (%)	2,95	5,71	4,59	

Bezerra et al. (2010) estudaram o comportamento das isotermas de adsorção de água dos pós da manga cv. Coité e cv. Espada, verificando que o modelo de GAB foi o que melhor se ajustou às isotermas de adsorção, apresentando os maiores R² e os menores P.

Constata-se que os valores de X_m de GAB variaram entre 16,3758 e 31,2580% b.s., apresentando o maior valor de X_m (31,2580% b.s.) dentre todos os pós. Nota-se que houve tendência de redução de X_m com o aumento da temperatura da isoterma para uma mesma amostra.

Na Figura 4.11 tem-se as isotermas de adsorção de água, a 20, 30 e 40 °C, dos pós da polpa combinada C₃ seca nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, com ajustes pelo modelo de GAB. Observa-se que as isotermas dos pós produzidos nas temperaturas de 40 e 50 °C ficaram muito próximas nas temperaturas das isotermas de 20, 30 e 40 °C, comportamento semelhante ocorreu com as isotermas dos pós produzidos a 60 e 70 °C. Nota-se que as isotermas dos pós das temperaturas de secagem de 40 e 50 °C são mais higroscópicas do que os das temperaturas de 60 e 70 °C.

Segundo Kechaou e Maalej (1999), geralmente ocorre a redução da higroscopicidade da amostra com o aumento da temperatura da isoterma, o que depende das propriedades físicas e químicas do alimento.

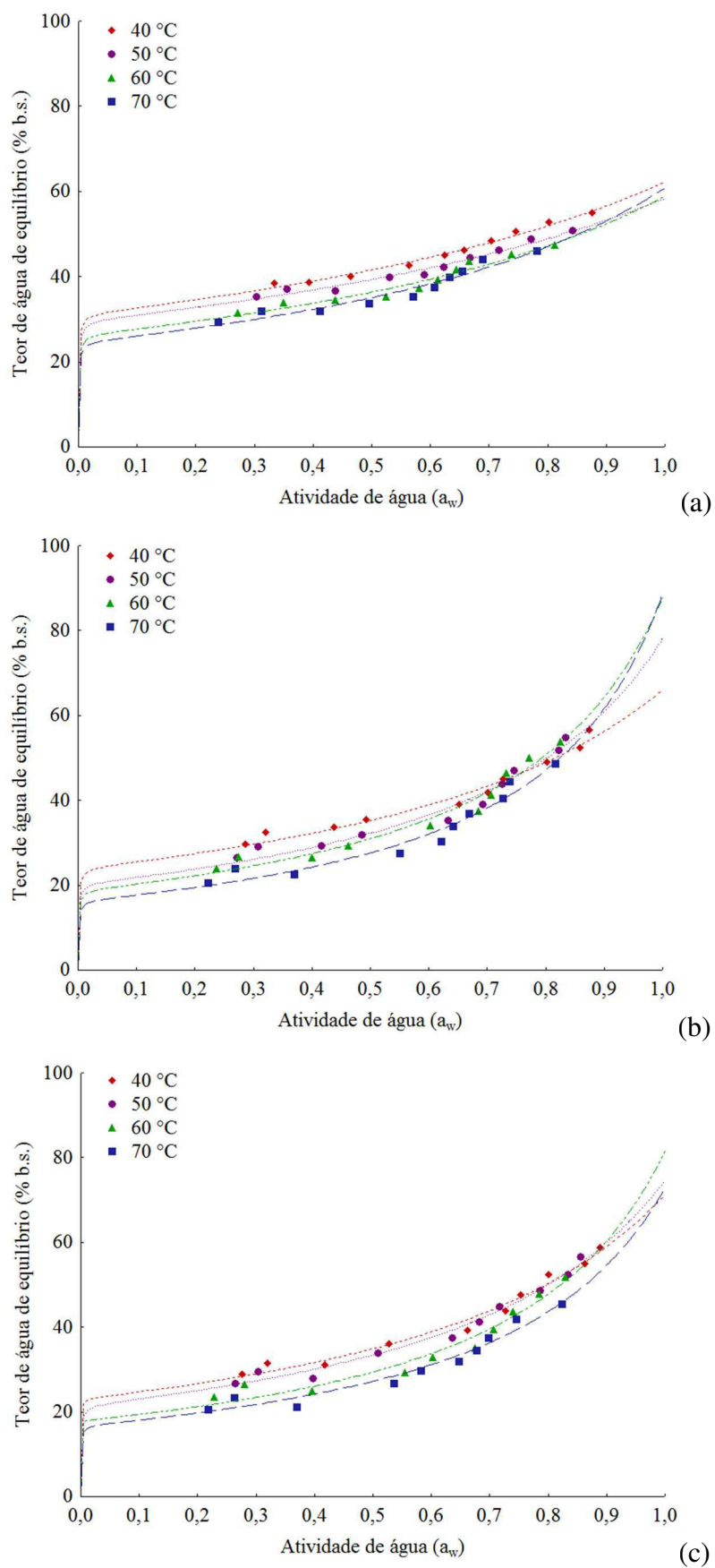


Figura 4.11 – Isothermas de adsorção de água estimadas pelo modelo de GAB, dos pós da polpa combinada C₃ nas temperaturas de: (a) 20 °C; (b) 30 °C; e (c) 40 °C

4.5 – Calor isostérico

Tendo em vista ter proporcionado, na maioria dos casos, os melhores ajustes, o modelo de GAB foi utilizado para a determinação dos valores de atividade de água (a_w) na análise do calor isostérico de sorção dos pós das polpas combinadas C_1 , C_2 e C_3 . A partir dos valores de $\ln(a_w)$ estão representadas as curvas do logaritmo neperiano da atividade de água dos combinados de polpa de noni e umbu nas diferentes proporções em função do inverso da temperatura absoluta ($1/T$) para os teores de água de equilíbrio (% b.s.).

4.5.1 – Calor isostérico do pó da polpa combinada de noni com umbu (C_1)

Das Figuras 4.12 a 4.15 estão representadas as curvas do logaritmo neperiano da atividade de água (a_w) do pó da polpa combinada C_1 (25% noni + 75% umbu) seca nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, em função do inverso da temperatura absoluta ($1/T$, K^{-1}) para diferentes teores de água de equilíbrio (% b.s.).

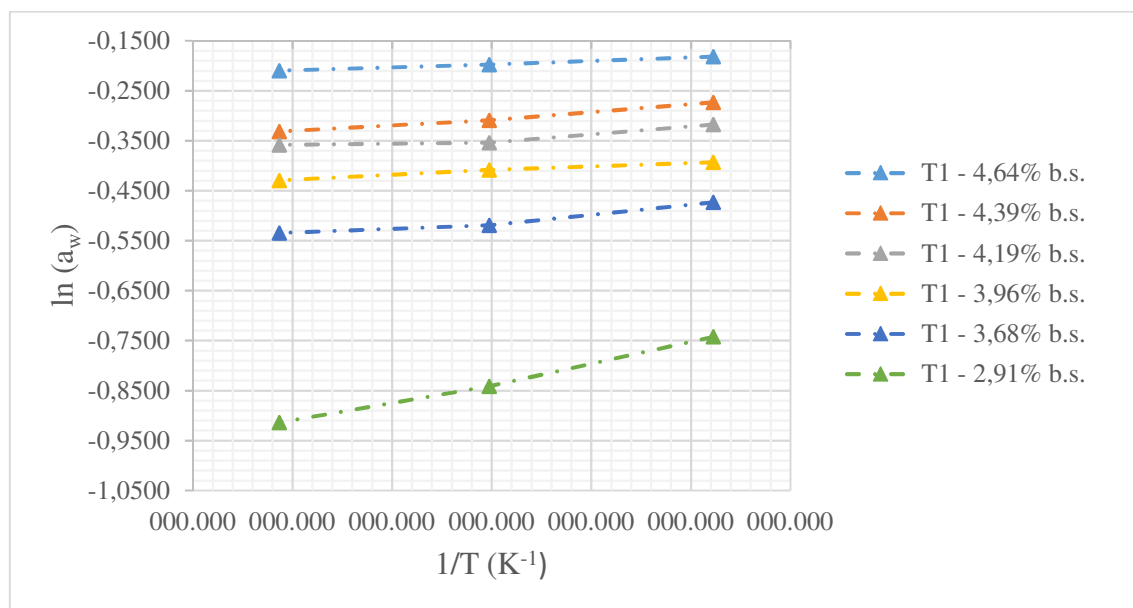


Figura 4.12 – Valores de $\ln(a_w)$ em função do inverso da temperatura absoluta, para diferentes teores de água de equilíbrio (% b.s.) para o pó da polpa combinada C_1 (25% noni + 75% umbu) seca em estufa a 40 °C

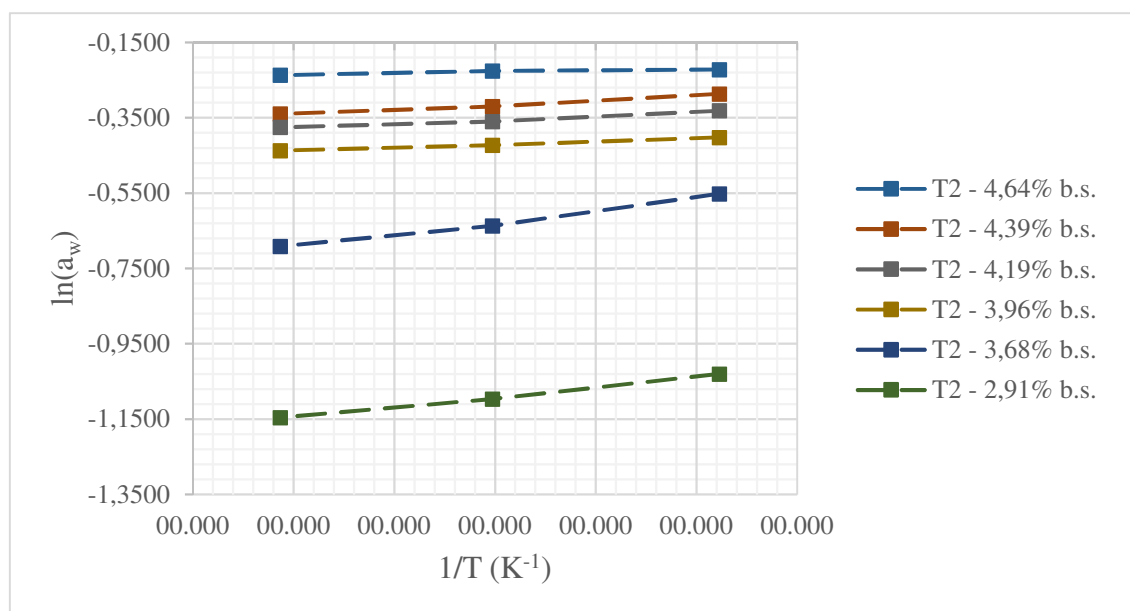


Figura 4.13 – Valores de $\ln(a_w)$ em função do inverso da temperatura absoluta, para diferentes teores de água de equilíbrio (% b.s.) para o pó da polpa combinada C₁ (25% noni + 75% umbu) seca em estufa a 50 °C

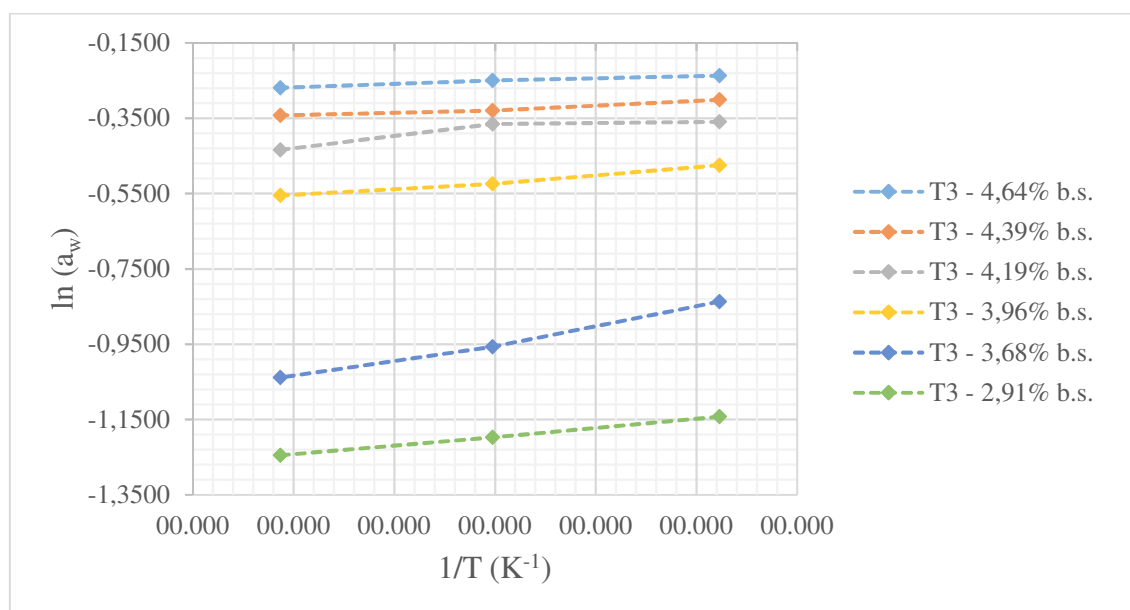


Figura 4.14 – Valores de $\ln(a_w)$ em função do inverso da temperatura absoluta, para diferentes teores de água de equilíbrio (% b.s.) para o pó da polpa combinada C₁ (25% noni + 75% umbu) seca em estufa a 60 °C

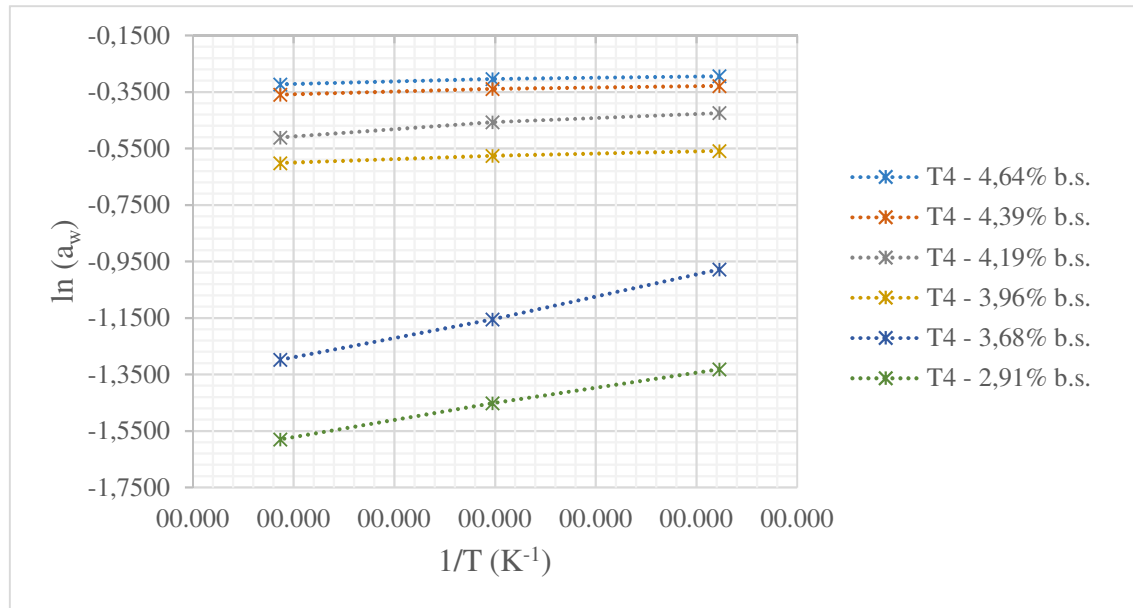


Figura 4.15 – Valores de $\ln(a_w)$ em função do inverso da temperatura absoluta, para diferentes teores de água de equilíbrio (% b.s.) para o pó da polpa combinada C₁ (25% noni + 75% umbu) seca em estufa a 70 °C

Os valores do calor isostérico líquido (q_{st}) e integral de sorção (Q_{st}) obtidos, respectivamente, a partir do coeficiente angular e do calor latente de vaporização, estão expostos na Tabela 4.20. Para este cálculo, levou-se em conta a temperatura média utilizada no trabalho, que foi de 30 °C, o que resultou em um valor de entalpia de vaporização de 2430,5 kJ kg⁻¹.

A partir dos dados, é possível verificar que os valores de calor isostérico integral de sorção para teores de água de equilíbrio de 2,91 a 4,64% (b.s.) variaram de 3109,52 a 2462,30 kJ kg⁻¹, apresentando redução com o aumento do teor de água de equilíbrio. Silva et al. (2017) explicaram que esse fenômeno ocorre em razão de que, quanto menor a quantidade de água contida no produto, maior é a quantidade de energia para retirar essa água do produto. Ramos et al. (2017), avaliando o amido de quinoa com teores de água de equilíbrio de 0,5; 5; 10; 20 e 30%, encontraram valores do calor isostérico de adsorção de 3731,7; 3050,0; 2867,1; 2646,6 e 2515,3 kJ kg⁻¹, respectivamente, indicando, também, redução com o aumento do teor de água.

Tabela 4.20 – Valores do calor isostérico líquido (q_{st}) e calor isostérico integral de sorção (Q_{st}) para diferentes teores de água de equilíbrio do pó da polpa combinada C₁ (25% noni + 75% umbu) seca em estufa a 40, 50, 60 e 70 °C

Temp. secagem (°C)	Teor de água de equilíbrio (% b.s.)	Equação da reta	q_{st} (kJ kg ⁻¹)	Q_{st} (kJ kg ⁻¹)
40	2,91	$y = 788,07x - 3,4341$	363,90	2794,40
	3,68	$y = 282,48x - 1,4414$	130,44	2560,94
	3,96	$y = 267,59x - 1,1879$	123,56	2554,06
	4,19	$y = 188,14x - 0,9642$	86,88	2517,38
	4,39	$y = 165,79x - 0,9574$	75,56	2507,06
	4,64	$y = 128,49x - 0,6202$	59,33	2489,83
50	2,91	$y = 641,63x - 2,7446$	296,28	2726,78
	3,68	$y = 531,68x - 2,8459$	245,51	2676,01
	3,96	$y = 245,41x - 1,1255$	113,32	2543,82
	4,19	$y = 203,13x - 1,0260$	93,80	2524,30
	4,39	$y = 160,89x - 0,9518$	74,29	2504,79
	4,64	$y = 68,87x - 0,4555$	31,80	2462,30
60	2,91	$y = 926,23x - 4,0018$	427,70	2858,20
	3,68	$y = 469,44x - 2,7445$	216,77	2647,27
	3,96	$y = 369,43x - 1,7376$	170,59	2601,09
	4,19	$y = 337,87x - 1,5016$	156,01	2586,51
	4,39	$y = 190,71x - 0,9540$	88,06	2518,56
	4,64	$y = 147,4x - 0,7386$	68,06	2498,56
70	2,91	$y = 1470,5x - 5,9982$	679,02	3109,52
	3,68	$y = 1137,9x - 5,2110$	525,44	2955,94
	3,96	$y = 394,36x - 1,7661$	182,10	2612,60
	4,19	$y = 196,29x - 1,2268$	90,64	2521,14
	4,39	$y = 141,95x - 0,8112$	65,55	2496,05
	4,64	$y = 130,70x - 0,7385$	60,35	2490,85

Tem-se na Figura 4.16 os valores do calor isostérico integral de sorção Q_{st} (kJ kg^{-1}) do pó da polpa combinada C_1 (25% noni + 75% umbu) seca em estufa a 40, 50, 60 e 70 °C, em função do teor de água de equilíbrio (% b.s.), e na temperatura média de 30 °C. Verifica-se, assim como também constatado por OLIVEIRA et al. (2013) e por TEIXEIRA et al. (2012) que quanto menor o teor de água de equilíbrio, maior é o calor isostérico, indicando que mais energia é necessária para a remoção de água.

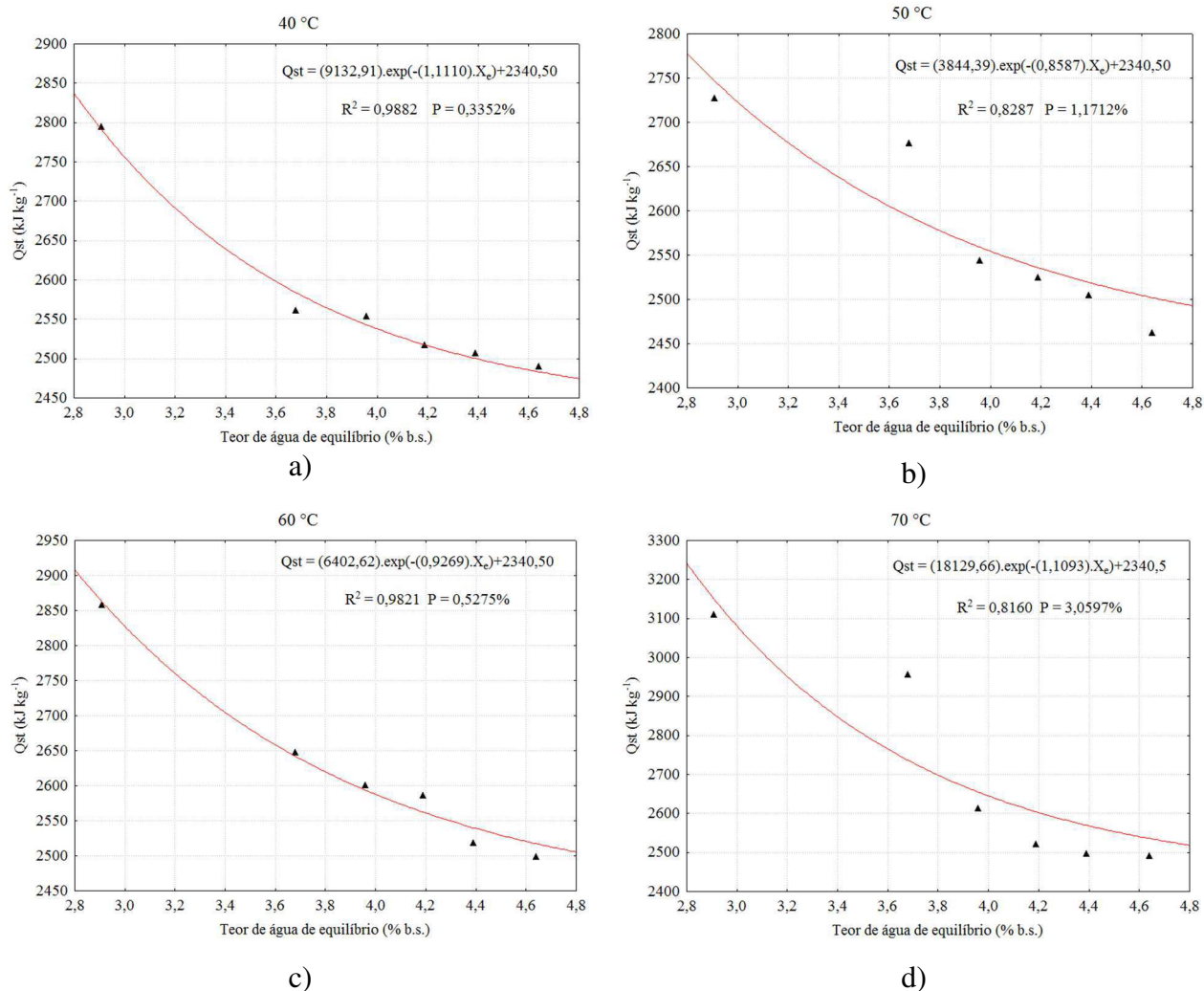


Figura 4.16 – Valores experimentais e preditos do calor isostérico integral de sorção (Q_{st}) estimados em função do teor de água de equilíbrio do pó do combinado de polpa (25% noni + 75% umbu) seco em estufa a: a) 40; b) 50; c) 60; e d) 70 °C

4.5.2 – Calor isostérico do pó da polpa combinada de noni com umbu (C_2)

Das Figuras 4.17 a 4.20 estão representadas as curvas do logaritmo neperiano da atividade de água (a_w) em função do inverso da temperatura absoluta do pó da polpa

combinada de noni com umbu (C₂) (50% noni + 50% umbu) seca nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C para diferentes teores de água de equilíbrio (% b.s.).

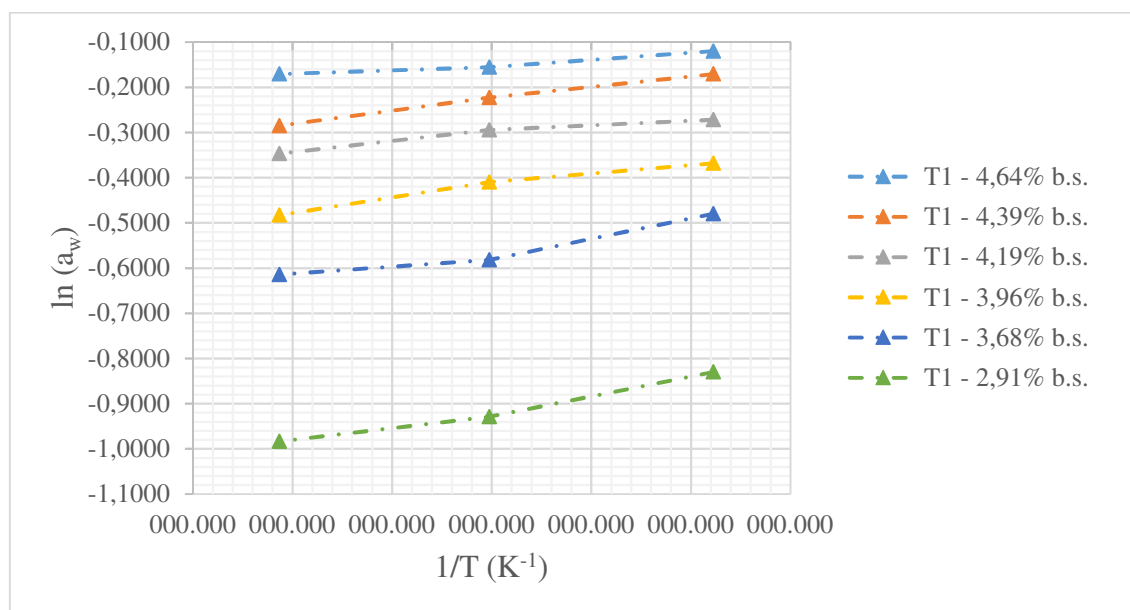


Figura 4.17 – Valores de $\ln(a_w)$ em função do inverso da temperatura absoluta, para diferentes teores de água de equilíbrio (% b.s.) para o pó da polpa combinada C₂ (50% noni + 50% umbu) seca em estufa a 40 °C

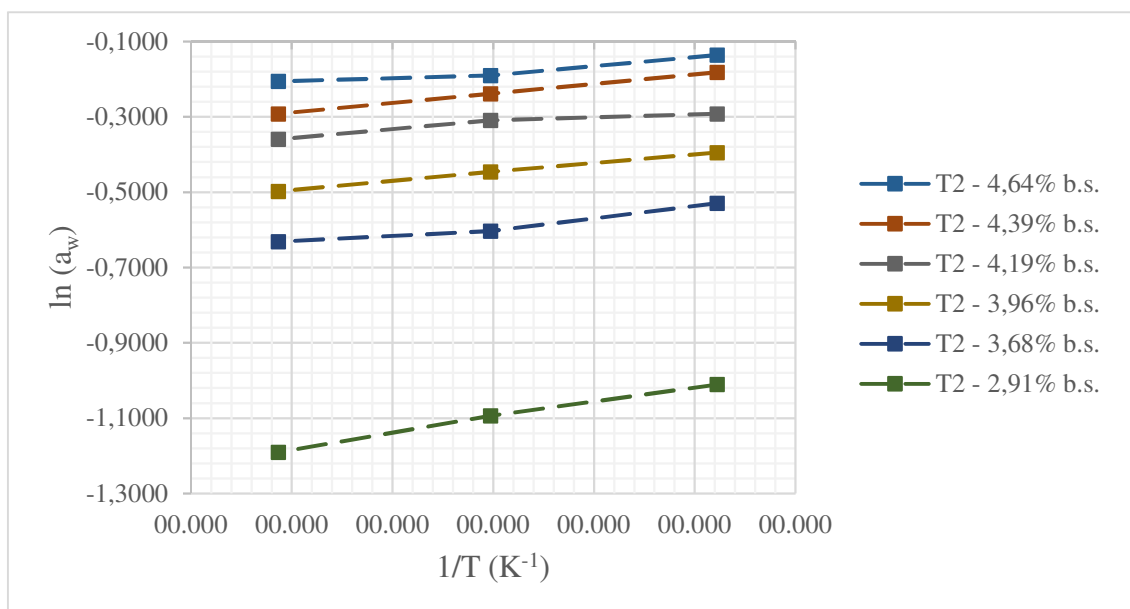


Figura 4.18 – Valores de $\ln(a_w)$ em função do inverso da temperatura absoluta, para diferentes teores de água de equilíbrio (% b.s.) para o pó da polpa combinada C₂ (50% noni + 50% umbu) seca em estufa a 50 °C

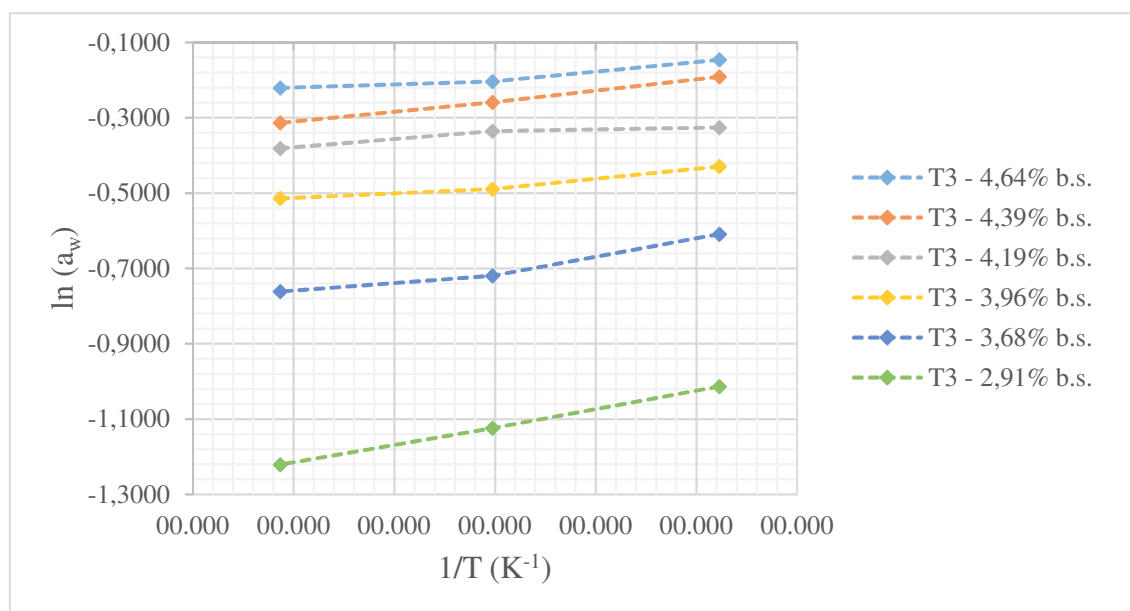


Figura 4.19 – Valores de $\ln(a_w)$ em função do inverso da temperatura absoluta, para diferentes teores de água de equilíbrio (% b.s.) para o pó da polpa combinada C₂ (50% noni + 50% umbu) seca em estufa a 60 °C

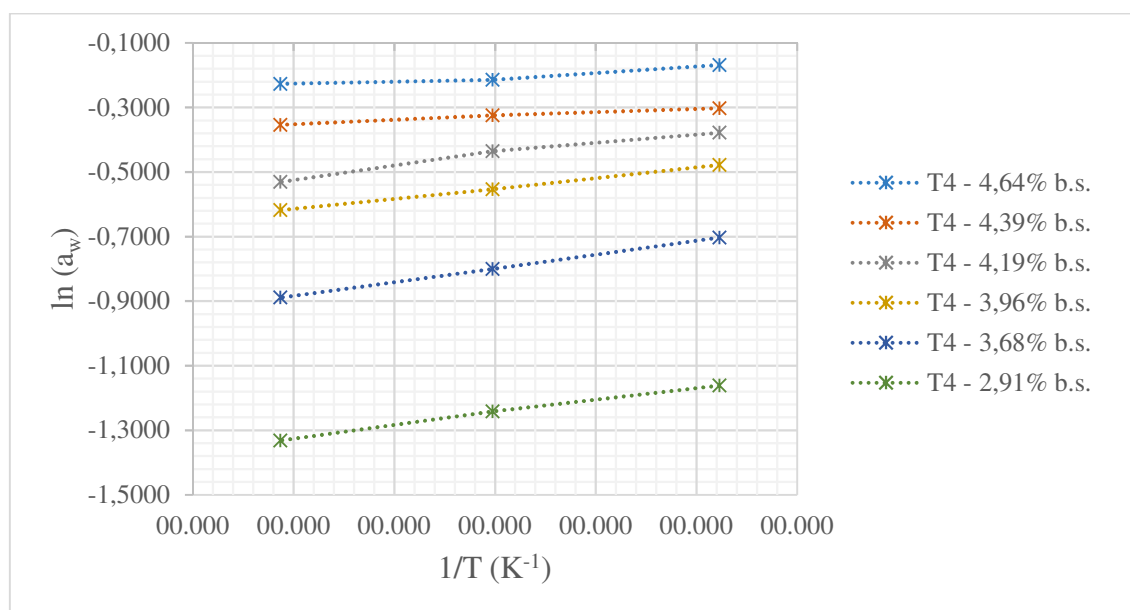


Figura 4.20 – Valores de $\ln(a_w)$ em função do inverso da temperatura absoluta, para diferentes teores de água de equilíbrio (% b.s.) para o pó da polpa combinada C₂ (50% noni + 50% umbu) seca em estufa a 70 °C

Tem-se na Tabela 4.21 os valores do calor isostérico líquido (q_{st}) e integral de sorção (Q_{st}) obtidos, respectivamente, a partir do coeficiente angular e do calor latente de vaporização de 2430,5 kJ kg⁻¹. Verifica-se que os valores do calor isostérico integral de

sorção na faixa de teor de água equilíbrio de 2,91 a 4,64% (b.s.) variaram de 2870,30 a 2538,77 kJ kg⁻¹, apresentando redução com o aumento do teor de água, em todas as temperaturas de secagem. Teixeira et al. (2015) verificaram valores próximos de calor isostérico integral de sorção entre 2524,09 e 2951,95 kJ kg⁻¹ para o bagaço de cana-de-açúcar.

Tabela 4.21 – Valores do calor isostérico líquido (q_{st}) e calor isostérico integral de sorção (Q_{st}) para diferentes teores de água de equilíbrio do pó da polpa combinada C₂ (50% noni + 50% umbu) seca em estufa a 40, 50, 60 e 70 °C

Temp. secagem (°C)	Teor de água de equilíbrio (% b.s.)	Equação da reta	q_{st} (kJ kg ⁻¹)	Q_{st} (kJ kg ⁻¹)
40	2,91	$y = 706,01x - 3,2447$	326,01	2756,51
	3,68	$y = 621,48x - 2,6101$	286,97	2717,47
	3,96	$y = 524,74x - 2,1524$	242,30	2672,80
	4,19	$y = 523,67x - 1,9549$	241,81	2672,31
	4,39	$y = 342,24x - 1,4341$	149,72	2580,22
	4,64	$y = 234,47x - 0,9227$	108,27	2538,77
50	2,91	$y = 825,77x - 3,8243$	381,31	2811,81
	3,68	$y = 505,65x - 1,9064$	233,49	2663,99
	3,96	$y = 472,88x - 1,0071$	218,36	2648,86
	4,19	$y = 469,34x - 2,1373$	216,72	2647,22
	4,39	$y = 323,00x - 1,2434$	149,15	2579,65
	4,64	$y = 309,65x - 1,3423$	142,98	2573,48
60	2,91	$y = 952,44x - 4,2634$	439,80	2870,30
	3,68	$y = 703,74x - 3,0197$	324,96	2755,46
	3,96	$y = 561,27x - 2,1072$	259,17	2689,67
	4,19	$y = 391,42x - 1,7697$	180,74	2611,24
	4,39	$y = 343,68x - 1,3246$	158,70	2589,20
	4,64	$y = 252,97x - 1,1826$	116,81	2547,31
70	2,91	$y = 853,73x - 3,6159$	394,22	2824,72
	3,68	$y = 780,64x - 3,8219$	360,47	2790,97
	3,96	$y = 698,66x - 2,7546$	322,61	2753,11

4,19	$y = 642,92x - 2,6722$	296,87	2727,37
4,39	$y = 270,03x - 1,0946$	124,69	2555,19
4,64	$y = 235,29x - 1,1036$	108,65	2539,15

Tem-se na Figura 4.21 os valores do calor isostérico integral de sorção (Q_{st}) em função do teor de água de equilíbrio, na temperatura média de 30 °C, do pó da polpa combinada C_2 (50% noni + 50% umbu) seca em estufa a 40, 50, 60 e 70 °C. Consta-se que o calor isostérico diminuiu com o aumento do teor de água de equilíbrio.

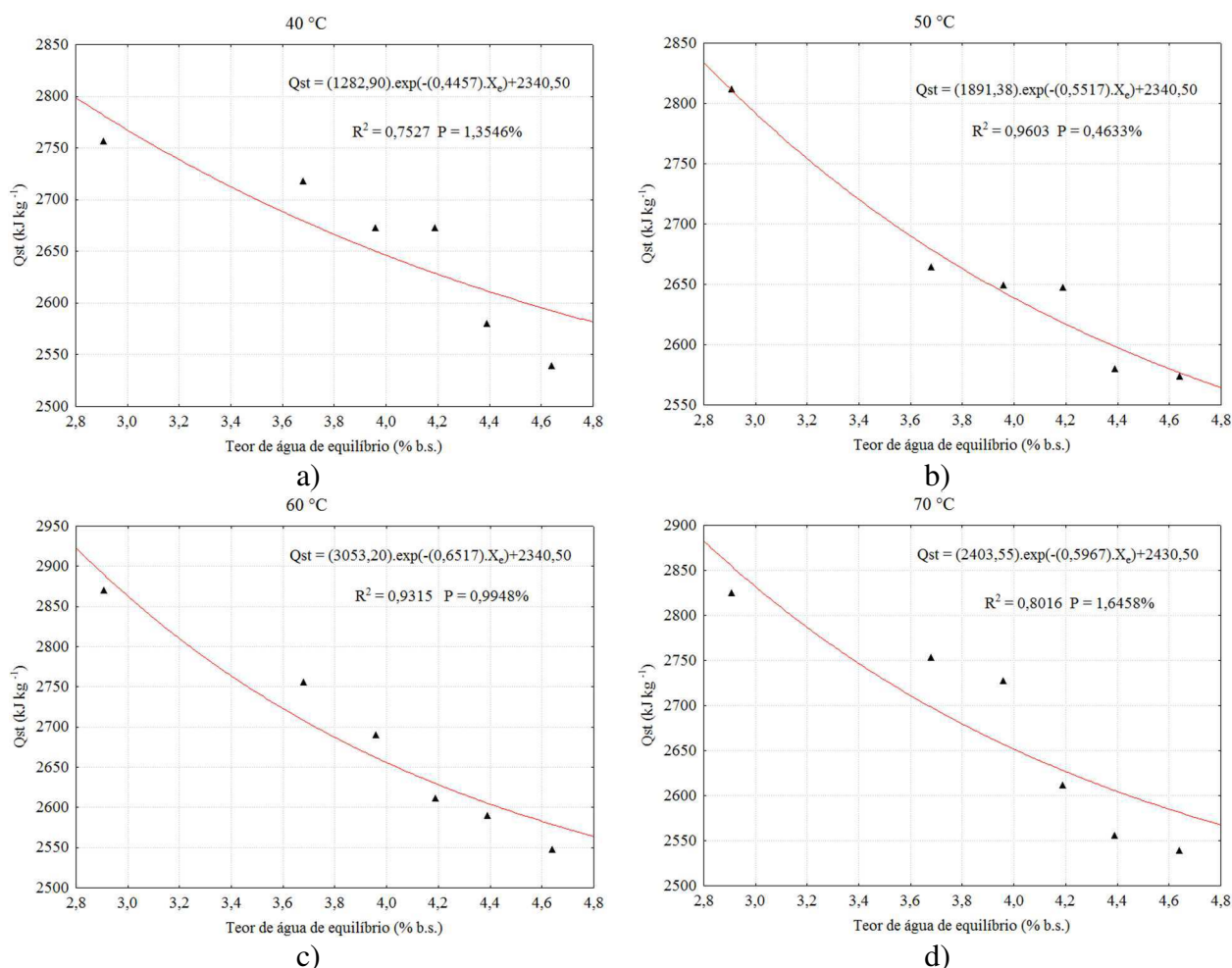


Figura 4.21 – Valores experimentais e preditos do calor isostérico integral de sorção (Q_{st}) em função do teor de água de equilíbrio do pó da polpa combinada C_2 (50% noni + 50% umbu) seco em estufa: a) 40; b) 50; c) 60; e d) 70 °C

4.5.3 – Calor isostérico do pó da polpa combinada de noni com umbu (C_3)

Das Figuras 4.22 a 4.25 estão representadas as curvas do logaritmo neperiano da atividade de água (a_w) em função do inverso da temperatura absoluta do pó da polpa

combinada de noni com umbu (C_3) (75% noni + 25% umbu) seca nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C para diferentes teores de água de equilíbrio.

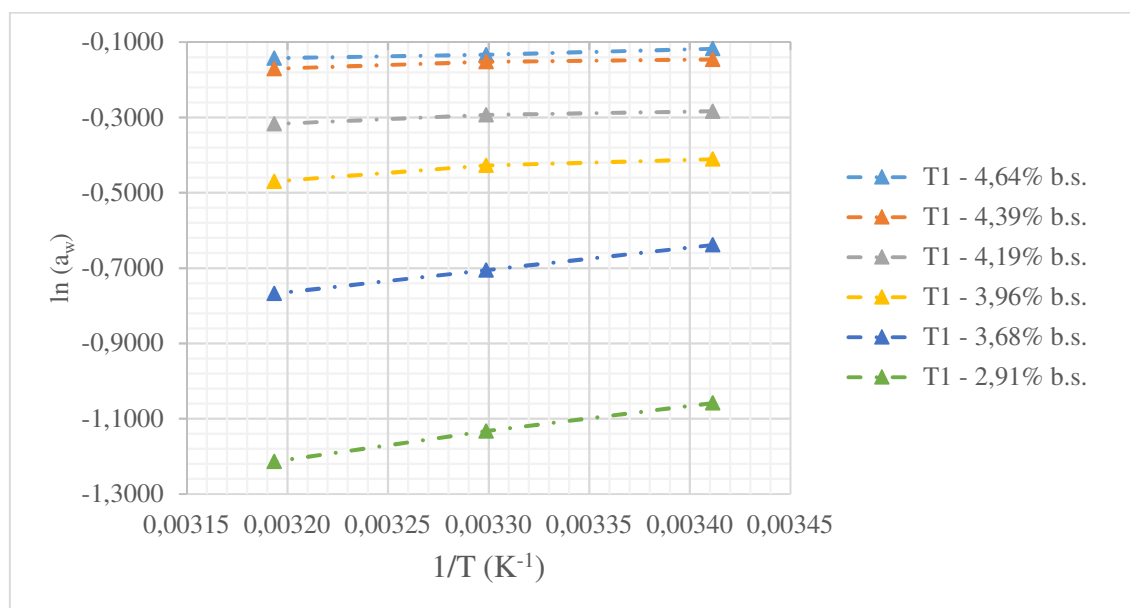


Figura 4.22 – Valores de $\ln(a_w)$ em função do inverso da temperatura absoluta para diferentes teores de água de equilíbrio (% b.s.) para o pó da polpa combinada C_3 (75% noni + 25% umbu) seca em estufa a 40 °C

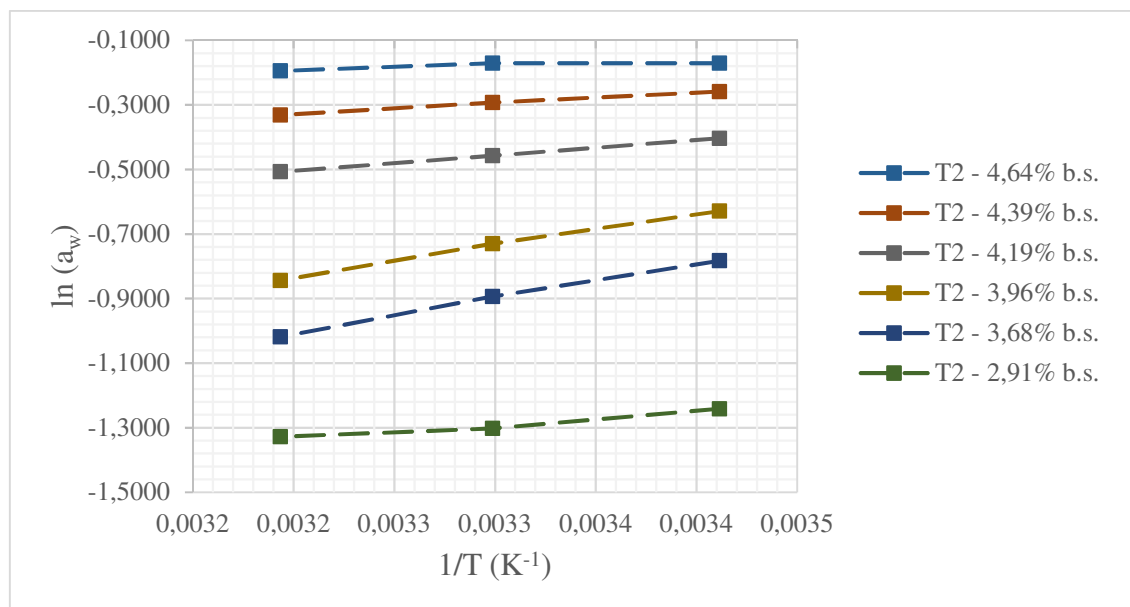


Figura 4.23 – Valores de $\ln(a_w)$ em função do inverso da temperatura absoluta, para diferentes teores de água de equilíbrio (% b.s.) para o pó da polpa combinada C_3 (75% noni + 25% umbu) seca em estufa a 50 °C

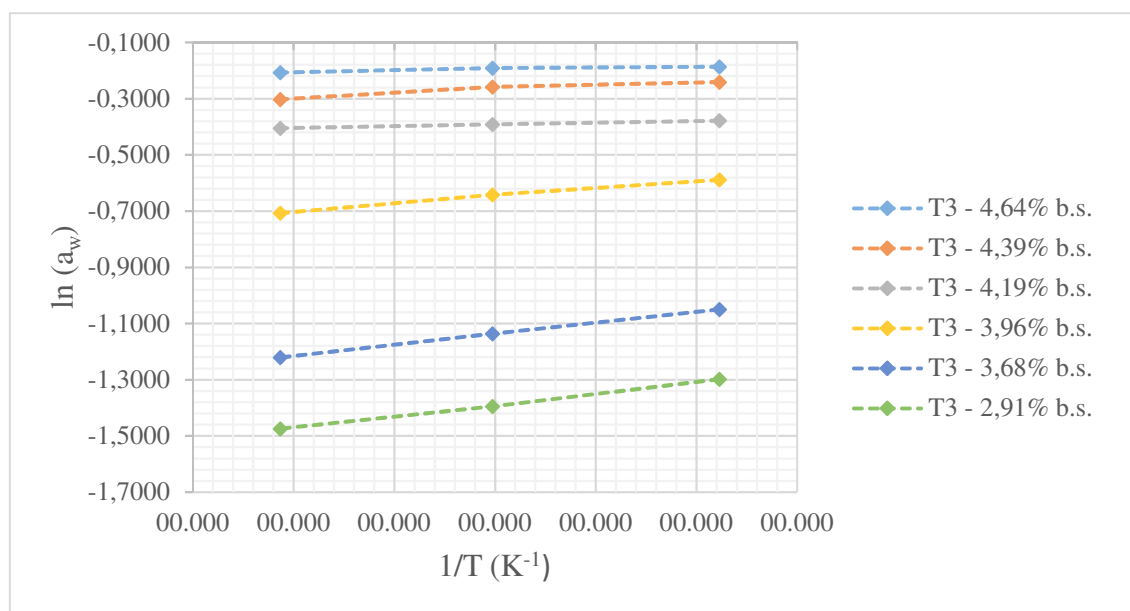


Figura 4.24 – Valores de $\ln(a_w)$ em função do inverso da temperatura absoluta, para diferentes teores de água de equilíbrio (% b.s.) para o pó da polpa combinada C₃ (75% noni + 25% umbu) seca em estufa a 60 °C

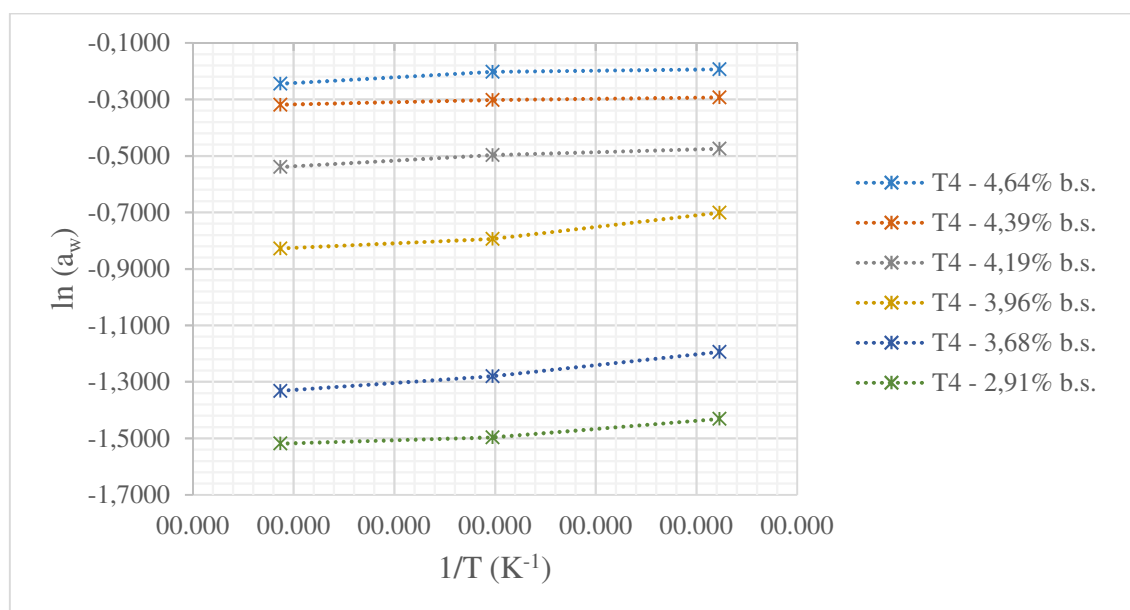


Figura 4.25 – Valores de $\ln(a_w)$ em função do inverso da temperatura absoluta para diferentes teores de água de equilíbrio (% b.s.) para o pó da polpa combinada C₃ (75% noni + 25% umbu) seca em estufa a 70 °C

Tem-se na Tabela 4.22 os valores do calor isostérico líquido (q_{st}) e integral de sorção (Q_{st}) obtidos, respectivamente, a partir do coeficiente angular e do calor latente de vaporização de $2430,5 \text{ kJ kg}^{-1}$.

Tabela 4.22 – Valores do calor isostérico líquido (q_{st}) e calor isostérico integral de sorção (Q_{st}) para diferentes teores de água de equilíbrio do pó da polpa combinada C₃ (75% noni + 25% umbu) seca em estufa a 40, 50, 60 e 70 °C

Temp. secagem (°C)	Teor de água de equilíbrio (% b.s.)	Equação da reta	q_{st} (kJ kg ⁻¹)	Q_{st} (kJ kg ⁻¹)
40	2,91	$y = 713,61x - 3,4909$	329,52	2760,02
	3,68	$y = 593,06x - 2,6617$	273,85	2704,35
	3,96	$y = 269,53x - 1,3260$	124,46	2554,96
	4,19	$y = 154,16x - 0,8070$	71,18	2501,68
	4,39	$y = 115,31x - 0,5120$	53,25	2483,75
	4,64	$y = 112,24x - 0,5268$	51,83	2482,33
50	2,91	$y = 1081,30x - 4,4680$	499,30	2929,80
	3,68	$y = 984,60x - 3,9846$	454,65	2885,15
	3,96	$y = 477,51x - 2,0324$	220,50	2651,00
	4,19	$y = 399,54x - 2,6093$	184,49	2614,99
	4,39	$y = 332,52x - 1,392$	153,54	2584,04
	4,64	$y = 108,96x - 0,5385$	50,31	2480,81
60	2,91	$y = 807,22x - 4,0536$	372,74	2803,24
	3,68	$y = 784,51x - 3,7254$	362,26	2792,76
	3,96	$y = 542,97x - 2,4385$	250,72	2681,22
	4,19	$y = 281,61x - 1,1970$	130,04	2560,54
	4,39	$y = 122,17x - 0,7949$	56,41	2486,91
	4,64	$y = 94,40x - 0,5065$	43,59	2474,09
70	2,91	$y = 633,93x - 3,3613$	292,72	2723,22
	3,68	$y = 584,06x - 2,7024$	269,70	2700,20
	3,96	$y = 296,14x - 1,4816$	200,65	2631,15
	4,19	$y = 403,11x - 2,8127$	186,14	2616,64
	4,39	$y = 232,46x - 0,9808$	107,34	2537,84
	4,64	$y = 118,02x - 0,6944$	54,50	2485,00

Verifica-se que os valores de calor isostérico integral de sorção na faixa de teor de água de equilíbrio de 2,91 a 4,64% (b.s.) variaram de 2929,80 a 2474,09 kJ kg⁻¹. Baptistini

(2015), ao estudar o pó de graviola obtido em secagem em camada de espuma, encontrou valores de calor isostérico de 2421,28 a 3900 kJ kg⁻¹.

Tem-se na Figura 4.26 os valores do calor isostérico integral de sorção (Q_{st}) em função do teor de água de equilíbrio (b.s.) do pó da polpa combinada C₃ (75% noni +25% umbu) seco em estufa a 40, 50, 60 e 70 °C e na temperatura média de 30 °C. Observa-se que o calor isostérico diminuiu com o aumento do teor de água de equilíbrio.

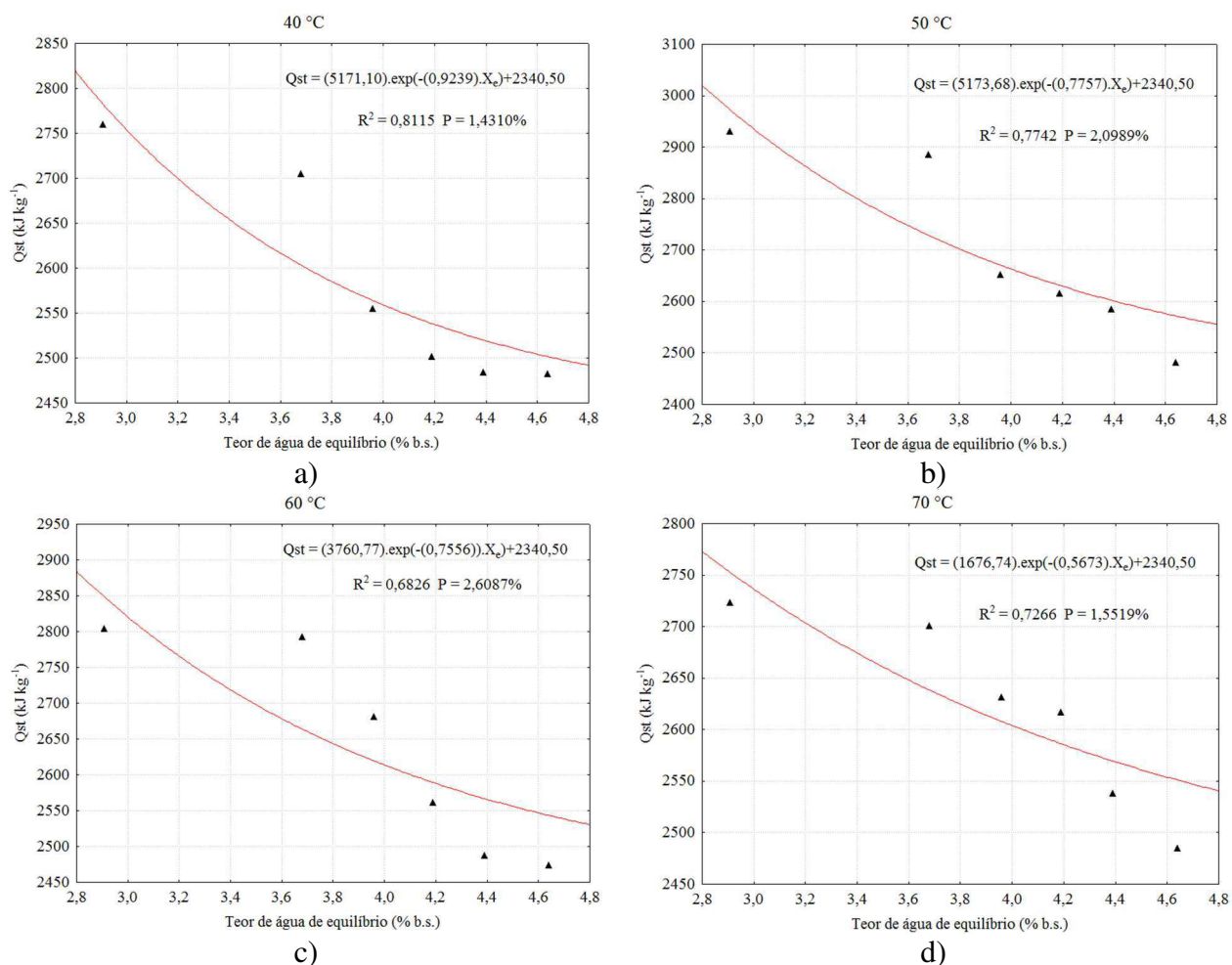


Figura 4.26 – Valores experimentais e preditos do calor isostérico integral de sorção (Q_{st}) em função do teor de água de equilíbrio (% b.s.) do pó da polpa combinada C₃ (75% noni + 25% umbu) seco em estufa: a) 40; b) 50; c) 60; e d) 70 °C

5 - CONCLUSÕES

- As polpas de umbu e de noni integral apresentaram baixo teor de lipídeos e proteínas e predominância da intensidade de amarelo.

- A polpa de noni integral apresentou alto teor de ácido ascórbico.

- As massas específicas das polpas de umbu e de noni integrais e as polpas combinadas (C₁, C₂ e C₃) apresentaram reduções com o aumento da temperatura. As equações de Alvarado e Romero (1989) e de Ramos e Ibarz (1998) podem ser usadas para estimar a massa específica das polpas de umbu e noni integrais, com erros inferiores a 13%.

- O calor específico apresentou tendência de aumento com aumento da temperatura em todas as polpas integrais e combinadas.

- A polpa de umbu apresentou a difusividade térmica maior que a polpa de noni, conseqüentemente, a polpa combinada C₁ com maior porcentagem de polpa de umbu também apresentou maior valor para a difusividade térmica em relação às polpas combinadas C₂ e C₃.

- A condutividade térmica das polpas de umbu e de noni e das polpas combinadas apresentou tendência de aumento com o aumento da temperatura.

- O modelo de Page foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais da cinética de secagem nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C para as três amostras das polpas combinadas de noni com umbu.

- Os modelos matemáticos ajustados às isotermas de adsorção de água ajustaram-se satisfatoriamente aos dados experimentais, porém, o modelo de GAB, de modo geral, teve os melhores ajustes e as isotermas foram classificadas como sendo do Tipo II.

- Houve uma tendência de redução do calor isostérico integral de sorção com o aumento do teor de água de equilíbrio. Quanto menor o teor de água de equilíbrio, maior a energia necessária para a remoção da água contida no produto.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, I. S. S.; VALE, B. N.; WATARO, N. O. Teor de ácido ascórbico no suco de noni e em polpa de frutos. **Revista Cereus**, v. 8, n. 3, p. 157-174, 2016.

ALVARADO, J. D. Propriedades físicas de fruta: difusividad y conductividade térmica efectiva de pulpas. **Latin American Applied Research**, v. 24, n. 1, p. 41-47, 1994.

ALVARADO, J. D.; ROMERO, C. H. Physical properties of fruits-I-II: density and viscosity of juices as functions of soluble solids and content and temperature. **Latin American Applied Research**, v. 19, n. 24, p. 15-21, 1989.

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, n. 1, p. 86-99, 2016.

ANJOS, E. V.; SILVA, J. A. Cinética de secagem e modelagem matemática do fruto de buriti (*Mauritia flexuosa*). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 11., 2015, Campinas. **Anais...** Campinas: UNICAMP, 2015. p. 1968-1973.

ARAÚJO, W. D.; GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; HARTMANN FILHO, C. P.; MARTINS, E. A. S. Modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada. **Ciência Agronômica**, v. 48, n. 3, p. 448-457, 2017.

ARAÚJO, C. S.; MACEDO, L. L.; VIMERCATI, W. C.; SARAIVA, S. H.; OLIVEIRA, A. N.; TEIXEIRA, L. J. Q. Foam-mar drying kinects for acerola and adjustmente of the mathematical models. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 20, e2016152, 2017.

ARAÚJO, J. L.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. Propriedades termofísicas da polpa do cupuaçu com diferentes teores de sólidos. **Ciência Agrotécnica**, v. 28, n. 1, p. 126-134, 2004.

ARAÚJO, J. L.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. Massa específica de polpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum* schum.) sob diferentes temperaturas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 4, n. 2, p. 127-134, 2002.

ARAÚJO, K. T. A.; SANTOS, F. S.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M. Cinética de secagem das sementes de pitaia vermelha. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 2., 2015, Fortaleza, **Anais...** Fortaleza: CONFEA/CREA, 2015, p. 1-4.

ASHRAE, **ASHRAE Handbook - Fundamentals**, American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 2002.

AVIARA, N. A.; AJIBOLA, O. O. Thermodynamics of moisture sorption in melon seed and cassava. **Journal of Food Engineering**, v. 55, n. 2, p. 107-113, 2002.

BAPTESTINI, F. M. **Parâmetros físico-químicos na obtenção do pó de graviola pelo método de secagem em leito de espuma**. 2015. 119 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

BASTOS, J. S.; MARTINEZ, E. A.; SOUZA, S. M. A. Características físico-químicas da polpa de umbu (*Spondias tuberosa* Arruda Câmara) comercial: efeito da concentração. **Journal of Bioenergy and Food Science**, v. 3, n. 1, p. 11-16, 2016.

BELTRÃO, F. A. S.; SOUZA, K. P.; SILVA, J. M. Caracterização de noni (*Morinda Citrifolia* L.). **Revista Engenharia Ambiental**, v. 11, n. 1, p. 38-44, 2014.

BENASSI, M. T.; ANTUNES, A. J. A comparison of meta-phosphoric and oxalic acids as extractant solutions for the determination of vitamin C in select vegetables. **Arquivos de Biologia e Tecnologia**, v. 31, n. 4, p. 507-513, 1998.

BEZERRA, T. S.; COSTA, J. M. C.; AFONSO, M. R. A.; MAIA, G. A.; ROCHA, E. M. F. F. Comportamento higroscópico de pós de manga das variedades coité e espada e avaliação das características físico-químicas. **Ciência Rural**, v. 40, p. 2186-2192, 2010.

BEZERRA, T. S.; COSTA, J. M. C.; AFONSO, M. R. A.; MAIA, G. A.; CLEMENTE, E. Avaliação físico-química e aplicação de modelos matemáticos na predição do comportamento de polpas de manga desidratadas em pó. **Revista Ceres**, v. 58, n. 1, p. 278-283, 2011.

BLAHOVEC, J. Sorption isotherms in materials of biological origin mathematical and physical approach. **Journal of Food Engineering**, v. 65, n. 4, p. 489-495, 2004.

BLIGH, E. G.; DYER, W. J. A rapid method for total lipid extraction and purification. **Canadian Journal of Biochemistry and Physiology**, v. 37, n. 8, p. 911-917, 1959.

BON, J.; VÁQUIRO, H.; BENEDITO, J.; TELIS-ROMERO, J. Thermophysical properties of mango pulp (*Mangifera indica* L. cv. Tommy Atkins). **Journal of Food Engineering**, v. 97, n. 4, p. 563-568, 2010.

BORGES, F. M.; MANCINI, M.C.; CORRÊA, J. L. G.; LEITE, J. B. Drying kinetics of bananas by natural convection: influence of temperature, shape, blanching and cultivar. **Revista Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 2, p. 368-376, 2011.

BORSATO, A. V.; AHRENS, D. C.; BARROS, A. S. R.; RAUPP, D. S. Efeito da secagem intermitente lenta na qualidade de sementes de milho. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 21, n. 1, p. 240-247, 1999.

BOTELHO, F. M.; CORRÊA, P. C.; GONELLI, A. L. D.; MARTINS, M. A.; MAGALHÃES, F. E. A.; CAMPOS, S. C. Periods of constant and falling-rate for infrared drying of carrot slices. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 8, p. 845-852, 2011.

BRAUNE, A. V.; LIMA, A. A.; KOVARI, F. I.; FRANCO, W. E. A.; AYROSA, A. M. I. B. Estudo do comportamento higroscópico da amora preta (*Rubus ssp*) liofilizada para aplicação como alimento nutracêutico. In: SAFETY, HEALTH AND ENVIRONMENT WORLD CONGRESS, 12., 2012, São Paulo. **Anais...** São Paulo: COPEC, 2012. p. 194-197.

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

HELDMAN, D. R. **Food process engineering**. Westport: The AVI Publishing Company, 1975. 401 p.

BRYAN, R. B.; BRIAN, A. F. Food thermophysical property models. *Common. Heat Mass Transfer*. v. 26, n. 5, p. 627-636, 1999.

BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E. Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *Journal of American Chemistry Society*, v. 60, n. 2, p. 309-319, 1938.

CAMICIA, R. G. M.; CHRISTI, D.; COELHO, S. R. M.; CAMICIA, R. F. M. Modelagem do processo de secagem de sementes de feijão-caupi. *Revista Caatinga*, v. 28, n. 3, p. 206-214, 2015.

CAMPOS, A. N. R.; SILVA F. L. H.; GOMES, J. P.; OLIVEIRA, L. S. C.; OLIVEIRA, M. M. Isotermas de adsorção e calor isostérico da palma forrageira enriquecida proteicamente. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 13, n. 6, p. 734-740, 2009.

CANUTO, G. A. B.; XAVIER, A. A. O.; NEVES, L. C.; BENASSI, M. T. Caracterização físico-química de polpas de frutos da Amazônia e sua correlação com atividade anti-radical livre. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 32, n. 4, p. 1196-1205, 2010.

CARVALHO, M. S. **Produção de polpa de abóbora em pó pelo processo de secagem em leito de espuma**. 2014. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

CASTRO, H. G. C.; CARVALHO, G. C.; SILVA, D. C. V. F.; MOURA, M. F. V. Determinação de umidade, cinzas e proteínas em amostras de umbu-cajá e cupuaçu. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA, 56., 2016, Belém. *Anais...* Belém: ABQ, 2016. CD-ROM.

CASTRO, D. S.; SILVA, L. M. M.; MOREIRA, I. S.; SOUSA, F. C.; SILVA, W. P.; ALMEIDA, F. A. C. Análise e descrição matemática da secagem de polpa de taturubá (*Pouteriamacrophylla (lam.) eyma.*) em camada fina. **ENGEVISTA**, v. 18, n. 2, p. 309-317, 2016.

CATELAM, K. T.; TRINDADE, C. S. F.; ROMERO, J. T. Water adsorption isotherms and isosteric sorption heat of spray-dried and freeze-dried dehydrated passion fruit pulp with additives and skimmed milk. **Revista Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1196-1203, 2011.

CAVALCANTI, N. B.; RESENDE, G. M.; BRITO, L. T. L. Umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda Câmara): cultivo apropriado para o semiárido. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DE CHUVA NO SEMIÁRIDO, 3., 2001, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: Embrapa Algodão; Petrolina: Embrapa Semiárido, 2001. CD-ROM.

CELESTINO, S. M. C. **Transferência de calor e massa em leito deslizante e escoamentos concorrentes: secagem de sementes de soja.** 1998. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

CHAN-BLANCO, Y.; VAILLANT, F.; PÉREZ, A. M.; BELLEVILLE, M.; ZUNIGA, C.; BRAT, P. The ripening and aging of noni fruits (*Morinda citrifolia* L.): microbiological flora and antioxidant compounds. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 87, n. 9, p. 1710-1716, 2007.

CHAN-BLANCO, Y.; VAILLAN, F.; PEREZ, A. M.; REYNES, M.; BRILLLOUNET, J.; BRAT, P. The noni fruit (*Morinda citrifolia* L.): A review of agricultural research, nutritional and therapeutic properties. **Journal of Food Composition Analysis**, v. 19, n. 7, p. 645-654, 2006.

CHITARRA, M. I. F.; CHITARRA, A. B. **Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio.** Lavras: ESAL/FAEPE, 2005. 289 p.

CHOI, Y.; OKOS, M. R. The properties of tomato juice concentrates. **Transactions of the ASAE**, v. 26, n. 1, p. 305-311, 1983.

CHUNHIENG, T. **Developpement de nouveaux neutraceutiques a partir de graines et fruits d'origine tropicale: application a la noix du Bresil *Bertholettia excelsa* et au fruit de Cambodge *Morinda citrifolia***. 2003. 181 f. These (Docteur es Procèdes Biotechnologiques et Alimentaires) - Centro de Sciences, Universite de Nancy, Lorraine.

CONSTENLA, D. T.; LOZANO, J. E.; CRAPISTE, G. H. Thermophysical properties of clarified apple juice as a function of concentration and temperature. **Journal of Food Science**, v. 54, n. 3, p. 663-668, 1989.

CORREIA, A. A. S.; GONZAGA, M. L. C.; AQUINO, A. C.; SOUZA, P. H. M.; FIGUEIREDO, R. W.; MAIA, G. A. Caracterização química e físico-química da polpa do noni (*Morinda citrifolia*) cultivado no estado do Ceará. **Revista de Alimentos e Nutrição**, v. 22, n. 4, p. 609-615, 2011.

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

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M.; NOGUEIRA, B. L. Determinação do coeficiente de difusão líquida dos grãos de feijão. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 8, n. 2, p. 117-126, 2006.

COSTA, A. B.; OLIVEIRA, A. M. C.; SILVA, A. M. O.; MANCINI-FILHO, J.; LIMA, A. Atividade antioxidante da polpa, casca e sementes do noni (*Morinda citrifolia* L.). **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 35, n. 2, p. 354-354, 2013.

CRAPISTE, G. H.; ROTSTEIN, E. Prediction of sorption equilibrium data for starch-containing foodstuffs. **Journal of Food Science**, v. 47, n. 5, p. 1501-1507, 1982.

CUNHA, F. S. X. S.; NASCIMENTO, N. P.; SOUZA, J. P. C.; SOUZA, M. R.; SOUZA, P. A. Caracterização nutricional de frutos de noni (*Morinda citrifolia* L.) cultivados em Limoeiro do Norte (CE). In: CONGRESSO NORTE NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO, 7., 2012, Palmas. **Anais...** Palmas: IFTO, 2012. CD-ROM.

DANTAS JÚNIOR, E. E.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. Determinação e elaboração de modelos de predição da massa específica da manga espada. **Revista Educação Agrícola Superior**, v. 22, n. 1, p. 39-42, 2007.

DIEB, J. T.; GURGEL, C. M.; DANTAS, T. P.; MEDEIROS, M. F. D. Secagem da polpa de graviola pelo processo foam-mat e avaliação sensorial do produto obtido. **Revista Tecnologia e Informação**, v. 2, n. 2, p. 24-31, 2015.

DICKERSON, R. W. An apparatus for the measurement of thermal diffusivity of foods, **Food Technology**, v. 19, n. 5, p. 198-204, 1965.

DIÓGENES, A. M. G.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; SANTOS, D. C. Cinética de secagem de grãos de abóbora. **Revista Caatinga**, v. 26, n. 1, p. 71-80, 2013.

DIXON, A. R.; McMILLEN, H.; ETKIN, N. L. Ferment this: the transformation of Noni, a traditional Polynesian medicine (*Morinda citrifolia*, Rubiaceae). **Ecological Botony**, v.53, n. 1, p. 51-68, 1999.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponível em: <http://www.fao.org/waicent/portal/statistics> Acesso em: 05 set. 2012.

FARIA, W. C. S.; BETT, S. C.; SANTOS, C. G. B.; BRASIL, A. S.; GAUTO, R. F.; BESERRA, A. M. S. S.; OLIVEIRA, A. P. Caracterização físico-química e análise fitoquímica preliminar do fruto noni produzido na cidade de Cuiabá – MT. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, v. 8, n. 1, p. 1208-1215, 2014.

FARIAS, E. S.; GOUVEIA, J. P. G.; ALMEIDA, F. A. C.; BRUNO, L. A.; NASCIMENTO, J. Secagem de cajá em um secador de leito fixo. In: CONGRESSO

BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 17., 2002, Belém. **Anais...** Belém: SBF, 2002. CD-ROM.

FELLOWS P. J. **Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e prática.** 2 ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 602 p.

FERREIRA, C. D.; PENA, R. S. Comportamento higroscópico da farinha de pupunha (*Bactris gasipaes*). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 23, n. 2, p. 251-255, 2003.

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, n. 6, p. 855-862, 2012.

FERREIRA, M. N. **Estudo da secagem de jabuticaba (polpa e casca) pelo método de camada de espuma.** 2017. 109 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos). Ciência e Tecnologia de Alimentos – Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

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.

GARCIA, D. C.; BARROS, A. C. S. A.; PESKE, S. T.; MENEZES, N. L. A secagem de sementes. **Ciência Rural**, v. 34, n. 2, p. 603-608, 2004.

GAVA, A. J.; SILVA, C. A. B.; FRIAS, J. R. G. **Tecnologia de alimentos: princípios e aplicações.** São Paulo: Nobel, 2008. 301 p.

GIRALDO-GÓMEZ, G. I; GABAS, A. L; TELIS, V. R. N; TELIS-ROMERO, J. Propriedades termofísicas de suco concentrado de lulo em temperaturas acima do ponto de congelamento. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 30, n. 1, p. 90-95, 2010.

GOMES, A. P. E.; SILVA, K. E.; RADEKE, S. M.; OSHIRO, A. M. Caracterização física e química de kiwi in natura e polpa provenientes da comercialização de Dourados – MS. **Revista de Ciências Exatas e da Terra**, v. 1, n. 1, p. 1-8, 2012.

GONÇALVES, J. Q.; SILVA, M. A. P.; PLÁCIDO, G. R.; CALIARI, M.; SILVA, R. M.; MOURA, L. C.; SOUZA, D. G. Secagem da casca e polpa da banana verde (*Musa acuminata*): propriedades físicas e funcionais da farinha. **Global Science and Technology**, v. 9, n. 3, p. 62-72, 2016.

GOUVEIA, J. P.G.; ALMEIDA, F. A. C.; FARIAS, E. S.; SILVA, M. M.; CHAVES, M. C. V.; REIS, L. S. Determinação das curvas de secagem em frutos de cajá. **Revista Brasileira de Produtos Agrícolas**, v. especial, n. 1, p. 65-68, 2003.

GUEDES, A. M.; FARIA, L. J. G. Determinação da constante de secagem de urucum (*Bixa orellana L.*) em secador convectivo de leito fixo. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 2, n. 1, p. 73-86, 2000.

GUEDES, D. B.; RAMOS, A. M.; DINIZ, M. D. M. S. Efeito da temperatura e da concentração nas propriedades físicas da polpa de melancia. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 13, n. 4, p. 279-285, 2010.

GUPTA, S.; COX, S.; ABU-GHANNAM, N. Effect of different drying temperatures on the moisture and phytochemical constituents of edible Irish brown seaweed. **LWT-Food Science and Technology**, v. 44, n. 5, p. 1266-1272, 2011.

GURGEL, C. E. M. R.; DIEB, J. T.; MACHADO, I. P.; DANTAS, T. N. P.; MEDEIROS, M. F. D. Cinética de secagem da polpa de graviola pelo processo foam-mat. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 20., 2014, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABEQ, 2014. CD-ROM.

HELDMAN, D. R. **Food process engineering**. Westport: The AVI Publishing Company, 1975. 401 p.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory: I. Temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agriculture Engineers Research**, v. 6, n. 3, p. 169-174, 1961.

HENSE, H. **Avaliação dos parâmetros termofísicos e cinética de congelamento de cação**. 1990. 189 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Faculdade de Engenharia de Alimentos - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

IGLESIAS, H.; CHIRIFE, J. Prediction of the effect of temperature on water sorption isotherms of food material. **Journal of Food Technology**, v. 11, n. 2, p. 109-116, 1976.

INCROPERA, F. P.; DeWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos S.A., 2008. 252 p.

INCROPERA, F. P., DeWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 5 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos S.A., 2003. 698 p.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4. ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. 1020 p.

IBGE, **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: maio de 2017.

JAMALI, A.; KOUHILA, M.; MOHAMED, L. A.; JAOUHARI, J. T.; ADLIMAM, A.; ABDENOURI, N. Sorption isotherms of *Chenopodium ambrosioides*, leaves at three temperatures. **Journal of Food Engineering**, v. 72, n. 1, p. 77-84, 2006.

JARAMILLO-FLORES, M. E.; HERNANDEZ-SANCHEZ, H. Thermal diffusivity of soursop (*Annona muricata* L.) pulp. **Journal of Food Engineering**, v. 46, n. 2, p. 139-143, 2000.

JENSEN, C. J.; PALU, A. K.; OHISHI, H.; TANI, H. Preventative and treatment effects of *Morind citrifolia* on diabetes and its related conditions. United States Patent, 6,855,354 B2, 2005.

JHA, S. N.; PRASAD, S. Physical and thermal properties of gorgon nut. **Journal Food Process Engineering**, v. 16, n. 3, p. 237-245, 1993.

KECHAOU, N.; MAALEJ, M. Desorption isotherms of imported banana. **Drying Technology**, v. 17, n. 6, p. 1201-1213, 1999.

KHAN, A. A.; SAJID, M.; RAD, A. Tomato fruit quality as affected by different sources of phosphorus. **Pakistan Journal of Nutrition**, v. 13, n. 12, p. 692-699, 2014.

LANE, H.; EYNON, L. Determination of reducing sugar by means of Fehling's solution with methylene blue as internal indicator. **Journal of the Society of Chemistry Industry**, v. 42, p. 32-37, 1923.

LAVAUT, N. E. G.; LAVAUT, J. A. G. *Morinda citrifolia* Linn: potencialidades para su utilización em la salud humana. **Revista Cubana de Farmácia**, v. 37, n. 3, p. 1-1, 2003.

LEITE, D. D. F.; LISBÔA, J. F.; SANTOS, D. C.; SILVA, M. J. S.; QUEIROZ, A. J. M. Processamento e caracterização física e química de blends de jaca e umbu-cajá. In: Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências, 1., 2016, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: CEMEP, 2016. CD-ROM.

LEITE, D. D. F.; SANTOS, F. S.; SANTOS, D. C.; LISBÔA, J. F.; FERREIRA, J. P. L.; QUEIROZ, A. J. M. Modelagem matemática da cinética de secagem da casca do abacaxi. **Revista Verde de Agrotecnologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 12, n. 4, p. 769-774, 2017.

LEMO, D. M.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. Caracterização físico-química de sementes de noni. **Revista Geintec**, v. 5, n. 3, p. 2308-2315, 2015.

LIMA, E. E.; SILVA, A. S. A.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M. Estudo das isotermas e calor isostérico de adsorção da farinha da coroa de frade. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 10, n. 2, p. 163-170, 2008.

LIMA, F. S. **Caracterização físico-química e bromatológica da polpa de *Spondias sp.* (Cajarana do Sertão)**. 2010. 64 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal de Campina Grande, Patos.

LIMA, I. J. E.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. Propriedades termofísicas da polpa de umbu. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 1, n. 1, p. 31-42, 2003.

LIMA, J. L. S. **Plantas forrageiras das caatingas: usos e potencialidades**. Petrolina: EMBRAPA – CPATSA/PNE/RBG – KEW, 1996. 40 p.

LIMA, M. S. S.; DANTAS, A. C. V. L.; FONSECA, A. A. O.; BARROSO, J. P. Caracterização de frutos de genótipos selecionados de umbu-cajazeira (*Spondias sp.*). **Revista Interciencia**, v. 40, n. 5, p. 311-316, 2015.

MACIEL, C. E. P.; CAVALCANTE, G. C.; MACIEL, M. I. S.; BORGES, G. S. C.; DUTRA, R. L. T.; CONCEIÇÃO, M. M. Caracterização físico-química de polpas de goiaba e acerola para elaboração de doce cremoso diet. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS, 25., 2016, Gramado. **Anais...** Gramado: SBCTA Regional, 2016. <http://www.ufrgs.br/xxvcbcta/anais>

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. The thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v. 29, n. 1, p. 75-97, 2007.

MADUREIRA, I. A.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M.; SILVA FILHO, E. D. S. Cinética de secagem da polpa do figo-da-índia. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 13, n. especial, p. 345-354, 2011.

MANICA, I.; KIST, H.; MICHELETTO, E. L.; KRAUSE, C. A. Competição entre quatro cultivares e duas seleções de goiabeira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 8, p. 1305-1313, 1998.

MANOHAR, B; KAMAKRISHNA, P; UDAYASANKAR, K. Some physical properties of tamarindo (*Tamarindus indica L.*) juice concentrates. **Jounal of Food Engineering**, v. 13, n. 4, p. 241-258, 1991.

MARINHO, M. V. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M.; SANTIAGO, V. M. S.; GOMES, J. P. Análise físico-química e sensorial de iogurte de leite de cabra com polpa

de umbu. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 14, n. especial, p. 497-510, 2012.

MARTINSEN, P.; SCHAARE, P. Measuring soluble solids distribution in kiwifruit using near-infrared imaging spectroscopy. **Postharvest Biology and Technology**, v. 14, n. 3, p. 271-281, 1998.

McCLATCHEY, W. From polynesian healers to health food Stores: changing perspectives of *Morinda citrifolia* (Rubiaceae). **Integrative Cancer Therapies**, v. 1, n. 2, p. 110-120, 2002.

McMINN, W. A. M. Thin-layer modeling of the convective, microwave, microwave-convective and microwave-vacuum drying of lactose powder. **Journal of Food Engineering**, v. 72, n. 4, p. 113-123, 2006.

MELO, K. S.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M.; FERNANDES, T. K. S.; BEZERRA, M. C. T. Secagem em camada de espuma da polpa do fruto do mandacaru: experimentação e ajustes de modelos matemáticos. **Revista Caatinga**, v. 26, n. 2, p. 10-17, 2013.

MENDES, B. V. **Umbuzeiro (*Spondias tuberosa*, Arruda Câmara): importante fruteira do semiárido**. Mossoró: ESAM (Coleção Mossoroense, série C, v. 564), 1990. 67 p.

MENDONÇA, A. P.; SAMPAIO, P. T. B.; ALMEIDA, F. A. C.; FERREIRA, R. F.; NOVAIS, J. M. Determinação das curvas de secagem das sementes de andiroba em secador solar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 4, p. 382-387, 2015.

MENEZES, M. L.; STROHER, A. P.; PEREIRA, N. C.; BARROS, S. T. D. Análise da cinética e ajustes de modelos matemáticos aos dados de secagem do bagaço do maracujá-amarelo. **ENGEVISTA**, v. 15, n. 2, p. 176-186, 2013.

MENEZES, P. H. S.; SOUZA, A. A.; SILVA, E. S.; MEDEIROS, R. D.; BARBOSA, N. C.; SORIA, D. G. Influência do estágio de maturação na qualidade físico-química de frutos de umbu (*Spondias tuberosa*). **Scientia Agropecuaria**, v. 8, n. 1, p. 73-78, 2017.

MERCALI, G. D; SARKIS, J. R; JAESCHKE, D. P; TESSARO, I. C; MARCZAK, L. D. F. Physical properties of acerola and blueberry pulps. **Journal of Food Engineering**, v. 106, n. 4, p. 283-289, 2011.

MOHSENIN, N. N. **Thermal properties of foods and agricultural materials**. London: Gordon and Breach, 1980. 407 p.

MONTE, J. E.; MARTINS, J. H.; MONTEIRO, P. M. B.; PINTO, P. M. Sistemas de controle de secagem de grãos em camada fina usando instrumentos digitais endereçáveis. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 35., 2006, João Pessoa. **Anais...** SBEA: Jaboticabal. CD-ROM.

MORAES FILHO, F. C.; OLIVEIRA, E. L.; NÓBREGA, E. M. M. A.; OLIVEIRA, J. A.; CORREIA, R. T. P. Secagem convectiva da acerola (*Malpighia emarginata* DC.): aplicação de modelos semiteóricos. **Holos**, v. 1, a. 30, p. 86-95, 2014.

MORAIS, S. J. S.; DEVILLA, I. A.; FERREIRA, D. A.; TEIXEIRA, I. R. Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L) Walp.). **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 3, p. 455-463, 2013.

MOREIRA, I. S.; SILVA, W. P.; CASTRO, D. S.; SILVA, L. M. M.; GOMES, J. P.; SILVA, C. M. D. P. S. Production of kiwi snack slice with different thickness: drying kinetics, sensory and physicochemical analysis. **Australian Journal of Crop Science**, v. 12, n. 5, p. 778-787, 2018.

MOREIRA, T. B.; ROCHA, E. M. F. F.; AFONSO, M. R. A.; COSTA, J. M. C. Comportamento das isotermas de adsorção do pó da polpa de manga liofilizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 10, p. 1093-1098, 2013.

MOURA, S. C. S. R.; FRANÇA, V. C. L.; LEAL, A. M. C. B. Propriedades termofísicas de modelos similares a sucos – parte I. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 23, n. 1, p. 62-68, 2003.

MUNIZ, M. B.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; DUARTE, M. E. M. Caracterização termofísica de polpas de bacuri. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 26, n. 2, p. 360-368, 2006.

MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H. **Fundamentos da mecânica dos fluidos**. 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1997. 418 p.

MURAMATSU, Y.; SAKAGUCHI, E.; ORIKASA, T.; TAGAWA, A. Simultaneous estimation of the thermophysical properties of three kinds of fruit juices based on the measured result by a transient heat flow probe method. **Journal of Food Engineering**, v. 96, n. 4, p. 607-613, 2010.

MUZAFFAR, K.; KUMAR, P. Moisture sorption isotherms and storage study of spray dried tamarind pulp powder. **Powder Technology**, v. 291, n. 1, p. 322-327, 2016.

NARAIN, N.; BORA, P. S.; HOLSCHUH, H. J.; VASCONCELOS, M. A. S. Variation in physical and chemical composition during maturation of umbu (*Spondias tuberosa*) fruits. **Food Chemistry**, v. 44, n. 4, p. 255-259, 1992.

NERY, K. A.; ARAUJO, R. O.; BRAGA, T. R.; OLIVEIRA, M. M. T.; TORRES, L. B. V.; SILVA, L. R. Caracterização física e físico-química de frutos do noni (*Morinda citrifolia* L.) cultivados em Fortaleza – CE. **Revista Cultivando o Saber**, v. 6, n. 1, p. 17-24, 2013.

NUNES, J. S.; CASTRO, D. S.; MOREIRA, I. S.; SOUSA, F. C.; SILVA, W. P. Descrição cinética de secagem da polpa de jabuticaba usando modelos empíricos. **Revista Verde de Agrotecnologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 9, n. 1, p. 20-26, 2014.

NUNES, V. X.; PARAIZO, E. A.; SILVA, J. M.; JESUS, M. O.; NUNES, N. X.; FONSECA, S. N. A.; MIZOBUTSI, G. P. Características químicas e físico-químicas da

polpa de noni (*Morinda citrifolia*). In: FÓRUM DE ENSINO, PESQUISA EXTENSÃO E GESTÃO, 8., 2014. Montes Claros. **Anais...** Montes Claros: Unimontes, 2014. <http://www.fepeg2014.unimontes.br/?q=publicacao-anais>

OLIVEIRA, D. E. C.; RESENDE, O.; SMANIOTTO, T. A. S.; SOUSA, K. A.; CAMPOS, R. C. Propriedades termodinâmicas de grãos de milho para diferentes teores de água de equilíbrio. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, n. 1, p. 50-56, 2013.

OLIVEIRA, E. A. **Efeitos da pasteurização térmica sobre as características químicas, físico-químicas, sensoriais e reológicas da polpa de umbu (*Spondias tuberosa* Arruda Câmara)**. 2006. 55 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos). Ciência e Tecnologia de Alimentos - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.

OLIVEIRA, G. H. H.; ARAGÃO, D. M. S.; OLIVEIRA, A. P. L. R.; SILVA, M. G.; GUSMÃO, A. C. A. Modeling and thermodynamic properties of the drying of strawberries. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 18, n. 4, p. 314-321, 2015.

OLIVEIRA, M. I. S.; TONON, R. V.; NOGUEIRA, R. I.; CABRAL, L. M. C. Stability of spray-dried strawberry pulp produced with different carrier agents. **Food Technology**, v. 16, n. 4, p. 310-318, 2013.

PALIOTO, G. F.; SILVA, C. F. G.; MENDES, M. P.; ALMEIDA, V. V.; ROCHA, C. L. M. S. C.; TONIN, L. T. D. Composição centesimal, compostos bioativos e atividade antioxidante de frutos de *Morinda citrifolia* Linn (noni) cultivados no Paraná. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v. 17, n. 1, p. 59-66, 2015.

PALU, A. K.; JIM, A. H.; WEST, B. J.; DENG, S.; JENSEN, J.; WHITE, L. The effects of *Morinda citrifolia* L. (noni) on the immune system: Its molecular mechanisms of action. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 115, n. 3, p. 502-506, 2008.

PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin-layer**. 1949. Dissertation (Master os Science). Purdue University, Indiana, USA.

PARK, K. J.; ALONSO, L. F.; NUNES, A. S. Determinação experimental da condutividade e difusividade de grãos em regime permanente. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 19, n. 2, p. 264-269, 1999.

PARK, K. J.; TUBONI, C. T.; OLIVEIRA, R. A.; PARK, K. J. B. Estudo da secagem de caqui giombo com encolhimento e sem encolhimento. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 6, n. 1, p. 71-86, 2004.

PARK, K. J.; YADO, M. K. M.; BROD, F. P. R. Estudo de secagem de pêra bartlett (*Pyrus* sp.) em fatias. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 21, n. 3, p. 288-291, 2001.

PAULA, B.; FILHO, C. D. C.; MATTA, V. M.; MENEZES, J. S.; LIMA, P. C.; PINTO, C. O.; CONCEIÇÃO, L. E. M. G. Produção e caracterização físico-química de fermentado de umbu. **Ciência Rural**, v. 42, n. 9, p. 1688-1693, 2012.

PÊ, P. R.; CARNEIRO, G. G.; PÊ, F. R.; CASTRO, D. S.; SILVA, D. R. S.; MARQUES, L. F. Secagem de polpa de caqui pelo método de camada de espuma. **Holos**, v. 4, a. 32, p. 77-85, 2016.

PENTEADO, M. V. C. **Vitaminas: aspectos nutricionais, bioquímicos, clínicos e analíticos**. Barueri: Manole, 2003. cap. 2, p. 56-74.

PEREIRA, E. A.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. Massa específica de polpa de açaí em função do teor de sólidos totais e da temperatura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 3, p. 526-530, 2002.

PEREZ, L. G.; OLIVEIRA, F. M. N.; ANDRADE, J. S.; MOREIRA FILHO, M. Cinética de secagem da polpa cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) pré desidratação por imersão-impregnação. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 1, p. 102-106, 2013.

PRADO, M. M. **Secagem em leito fixo de sementes com mucilagem**. 2004. 162 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

PRAXEDES, W. D. S.; SILVA, L. F. S.; SILVA, M. M.; SILVA, J. C.; SILVA, J. M.; SENA, A. R. Avaliação das características físico-químicas de frutos de noni (*Morinda citrifolia* L.). In: CONGRESSO NORTE NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO. 7., 2012, Palmas. **Anais...** Palmas: IFTO, 2012. CD-ROM.

POLTRONIERI, L. S., FREIRE, F. C. O., VERZIGNASSI, J. R., FERREIRA, T. P. S., SOUZA, A. C. A. C. Primeiro registro de *Myrothecium roridum* em noni no Brasil. **Summa Phytopathology**, v. 35, n. 1, p. 69, 2009.

RAHMAN, M. S. **Food properties handbook**. 2 ed. Boca Raton: CRC Press, 2009. 859 p.

RAMOS, A. M.; IBARZ, A. Density of juice and fruit puree as a function of soluble solids content and temperature. **Journal of Food Engineering**, v. 35, n. 1, p. 57-63, 1998.

RAMOS, A. P.; GUERRERO, K. M. L.; ROMERO, J. T.; LOPES FILHO, J. F.; Isotermas e calor isostérico de adsorção da água do amido de quinoa. **Biotecnologia en el Sector Agropecuario y Agroindustrial**, v. 15, n. 1, p. 95-104, 2017.

REIS, R. C.; BARBOSA, L. S.; LIMA, M. L.; REIS, J. S.; DEVILLA, I. A.; ASCHERI, D. P. R. Modelagem matemática da secagem da pimenta Cumari do Pará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 4, p. 347-353, 2011.

RESENDE, O.; FERREIRA, L. U.; ALMEIDA, D. P. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 12, n. 2, p. 171-178, 2010.

SANTOS, A. A. C.; FLORÊNCIO, A. K. G. D.; ROCHA, E. M. F. F.; COSTA, J. M. C. Avaliação físico-química e comportamento higroscópico de goiaba em pó obtida por spray-dryer. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 3, p. 508-514, 2014.

SANTOS, D. C.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; OLIVEIRA, E. N. A. Cinética de secagem de farinha de grãos residuais de urucum. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 2, p. 223-231, 2013.

SANTOS, F. S.; ARAÚJO, K. T. A.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M.; SANTIAGO, V. M. S. Cinética de secagem da casca da pitaya vermelha (*Hylocereus undatus*). In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 2., 2015, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: CONFEA/CREA. CD-ROM.

SANTOS JÚNIOR, H. C. M.; ROCHA, A. A.; BONFIM NETO, M. A.; REIS, L. C. C.; CHAVES, M. A. **Influência da temperatura sobre a cinética de secagem de maçã fuji.** In: CONGRESSO MINEIRO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS, 4., 2018, Lavras. **Anais...** Lavras: UFLA, 2018.

SANTOS, M. B.; CARDOSO, R. L.; FONSECA, A. A. O.; CONCEIÇÃO, M. N. Caracterização e qualidade de frutos de umbu-cajá (*Spondias tuberosa* X *S. mombin*) provenientes do recôncavo sul da Bahia. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 32, n. 4, p. 1089-1097, 2010.

SECRETI, L. C.; OSHIRO, A. M.; OLIVEIRA, V. S. Características físicas e químicas da polpa in natura da fruta noni (*Morinda citrifolia* L.). **Revista Eletrônica da Faculdade de Ciências Exatas e da Terra**, v. 4, n. 7, p. 1-8, 2015.

SILVA, C. R. L.; MEDEIROS, P. V. Q.; LEITE, G. A.; SILVA, K. J. P.; MENDONÇA, C. V.; SILVA, C. G. G. Caracterização do fruto de *Morinda citrifolia* L. (noni). **Revista Cubana de Plantas Medicinales**, v. 17, n. 1, p. 93-100, 2012.

SILVA, C. R. M.; NAVES, M. M. V. Suplementação de vitaminas na prevenção de câncer. **Revista Nutrire**, v. 14, n. 2, p. 135-43, 2001.

SILVA, D. C.; LIMA, M. F.; VÉLEZ, H. A. V.; SANTANA, A. A. Study of modeling cupuaçu pulp drying kinetic in biopolymers production. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, v. 4, n. 3, p. 49-57, 2017.

SILVA FILHO, E. D.; ALVES, G. S.; DUARTE, M. T. L.; MADUREIRA, I. A. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem da polpa da manga cv. Espada. **Revista Principia**, n. 31, p. 09-14, 2016.

SILVA FILHO, E. D.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M.; GUIMARÃES, M. K. A. Cinética de secagem em camada de espuma da polpa de manga cv. Haden. **Comunicata Scientiae**, v. 7, n. 3, p. 354-361, 2016.

SILVA, F. A. S.; AZEVEDO, C. A. V. The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. **African Journal Agriculture Research**, v. 11, n. 39, p. 3733-3740, 2016.

SILVA, L. M.; SOUSA, F. C.; CASTRO, D. S.; GOMES, J. P.; ALMEIDA, F. A. C. Estudo experimental da secagem de polpa de Achachairu em camada fina. **Gaia Scientia**, v. 9, n. 1, p. 151-155, 2015.

SILVA, L. R.; ALVES, R. E.; ARAGÃO, F. A. S.; SILVA, S. M.; MAIA, L. K.; NOGUEIRA, D. H. Qualidade de frutos de genótipos de umbu-cajazeiras (*Spondias* sp.) oriundos da microrregião de Iguatu, CE. **Scientia Plena**, v. 7, n. 8, p.1-7, 2011.

SILVA, M. I.; MARTINS, J. N.; ALVES, J. E. A.; COSTA, F. F. P. Caracterização físico-química da polpa de umbu em camada de espuma. **Revista Semiárido De Visu**, v. 3, n. 2, p. 82-91, 2015.

SILVA, N. M. C.; BONOMO, R. C. F.; RODRIGUES, L. B.; FONTAN, R. C. I.; BONOMO, P.; LANDIM, L. B.; SAMPAIO, V. S. Thermophysical characterization of genipap pulp. **International Journal of Food Engineering**, v. 6, n. 3, 2010.

SILVA, R. B.; SILVA, F. S.; PORTO, A. G.; ALVES, A. P. Estudo da cinética de secagem de polpa de carambola. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, v. 10, n. 2, p. 2069-2080, 2016.

SILVA, R. C.; ARAÚJO, K. T. A.; CORREIA, F. G.; SANTOS, F. S.; GOMES, J. P. Calor isostérico de sorção da semente de gergelim brs Seda. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 4., 2017, Belém. **Anais...** Belém, 2017. CD-ROM.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; GAMA, F. J. A.; GOMES, J. P. Mathematical models to describe thin-layer drying and to determine rate of whole bananas. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 13, n. 1, p. 67-74, 2014.

SINGH, R. P. Thermal diffusivity in food processing. **Food Technology**, v. 36, n. 2, p. 87-91, 1982.

SHAMSUDIN, R.; MOHAMED, I. O.; YAMAN, N. K. M. Thermophysical properties of Thai seedless guava juice as affected by temperature and concentration. **Journal of Food Engineering**, v. 66, n. 3, p. 395-399, 2005.

SHARMA, D. K.; THOMPSON, T. L. Specific heat and thermal conductivity of sorghum. **Transactions of the ASAE**, v. 16, n. 1, p. 114-117, 1973.

SIMÕES, M. R. **Propriedades termofísicas de polpa de manga**. 1997. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SOUSA, E. P.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M.; SILVA, L. M. M.; SOUSA, F. C. Caracterização físico-química da polpa de sapoti oriunda do estado do Ceará. **Revista Verde de Agrotecnologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 7, n. 1, p. 45-48, 2012.

SOUSA, E. P.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; SANTOS, J. E. A.; LEMOS, D. M. Thermophysical properties of the pequi pulp in diferente concentrations. **Bioscience Journal**, v. 32, n. 1, p. 20-28, 2016.

SOUSA, F. C.; MARTINS, J. J. A.; ROCHA, A. P. T.; GOMES, J. P.; PESSOA, T.; MARTINS, J. N. Predição de modelos sobre a cinética de secagem de folhas de Ziziphus joazeiro Mart. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v. 17, n. 2, p. 195-200, 2015.

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

SOUSA, F. C.; SILVA, L. M. M.; LEMOS, D. M.; MOREIRA, I. S.; LINS, A. D. F.; CASTRO, D. S.; ROCHA, A. P. T. Secagem de resíduos de *Spondias sp.* em camada fina. **Revista Agropecuária Técnica**, v. 36, n. 1, p. 197-202, 2015.

SOUSA, F. C.; SOUSA, E. P.; SILVA, L. M. M.; MARTINS, J. J. A.; GOMES, J. P.; ROCHA, A. P. T. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem de polpa de oiti. **Revista Educação Agrícola Superior**, v. 26, n. 2, p. 108-112, 2011.

SOUZA, M. A.; BONOMO, R. C. F.; FONTAN, R. C. I.; MINIM, L. A.; COIMBRA, J. S. R.; BONOMO, P. Thermophysical properties of umbu pulp. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 13, n. 3, p. 219-225, 2010.

SOUZA, M.; BONOMO, C. F.; FONTAN, R. C. I.; MINIM, L. A.; COIMBRA, J. S. R. Thermophysical properties of jackfruit pulp affected by changes in moisture content and temperature. **Journal of Food Process Engineering**, v. 34, n. 3, p. 580– 592, 2011.

SWEAT, V. E. Thermal properties of foods. In: RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H. **Engineering properties of foods**. New York: Marcel Dekker, 1986. p. 49-87.

TACO - **Tabela brasileira de composição de alimentos**. 4 ed. Campinas: NEPA/UNICAMP, 2011. 161 p.

TEIXEIRA, L. P.; ANDRADE, E. T.; SILVA, P. G. L. Determinação do equilíbrio higroscópico e do calor isostérico da polpa e da casca do abacaxi (*Ananas comosus*). **Engevista**, v. 14, p. 172-184, 2012.

TEIXEIRA, L. P.; ANDRADE, E. T. de; ESPÍNDOLA, J.; PEREIRA, R. G. Determinação do equilíbrio higroscópico e do calor isostérico do bagaço de cana-de-açúcar. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**, v. 35, n. 3, p. 555-566, 2015.

TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V. R. N.; GABAS, A. L.; YAMASHITA, F. Thermophysical properties of Brazilian orange juice as affected by temperature and water content. **Journal of Food Engineering**, v. 38, n. 1, p. 27-40, 1998.

TOLENTINO, S. M. A.; VIEIRA, L. P.; ARAÚJO, B. S.; SOARES, T. D.; BARRETO, C. L. R. Análises físico-químicas e compostos fenólicos do fruto do noni (*Morinda citrifolia* L.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA, 54., 2014, Natal. **Anais...** Natal: ABQ, 2014. CD-ROM.

VARGAS, P. O.; MATIAS, T. G.; GONÇALVES, L. T.; MUSSI, L. P.; PRATES, L. O.; PEREIRA, N. R. Cinética de secagem de diferentes frutas com ar quente combinado com micro-ondas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 21., 2016, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ABEQ/UFC, 2016. CD-ROM.

VIEIRA, J. A. G. **Propriedades termofísicas e convecção no escoamento laminar em tubos de suco de laranja.** 1996. 90 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos). Faculdade de Engenharia de Alimentos – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

VILLA-VELEZ, H. A.; TELIS-ROMERO, J.; HIGUITA, D. M. C.; TELIS, V. R. N. Effect of maltodextrin on the freezing point and thermal conductivity of uvaia pulp (*Eugenia piriformis* Cambess). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 36, n.1, p. 78-85, 2012.

VILLELA, F. A.; SILVA, W. R. Curvas de secagem de sementes de milho utilizando o método intermitente. **Scientia Agrícola**, v. 49, n. 1, p. 145-153, 1992.

WANG, M. Y.; OESTE, B. J.; JENSEN, C. J.; NOWICKI, D.; SU, C.; PALU, A. K.; ANDERSON, G. *Morinda citrifolia* (Noni): A literature review and recent advances in Noni research. **Acta Pharmacologica Sinica**, v. 23, n. 12, p. 1127-1141, 2002.

WANG, M. Y.; SU, C. Cancer prevenite effect of *Morinda citrifolia* (Noni). **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 952, p. 161-168, 2001.

WANG, N.; BRENNAN, J. G. Moisture sorption isotherm characteristics of potato at four temperatures. **Journal of Food Engineering**, v. 14, p. 269-287, 1991.

ZABALAGA, R. F.; FUENTE, C. I. A. La; TADINI, C. C. Experimental determination of thermophysical properties of unripe banana slices (*Musa cavendishii*) during convective drying. **Journal of Food Engineering**, v. 187, p.62-69, 2016.

ZUNIGA, A. D. G.; RIBEIRO, L. Modelagem matemática da cinética das curvas de secagem da amêndoa do baru (*Dipteryx alata*). **Proceeding Series of the Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics**, v. 3, n. 1, p. 1-2, 2015.

APÊNDICE A

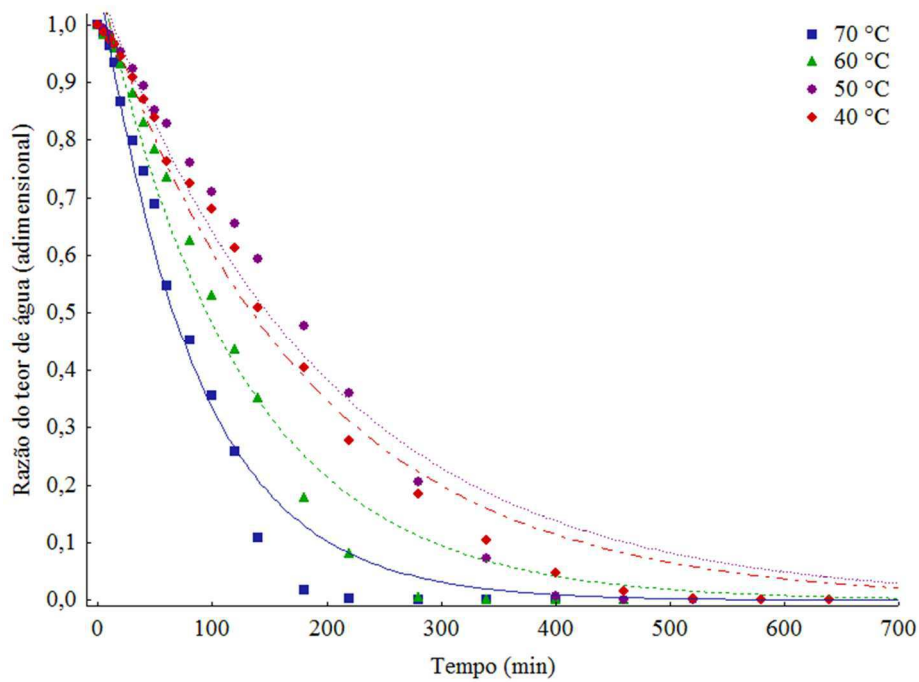


Figura A.1 – Curvas de cinética de secagem da polpa combinada C₁ (25% noni + 75% umbu) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C com ajustes pelo modelo de Henderson e Pabis

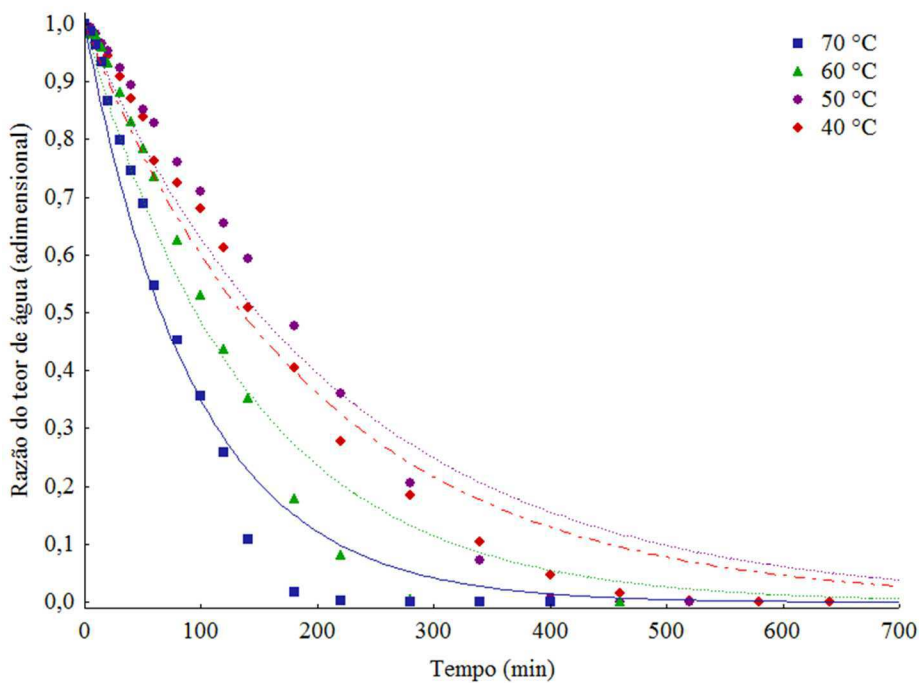


Figura A.2 – Curvas de cinética de secagem da polpa combinada C₁ (25% noni + 75% umbu) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C com ajustes pelo modelo de Exponencial Dois Termos

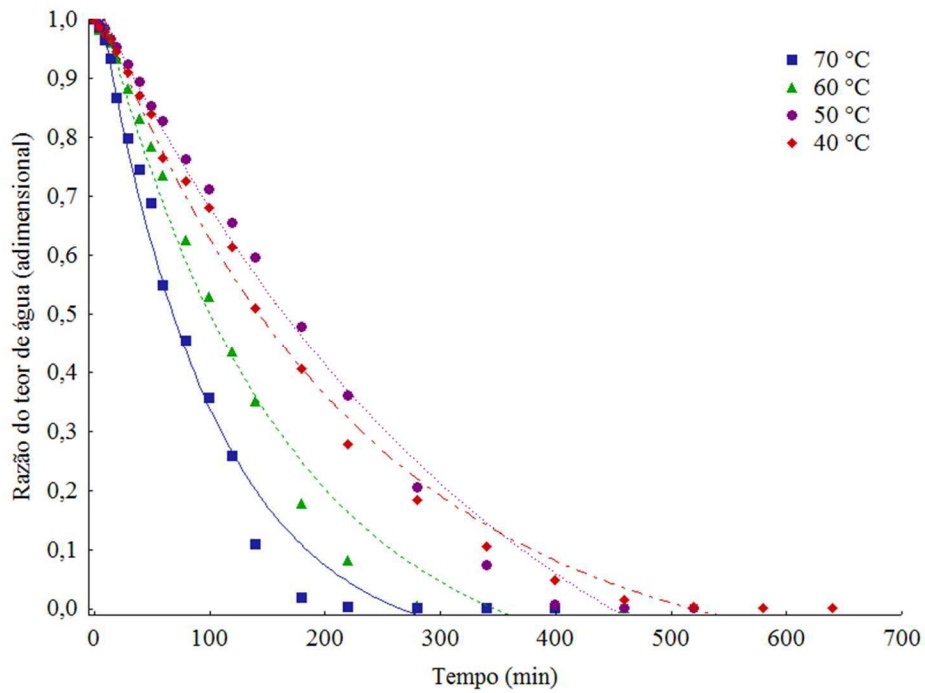


Figura A.3 – Curvas de cinética de secagem da polpa combinada C₁ (25% noni + 75% umbu) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C com ajustes pelo modelo de Logarítmico

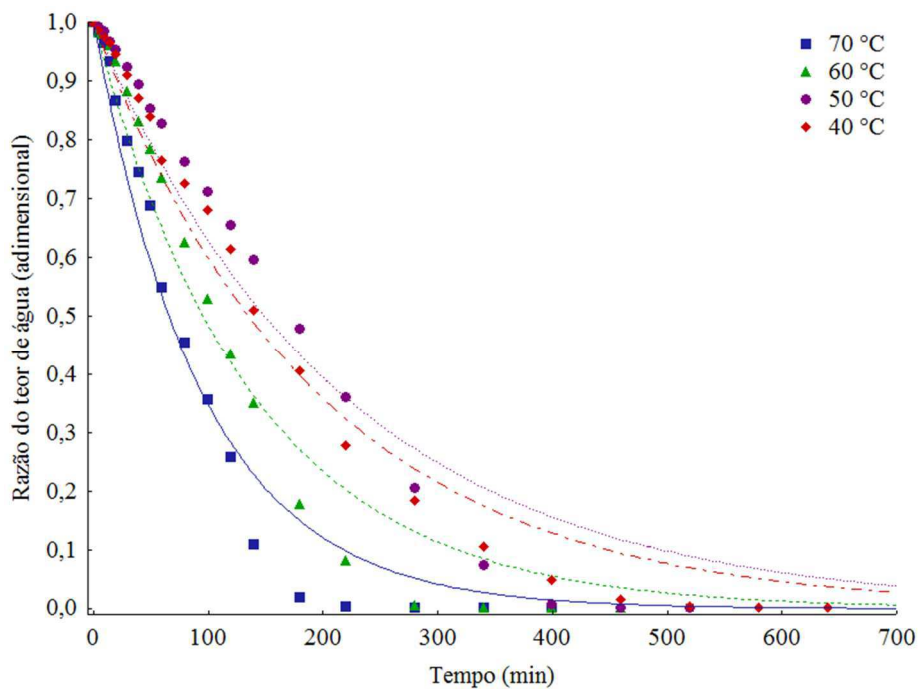


Figura A.4 – Curvas de cinética de secagem da polpa combinada C₁ (25% noni + 75% umbu) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C com ajustes pelo modelo de Newton

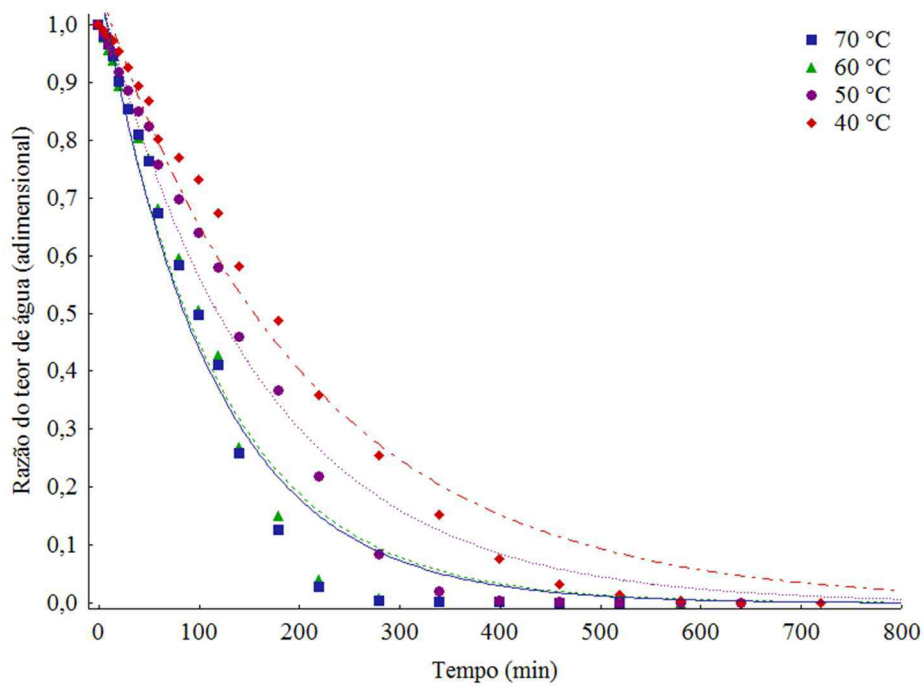


Figura A.5 – Curvas de cinética de secagem da polpa combinada C₂ (50% noni + 50% umbu) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C com ajustes pelo modelo de Henderson e Pabis

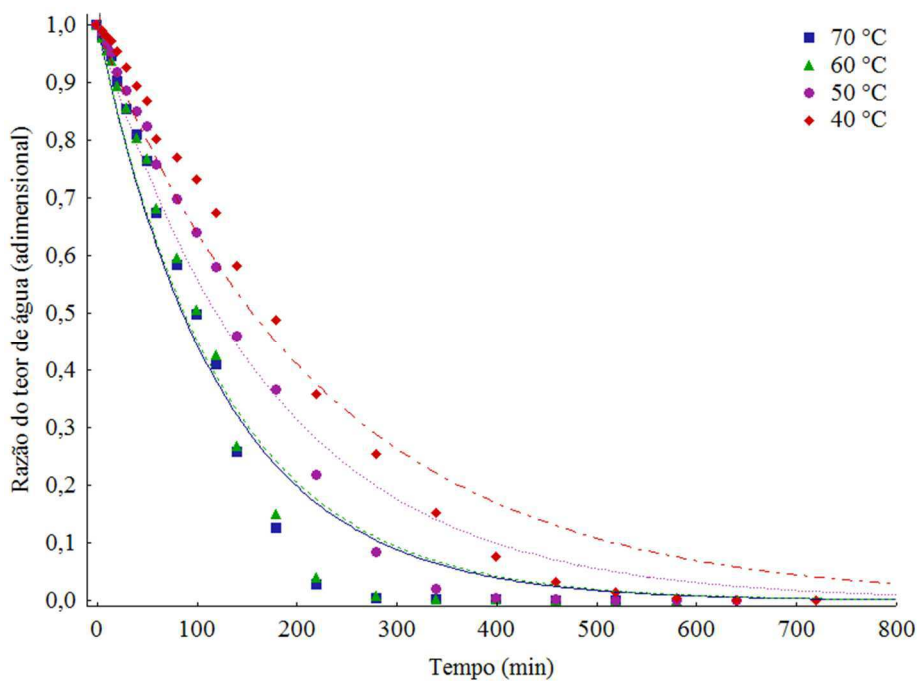


Figura A.6 – Curvas de cinética de secagem da polpa combinada C₂ (50% noni + 50% umbu) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C com ajustes pelo modelo de Exponencial Dois Termos

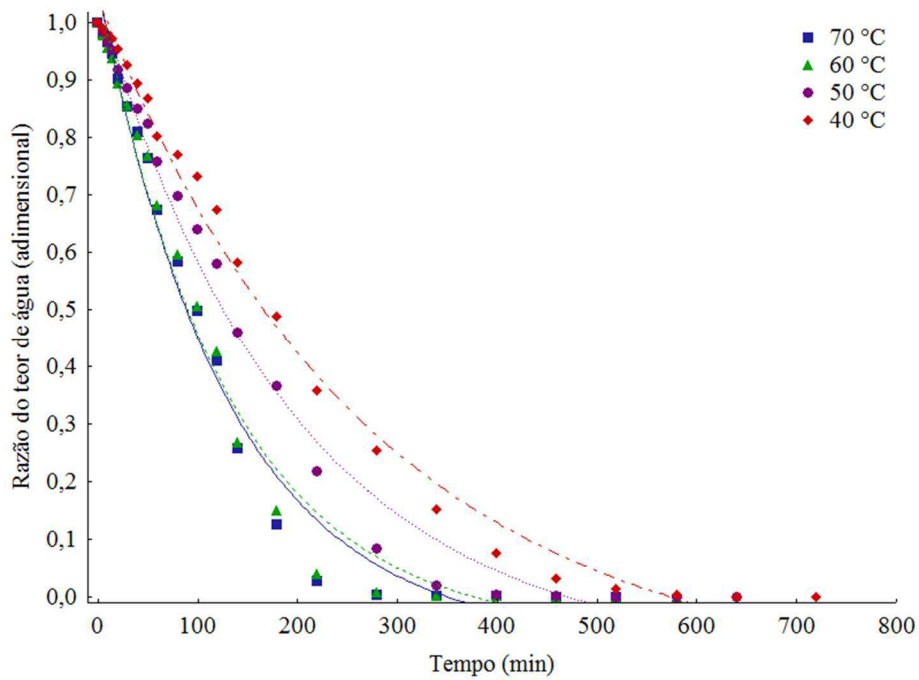


Figura A.7 – Curvas de cinética de secagem da polpa combinada C₂ (50% noni + 50% umbu) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C com ajustes pelo modelo de Logarítmico

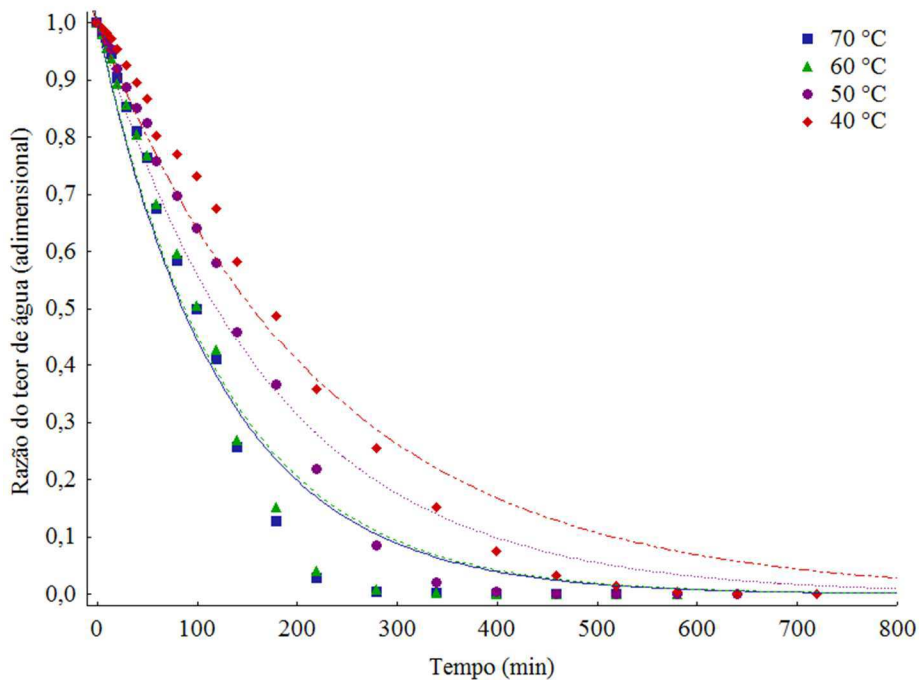


Figura A.8 – Curvas de cinética de secagem da polpa combinada C₂ (50% noni + 50% umbu) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C com ajustes pelo modelo de Newton

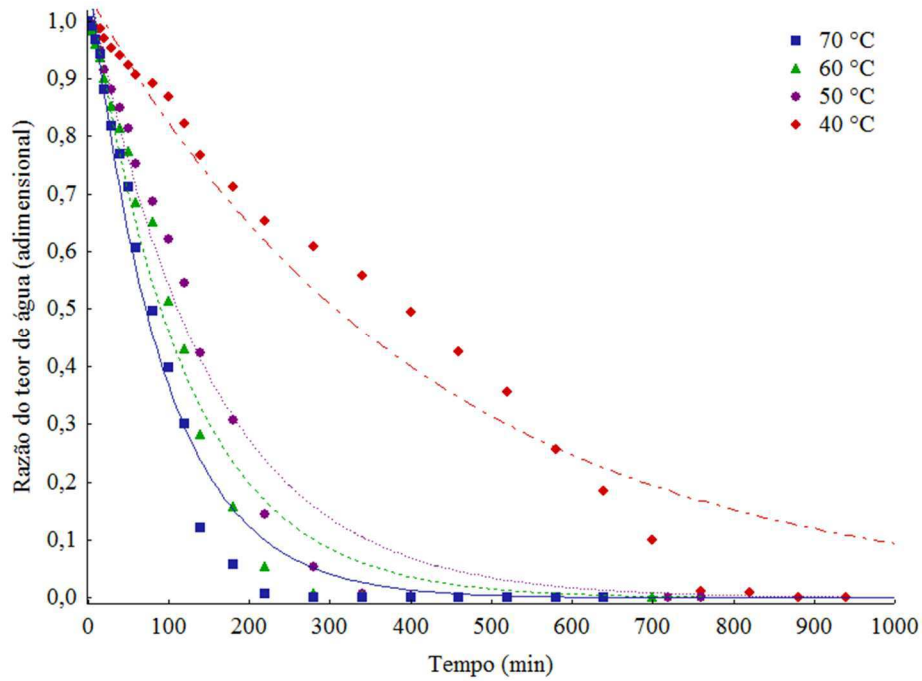


Figura A.9 – Curvas de cinética de secagem da polpa combinada C₃ (75% noni + 25% umbu) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C com ajustes pelo modelo de Henderson e Pabis

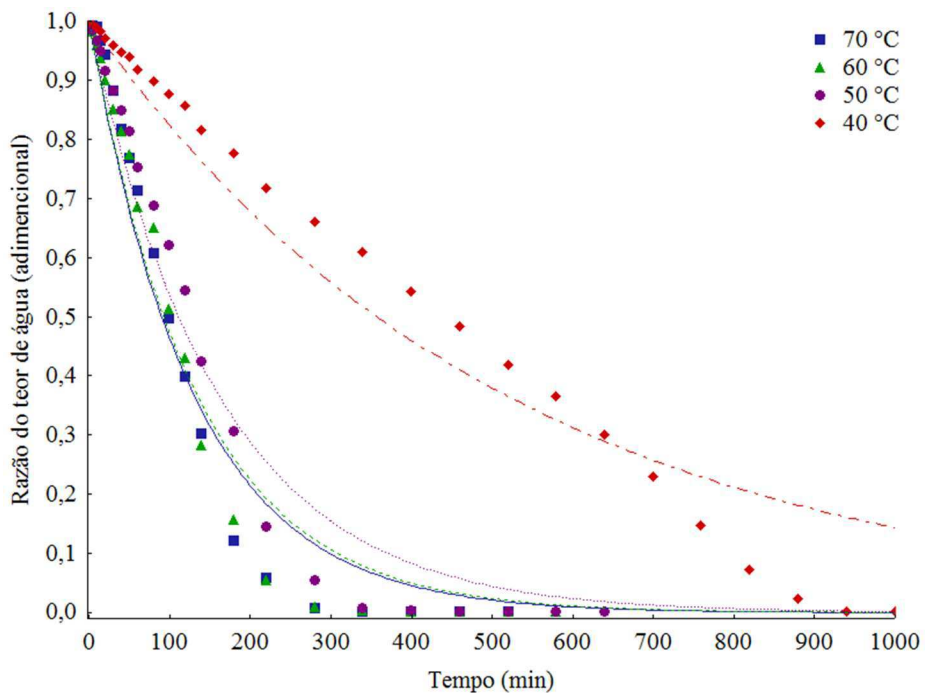


Figura A.10 – Curvas de cinética de secagem da polpa combinada C₃ (75% noni + 25% umbu) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C com ajustes pelo modelo de Exponencial Dois Termos

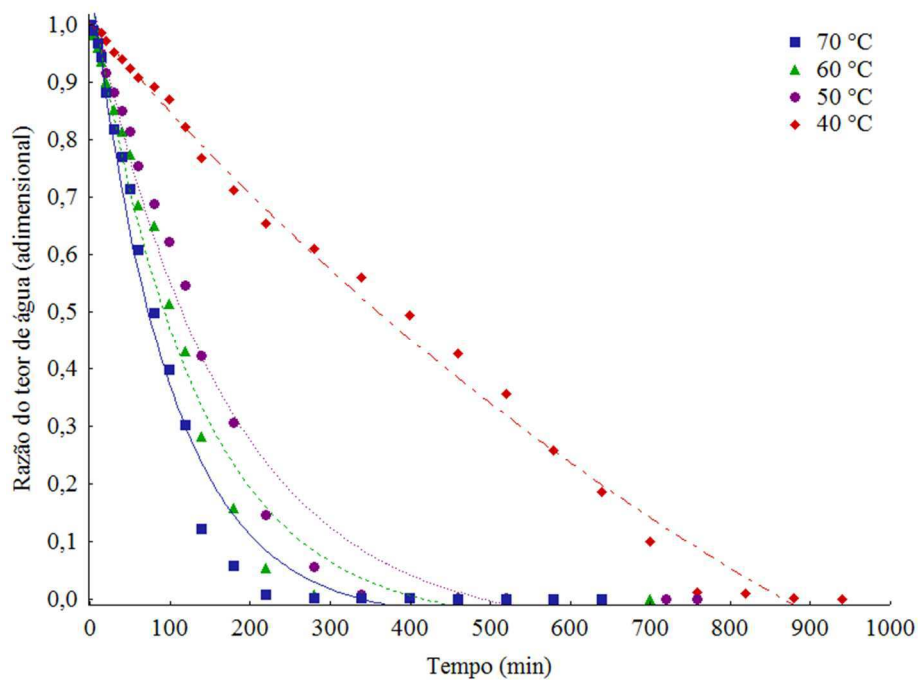


Figura A.11 – Curvas de cinética de secagem da polpa combinada C₃ (75% noni + 25% umbu) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C com ajustes pelo modelo de Logarítmico

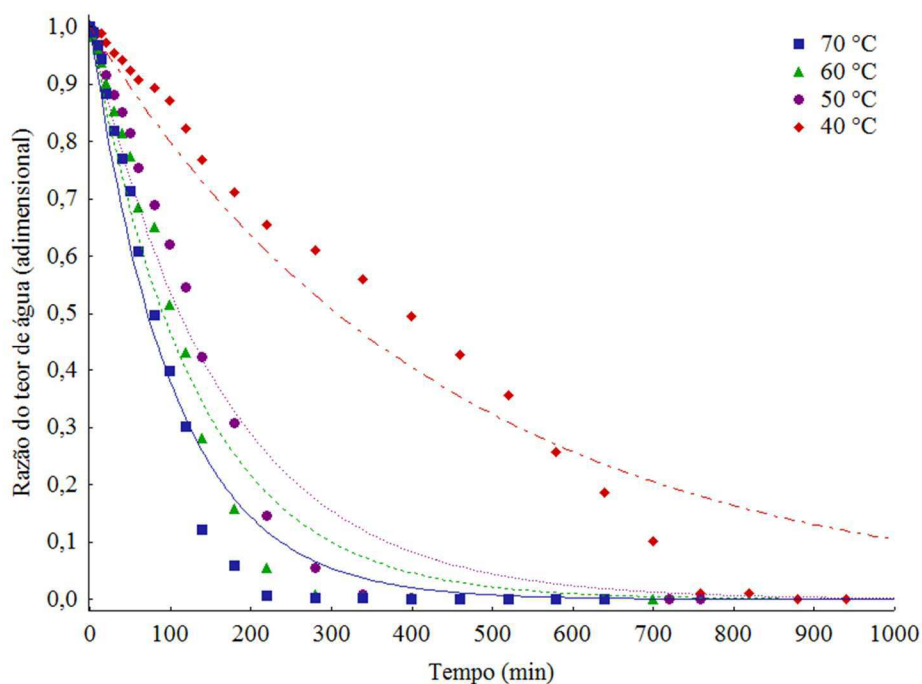


Figura A.12 – Curvas de cinética de secagem da polpa combinada C₃ (75% noni + 25% umbu) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C com ajustes pelo modelo de Newton