

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E  
TECNOLOGIA GOIANO – IF GOIANO - *CAMPUS* RIO VERDE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM CIÊNCIAS  
AGRÁRIAS - AGRONOMIA

HIGROSCOPICIDADE, CINÉTICA DE SECAGEM,  
PROPRIEDADES MECÂNICAS E TERMODINÂMICAS DOS  
FRUTOS DE BARU (*Dipteryx alata* Vogel)

Autor: Daniel Emanuel Cabral de Oliveira  
Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Resende

RIO VERDE – GO

Março – 2016

HIGROSCOPICIDADE, CINÉTICA DE SECAGEM,  
PROPRIEDADES MECÂNICAS E TERMODINÂMICAS DOS  
FRUTOS DE BARU (*Dipteryx alata* Vogel)

Autor: Daniel Emanuel Cabral de Oliveira  
Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Resende

Tese apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de DOUTOR EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS - AGRONOMIA, ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Ciências Agrárias - Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – *Campus* Rio Verde - Área de Concentração Ciências Agrárias

Rio Verde – GO  
Março – 2016

O48h

Oliveira, Daniel Emanuel Cabral de.

Higroscopicidade, cinética de secagem, propriedades mecânicas e termodinâmicas dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel). / Daniel Emanuel Cabral de Oliveira – Rio Verde – 2016.  
97 f.: il.;

Tese (Doutorado em Ciências Agrárias - Agronomia) - Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia Goiano, *Campus* Rio Verde - 2016.

Orientador: Dr. Osvaldo Resende

#### Bibliografia

1. Baru-secagem. 2. Baru-higroscopicidade 3. Baru-Propriedades Termodinâmicas. I. Título. II. Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia Goiano, *Campus* Rio Verde.

CDD: 633.15

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

**ESTUDO DO PRÉ-PROCESSAMENTO DOS FRUTOS DE  
BARU (*Dipteryx alata* Vogel)**

Autor: Daniel Emanuel Cabral de Oliveira  
Orientador: Osvaldo Resende

TITULAÇÃO: Doutor em Ciências Agrárias-Agronomia - Área de  
Concentração em Produção Vegetal Sustentável no Cerrado

APROVADA em 03 de março de 2016.

Prof. Dr. Valdiney Cambuy  
Siqueira  
Avaliador externo  
UFMS – Dourados

Prof. Dr. José Henrique da Silva  
Taveira  
Avaliador externo  
UEG – Santa Helena

Prof. Dr. Marconi Batista  
Teixeira  
Avaliador interno  
IF Goiano – *Campus* Rio  
Verde

Dr. Gessimar Nunes Camelo  
Avaliador interno  
PNPD IF Goiano – *Campus* Rio Verde

Prof. Dr. Osvaldo Resende  
Presidente da banca  
IF Goiano – *Campus* Rio Verde

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Doutor Osvaldo Resende, pelos ensinamentos, paciência, confiança, amizade, pela dedicação à minha formação, acima de tudo pela compreensão, prontidão em atender às minhas solicitações e, especialmente, pelo grande auxílio na orientação e conclusão deste trabalho, enfim, obrigado simplesmente por ter acreditado e apostado em mim.

Aos Doutores Valdiney Cambuy Siqueira, Gessimar Nunes Camelo, José Henrique da Silva Taveira e Marconi Batista Teixeira, pelas correções e sugestões da tese e participação na comissão julgadora.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – *Campus* Rio Verde, pelas contribuições e auxílio na minha formação profissional.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – *Campus* Iporá e a todos os colegas, por todo apoio.

À Universidade Federal do Mato Grosso – *Campus* Sinop e a todos colegas, por todo apoio.

Um agradecimento a todos os colegas do mestrado e doutorado do Laboratório de Pós-Colheita de Produtos Vegetais, por termos compartilhado experiências e aprendizados durante essa trajetória.

Ao Laboratório de Sementes do IF Goiano – *Campus* Rio Verde, que proporcionou condições para elaboração deste estudo, e à minha coorientadora Juliana de Fátima Sales, pela atenção e disponibilidade quando solicitada para as discussões científicas.

Ao Laboratório de Sementes da UEG – Câmpus Anápolis, que proporcionou condições para elaboração deste estudo, e ao professor Ivano Alessandro Devilla, pela atenção e disponibilidade.

Ao CNPq, FAPEG e à Capes, pelo apoio financeiro.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – *Campus* Rio Verde, pela oportunidade de aperfeiçoamento.

Muito Obrigado!!!

## BIOGRAFIA DO AUTOR

DANIEL EMANUEL CABRAL DE OLIVEIRA, filho de André Luiz de Oliveira e Terezinha Cabral Firmino de Oliveira, nascido em Santa Helena de Goiás, Goiás, no dia 21 de julho de 1988. Em 2006, ingressou nos cursos de graduação pelo IF Goiano – *Campus* Rio Verde e na Universidade Estadual de Goiás – Unidade Santa Helena de Goiás, em Tecnologia em Agronegócios e Engenharia Agrícola, concluídos em 2009 e 2010, respectivamente. Em fevereiro de 2011, iniciou-se no Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Ciências Agrárias, fazendo a pesquisa para a dissertação de mestrado na área de pós-colheita em armazenamento e secagem de produtos vegetais. Concluiu em 29 de agosto de 2012 com a defesa da dissertação “Estudo da secagem artificial e do reumedecimento com ar natural em sementes de milho”. Em setembro de 2013, iniciou o doutorado no Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Ciências Agrárias - Agronomia. Concluiu em 03 de março de 2016 com a defesa da tese “Higroscopicidade, cinética de secagem, propriedades mecânicas e termodinâmicas dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel)”.

À minha esposa Caroline Alves Martins de Oliveira, o grande amor da minha vida. À minha mãe Terezinha Cabral Firmino de Oliveira e a meu pai André Luiz de Oliveira, exemplos de caráter, dedicação, sabedoria e amor. Às minhas irmãs Daniela Cabral de Oliveira e Adriela Firmino de Oliveira, por todo amor, solidariedade e por acreditarem e se orgulharem de mim.

**Dedico**

## ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE TABELAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIATURAS E UNIDADES.....	xiv
RESUMO.....	xvii
ABSTRACT.....	xix
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
1 Baru.....	1
2 Secagem.....	2
3 Higroscopicidade.....	3
4 Propriedades mecânicas.....	5
5 Referências bibliográficas.....	6
OBJETIVO GERAL.....	11
CAPÍTULO 1. ISOTERMAS DOS FRUTOS DE BARU ( <i>Dipteryx alata</i> Vogel).....	12
Resumo.....	12
Abstract.....	12
Introdução.....	13
Material e métodos.....	14
Resultados e discussão.....	17
Conclusões.....	22
Referências bibliográficas.....	22
CAPÍTULO 2. PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DOS FRUTOS DE BARU ( <i>Dipteryx alata</i> Vogel).....	25
Resumo.....	25
Abstract.....	25
Introdução.....	26

Material e métodos.....	27
Resultados e discussão.....	32
Conclusões.....	42
Referências bibliográficas.....	43
<b>CAPÍTULO 3. CINÉTICA DE SECAGEM DOS FRUTOS DE BARU</b> <i>(Dipteryx alata Vogel)</i> .....	46
Resumo.....	46
Abstract.....	46
Introdução.....	47
Material e métodos.....	48
Resultados e discussão.....	52
Conclusões.....	61
Referências bibliográficas.....	61
<b>CAPÍTULO 4. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS FRUTOS DE BARU</b> <i>(Dipteryx alata Vogel)</i> .....	64
Resumo.....	64
Abstract.....	64
Introdução.....	65
Material e métodos.....	66
Resultados e discussão.....	68
Conclusões.....	77
Referências bibliográficas.....	78
<b>CAPÍTULO 5. EFEITOS DA SECAGEM NA COLORAÇÃO DOS FRUTOS</b> <b>DE BARU</b> <i>(Dipteryx alata Vogel)</i> .....	80
Resumo.....	80
Abstract.....	80
Introdução.....	81
Material e métodos.....	82
Resultados e discussão.....	84
Conclusões.....	93
Referências bibliográficas.....	93
<b>CONCLUSÃO GERAL</b> .....	96

## ÍNDICE DE TABELAS

### CAPÍTULO 1

Tabela 1. Valores das umidades relativas (%) estabelecidas no interior dos dessecadores para determinação do equilíbrio higroscópico, pelo método estático-gravimétrico.....	15
Tabela 2. Modelos matemáticos utilizados para prever o fenômeno de higroscopicidade de produtos vegetais.....	16
Tabela 3. Parâmetros dos modelos ajustados aos teores de água de equilíbrio higroscópico para os frutos de baru ( <i>Dipteryx alata</i> Vogel), com seus respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ , %), erros médios estimado (SE, decimal) e relativo (P, %), <i>Qui</i> -quadrado ( $\chi^2$ , decimal) e tendência de distribuição dos resíduos.....	18

### CAPÍTULO 2

Tabela 1. Valores de atividade de água (decimal) estimados pelo modelo de Halsey Modificado em função da temperatura e do teor de água de equilíbrio.....	33
Tabela 2. Relações entre $L/L'$ para os diferentes teores de água dos frutos de baru ( <i>Dipteryx alata</i> Vogel).....	34
Tabela 3. Parâmetros “a”, “b” e “m” utilizados para o cálculo da relação entre o calor latente de vaporização da água de produtos agrícolas e o calor latente da água livre ( $L/L'$ ).....	34
Tabela 4. Equações e coeficientes de determinação de entalpia ( $h_{st}$ ) e entropia diferencial (S) de dessecção dos frutos de baru ( <i>Dipteryx alata</i> Vogel).....	39

Tabela 5. Temperatura isocinética para o processo de dessecção dos frutos de baru ( <i>Dipteryx alata</i> Vogel).....	40
Tabela 6. Energia livre de Gibbs em função do teor de água dos frutos de baru ( <i>Dipteryx alata</i> Vogel).....	41
Tabela 7. Equações da energia livre de Gibbs para as diversas temperaturas.....	42

### CAPÍTULO 3

Tabela 1. Modelos matemáticos utilizados para prever a secagem de produtos vegetais.....	50
Tabela 2. Valores para o teste de <i>Qui</i> -quadrado ( $\chi^2$ , decimal $\times 10^{-4}$ ) e erro médio estimado (SE, decimal) calculados para os onze modelos utilizados na representação da cinética de secagem dos frutos de baru ( <i>Dipteryx alata</i> Vogel).....	54
Tabela 3. Coeficientes de determinação ( $R^2$ , %) e erro médio relativo (P, %) para os modelos analisados, durante a secagem dos frutos de baru ( <i>Dipteryx alata</i> Vogel) nas diversas condições de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ).....	55
Tabela 4. Parâmetros dos modelos Thompson, Midilli, Logarítmico, Dois Termos e Aproximação da Difusão, ajustados para as diferentes condições de secagem dos frutos de baru ( <i>Dipteryx alata</i> Vogel), com a respectiva equação em função da temperatura.....	56
Tabela 5. Valores de entalpia (H, $\text{J mol}^{-1}$ ), entropia (S, $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) e energia livre de Gibbs (G, $\text{J mol}^{-1}$ ) para diferentes condições de ar de secagem dos frutos de baru ( <i>Dipteryx alata</i> Vogel).....	60

### CAPÍTULO 4

Tabela 1. Valores médios dos raios de curvatura dos frutos de baru ( <i>Dipteryx alata</i> Vogel) ( $\times 10^{-3}$ m) para cada posição e teor de água.....	69
Tabela 2. Equações ajustadas aos valores experimentais do módulo proporcional de deformidade dos frutos de baru ( <i>Dipteryx alata</i> Vogel) ( $E_p$ ) em função do teor de água (X) e da deformação (D), para as temperaturas de secagem.....	71
Tabela 3. Parâmetros do modelo do linear ajustado para a força de ruptura dos frutos de baru ( <i>Dipteryx alata</i> Vogel) nas diferentes condições de secagem.....	73

Tabela 4. Teste das hipóteses (Ho) utilizando o teste de <i>Qui</i> -quadrado para a força de ruptura dos frutos de baru ( <i>Dipteryx alata</i> Vogel).....	75
Tabela 5. Equações ajustadas aos valores experimentais de força de ruptura dos frutos de baru ( <i>Dipteryx alata</i> Vogel) (Fr) em função do teor de água (Ta), para as temperaturas de secagem.....	77

## CAPÍTULO 5

Tabela 1. Resumo da análise de variância para as coordenadas “L”, “a”, “b”, croma (Cr), ângulo hue (°h) e diferença total de cor ( $\Delta E$ ) dos frutos de baru ( <i>Dipteryx alata</i> Vogel) submetidos a diferentes temperaturas de secagem.....	85
Tabela 2. Equações ajustadas aos valores experimentais das coordenadas “L”, “b” e croma (Cr) dos frutos de baru ( <i>Dipteryx alata</i> Vogel) submetidos a diferentes temperaturas de secagem.....	86
Tabela 3. Teste das hipóteses (Ho) utilizando o teste de <i>Qui</i> -quadrado para o croma (Cr) e as coordenada “L” e “b” dos frutos de baru ( <i>Dipteryx alata</i> Vogel).....	87
Tabela 4. Valores médios do ângulo hue (°h) e da diferença total de cor ( $\Delta E$ ) dos frutos de baru ( <i>Dipteryx alata</i> Vogel), em função da temperatura de secagem.....	93

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1

- Figura 1. Exemplos de tendências de distribuição dos resíduos para os modelos de Halsey Modificado – aleatório e Henderson Modificado – tendencioso, em função dos valores estimados do equilíbrio higroscópico dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel).....20
- Figura 2. Valores experimentais do teor de água de equilíbrio e isotermas de dessorção estimadas pelo modelo de Halsey Modificado para os frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel), em diferentes condições de temperatura e atividades de água.....21

### CAPÍTULO 2

- Figura 1. Valores experimentais e estimados do calor latente de vaporização da água em função do teor de água de equilíbrio para os frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel).....35
- Figura 2. Curvas do logaritmo neperiano da atividade de água (decimal), para específicos valores de teor de água de equilíbrio (% b.s.), em função de valores de  $1/T_{abs}$  para os frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel).....36
- Figura 3. Valores experimentais e estimados do calor isostérico integral de dessorção em função do teor de água de equilíbrio para os frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel).....37
- Figura 4. Valores observados e estimados de entalpia e entropia diferencial de dessorção dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel).....38
- Figura 5. Relação entalpia-entropia para o processo de dessorção da água dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel).....39

### CAPÍTULO 3

Figura 1. Razão de teor de água dos frutos de baru ( <i>Dipteryx alata</i> Vogel) ao longo do tempo de secagem em quatro condições de temperatura.....	53
Figura 2. Valores dos teores de água experimentais e estimados pelo modelo do Logarítmico para a secagem dos frutos de baru ( <i>Dipteryx alata</i> Vogel), nas diversas condições de temperatura.....	57
Figura 3. Coeficiente de difusão efetivo obtido para a secagem dos frutos de baru ( <i>Dipteryx alata</i> Vogel) nas temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C.....	58
Figura 4. Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo em função da temperatura do ar de secagem, obtido durante a secagem dos frutos de baru ( <i>Dipteryx alata</i> Vogel).....	59

### CAPÍTULO 4

Figura 1. Orientação dos frutos de baru ( <i>Dipteryx alata</i> Vogel) durante o ensaio de compressão na posição natural de repouso.....	67
Figura 2. Raio de curvatura dos frutos na região de contato entre o fruto e a placa de compressão.....	68
Figura 3. Valores médios da força máxima de compressão para as temperaturas de secagem de 60 (A), 80 (B) e 100 (C) °C, em função do teor de água para as deformações de $1 \times 10^{-3}$ ; $2 \times 10^{-3}$ ; $3 \times 10^{-3}$ ; $4 \times 10^{-3}$ ; $5 \times 10^{-3}$ ; $6 \times 10^{-3}$ e $7 \times 10^{-3}$ m.....	70
Figura 4. Valores médios do módulo proporcional de deformidade ( $E_p$ ) dos frutos de baru ( <i>Dipteryx alata</i> Vogel), em função do teor de água e da deformação para as temperaturas de secagem de 60 (A), 80 (B) e 100 (C) °C.....	72
Figura 5. Valores médios da força de ruptura em função do teor de água, para os frutos de baru ( <i>Dipteryx alata</i> Vogel) para as temperaturas de secagem.....	76

### CAPÍTULO 5

Figura 1. Representação esquemática do sistema de coordenadas de Hunter para avaliação de cor.....	83
----------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Figura 2. Valores médios da coordenada “L” dos frutos de baru ( <i>Dipteryx alata</i> Vogel), em função do teor de água e das temperaturas de secagem.....	89
Figura 3. Valores médios da coordenada “b” e do croma (Cr) dos frutos de baru ( <i>Dipteryx alata</i> Vogel), em função do teor de água e das temperaturas de secagem.....	90
Figura 4. Valores médios da coordenada “a” e do ângulo hue (°h) dos frutos de baru ( <i>Dipteryx alata</i> Vogel), em função do teor de água.....	91
Figura 5. Valores médios da diferença total de cor ( $\Delta E$ ) dos frutos de baru ( <i>Dipteryx alata</i> Vogel), em função do teor de água.....	92

## LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIATURAS E UNIDADES

$a_w$ .....	Atividade de água
A.....	Comprimento
B.....	Largura
B.O.D. ....	Biochemical oxygen demand
C.....	Espessura
X .....	Teor de água do produto
$X_e$ .....	Teor de água de equilíbrio do produto
$X_i$ .....	Teor de água inicial do produto
%.....	Porcentagem
&.....	Ampersand (e comercial)
a, b, c, n, m.....	Parâmetros dos modelos
b.s.....	Base seca
Capes.....	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
cm.....	Centímetro
CNPq.....	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
Cr.....	Croma
CV.....	Coefficiente de Variação
D .....	Coefficiente de difusão efetivo
$D_o$ .....	Fator pré-exponencial
E.....	Módulo de deformidade
$E_a$ .....	Energia de ativação
Eq.....	Equação
$E_p$ .....	Módulo proporcional de deformidade
et al.....	E outros, e colaboradores

F.....	Força
g.....	Gramas
GLR.....	Graus de liberdade do modelo
h.....	Horas
$h_p$ .....	Constante de Planck
$k, k_o, k_1$ : .....	Constantes de secagem
$k_B$ .....	Constante de Boltzmann
kg.....	Quilograma
$\text{kJ mol}^{-1}$ .....	Quilojoule por Mol
L.....	Calor latente de vaporização da água do produto
$L'$ .....	Calor latente de vaporização da água livre
L, a e b.....	Coordenadas determinadas pelo calorímetro
m.....	Metros
mL.....	Mililitro
mm.....	Milímetro
N .....	Número de observações experimentais
<sup>ns</sup> .....	Não significativo
$n_t$ .....	Número de termos
n.....	Número de observações experimentais
°C.....	Graus celsius
p.....	Página
P.....	Erro médio relativo
$P_{vs}$ .....	Pressão de vapor de saturação da água livre
$P_v$ .....	Pressão de vapor da água livre
$P\Omega$ .....	Número de parâmetros do modelo completo
$P_{w_i}$ .....	Número de parâmetros do modelo com restrição
$Q_{st}$ .....	Calor isostérico integral de sorção
r.....	Raio equivalente
R.....	Constante universal dos gases
R e r.....	Raios de curvatura no ponto de contato
$R^2$ .....	Coefficiente de determinação
RX .....	Razão de teor de água do produto
s.....	Segundos

$S$ .....	Área da superfície do produto
$SE$ .....	Erro médio estimado
$SQR_{\Omega}$ .....	Soma dos quadrados residuais do modelo completo
$SQR_{W_i}$ .....	Soma dos quadrados residuais do espaço paramétrico restrito
$t$ .....	Tempo
$T$ .....	Temperatura
$T_{abs}$ .....	Temperatura absoluta
$T_B$ .....	Temperatura isocinética
$T_{hm}$ .....	Média harmônica da temperatura
$U^*$ .....	Teor de água do produto
$UR$ .....	Umidade relativa
$V_f$ .....	Volume do fruto
$Y$ .....	Valor observado experimentalmente
$\hat{Y}$ .....	Valor estimado pelo modelo
$\chi^2$ .....	<i>Qui</i> -quadrado
$\Delta E$ .....	Diferença total de cor
$\lambda_n$ .....	Raízes da equação de Bessel de ordem zero
$H$ .....	Entalpia
$S$ .....	Entropia
$G$ .....	Energia livre de Gibbs
$G_B$ .....	Energia livre de Gibbs à temperatura isocinética
$h_{st}$ .....	Entalpia diferencial
$\bar{h}_{st}$ .....	Entalpia média
$\bar{S}$ .....	Entropia média
$\mu$ .....	Razão de Poisson
$\nu$ .....	Graus de liberdade do modelo
$^{\circ}h$ .....	Ângulo hue

## RESUMO

OLIVERA, Daniel Emanuel Cabral de D.S., Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Março de 2016. **Higroscopicidade, cinética de secagem, propriedades mecânicas e termodinâmicas dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel)**. Orientador: Dr. Osvaldo Resende.

Tendo em vista a crescente demanda por informações a respeito dos frutos nativos do cerrado, objetivou-se, neste trabalho, estudar a higroscopicidade, secagem, propriedades mecânicas e termodinâmicas e a cor dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel). Para obtenção do teor de água de equilíbrio higroscópico, foi utilizado o método estático-gravimétrico. A cinética de secagem foi feita nas temperaturas, 40; 60; 80 e 100 °C. Para o ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais de secagem e higroscopicidade, foi feita análise de regressão não linear pelo método Gauss-Newton. Para determinar o grau de ajuste dos modelos matemáticos de secagem e higroscopicidade, foram considerados a significância dos parâmetros de regressão pelo teste t, adotando o nível de 5% de significância, a magnitude do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), os valores do erro médio relativo (P) e do erro médio estimado (SE) e o teste de *Qui*-quadrado ( $\chi^2$ ). Para os dados de higroscopicidade, também foi utilizada a análise da distribuição de resíduos. As propriedades mecânicas foram avaliadas pela determinação da força máxima de compressão para deformações fixas e pelo módulo proporcional de deformidade dos frutos submetidos à compressão em posição de repouso, determinando-se a força de ruptura necessária para o rompimento do epicarpo dos frutos após a secagem nas temperaturas de 60, 80 e 100 °C. Para determinar as propriedades termodinâmicas dos frutos de baru, foi utilizado o modelo de Halsey Modificado e determinados o calor latente de vaporização, calor isostérico integral,

entalpia diferencial, entropia diferencial, teoria da compensação e a energia livre de Gibbs. A avaliação da cor dos frutos de baru foi feita pela leitura direta de refletância das coordenadas “L”, “a” e “b”, empregando o calorímetro ColorFlex EZ com o sistema Hunter de cor. Assim, foram determinados os valores de croma (Cr), ângulo de cor hue ( $^{\circ}h$ ) e a diferença total de cor ( $\Delta E$ ). Concluiu-se que as isotermas de dessecção dos frutos de baru na faixa de temperatura de 20 a 35 °C tomaram o formato sigmoidal, típico de produtos agrícolas. Os modelos Copace, Oswin, GAB, Halsey Modificado e Sigma Copace foram recomendados para determinar a higroscopicidade dos frutos de baru. O tempo de secagem ficou reduzido com o aumento da temperatura, sendo de 266,3 horas para a temperatura de 40 °C e de 22,8 horas para a temperatura de 100 °C. Os modelos de Thompson, Midilli, Logarítmico, Dois Termos e Aproximação da Difusão são adequados para representar a secagem dos frutos de baru. A energia de ativação foi de 37,64 kJ mol<sup>-1</sup>. A entalpia e a entropia decrescem, enquanto a energia livre de Gibbs aumenta com o incremento da temperatura de secagem. As propriedades termodinâmicas são influenciadas pelo teor de água dos frutos de baru, ocorrendo aumento da energia necessária para a retirada de água do produto pela redução do teor de água. O calor isostérico integral, calor latente de vaporização, a entalpia, a entropia e a energia livre de Gibbs aumentam com a redução do teor de água dos frutos de baru, sendo o processo de dessecção controlado pela entalpia. A energia livre de Gibbs é positiva para as temperaturas e aumenta ao longo do processo de dessecção, sendo um processo não espontâneo. A força de compressão necessária para deformar os frutos de baru diminui com o aumento do teor de água, independentemente da temperatura de secagem. O módulo proporcional de deformidade aumenta com a redução do teor de água para todas as temperaturas estudadas. A secagem eleva a força necessária à ruptura dos frutos de baru, independentemente da temperatura utilizada. A coordenada “L” e a diferença total de cor ( $\Delta E$ ) aumentaram com a redução do teor de água. Os valores do croma (Cr), ângulo hue ( $^{\circ}h$ ) e as coordenadas “a” e “b” se reduziram, provocando alteração na coloração dos frutos de baru. O aumento da temperatura de secagem proporcionou maior diferença total de cor, indicando perda no seu aspecto qualitativo.

**Palavras-chave:** cinética de secagem, higroscopicidade, propriedades termodinâmicas, propriedades mecânicas e coloração

## ABSTRACT

OLIVERA, Daniel Emanuel Cabral de D.S., Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano (Federal Institute of Education, Science, and Technology of Goiás State, Brazil). March 2016. **Hygroscopicity, drying kinetics process, mechanical and thermodynamic properties of baru fruit (*Dipteryx alata* Vogel)**. Advisor: Dr. Osvaldo Resende.

To answer the growing demand for information about the native fruits of the Cerrado (savannah biome that occurs in Brazil), this paper aimed to study the hygroscopicity, drying, mechanical and thermodynamic properties, and color of the baru fruit (*Dipteryx alata* Vogel). The static gravimetric method was used to obtain the hygroscopic equilibrium moisture content of the fruit. Drying kinetics was carried out at temperatures of 40; 60; 80; and 100 °C. Nonlinear regression analysis by the Gauss-Newton method was performed for the mathematical model adjustment to the experimental data of drying and hygroscopicity. The significance of the regression parameters by the t test at 5% significance level, the magnitude of the determination coefficient ( $R^2$ ), the relative (P) and the estimated (SE) average error values, and the chi-square test ( $\chi^2$ ) were considered to determine the adjustment degree of the mathematical models of drying and hygroscopicity of this fruit. Analysis of residues distribution was also used for hygroscopicity data. Mechanical properties were evaluated by the determination of compression maximum force for fixed deformations and by the proportional deformity modulus of fruits subjected to compression in a resting position, determining the tensile strength required for the fruit epicarp disruption after drying at temperature of 60; 80; and 100 °C. Modified Halsey model was used to determine the thermodynamic properties of the baru fruit; and vaporization latent heat,

full isosteric heat, differential enthalpy, differential entropy compensation theory, and Gibbs free energy were determined. Evaluation of the baru fruit color was carried out by direct reading of "L", "a", and "b" coordinates reflectance using the ColorFlex EZ calorimeter with the Hunter color system. Thus, chroma (Cr), color hue angle ( $h^\circ$ ), and total color difference ( $\Delta E$ ) values were determined. It was concluded that the desorption isotherms of baru fruit at the range from 20 to 35 °C temperature were in the sigmoid shape, typical of agricultural products. Copace, Oswin, Guggenheim, Anderson, and de Boer (GAB), Modified Halsey, and Sigma Copace models were recommended to determine the fruit baru hygroscopicity. The drying time decreases with temperature increasing; it was 266.3 hours for 40 °C, and 22.8 hours for 100 °C. Thompson, Midilli, Logarithmic, Two Terms, and Diffusion Approximation models are suitable to represent the drying of baru fruit. The activation energy was 37.64 kJ mol<sup>-1</sup>. The enthalpy and entropy decrease, while the Gibbs free energy increases with increasing drying temperature. The thermodynamic properties are affected by the water content of the baru fruit, causing increase of the needed energy for product dewatering with reduced moisture content. Full isosteric heat, vaporization latent heat, enthalpy, entropy, and Gibbs free energy increase with the reduction of the moisture content of the baru fruit, while the desorption process is controlled by enthalpy. The Gibbs free energy is positive for the temperatures and this energy increases along the desorption process, and it is a non-spontaneous process. The required compressive force to deform the baru fruit decreases with increasing moisture content, regardless of drying temperature. The proportional deformity modulus increases with the reduction of moisture content for all studied temperatures. Drying increases the force required to disruption of the baru fruit, regardless of the used temperature. The "L" coordinate and the total color difference ( $\Delta E$ ) increased with the decrease of moisture content. Chroma (Cr), hue angle ( $h^\circ$ ) values, and the "a" and "b" coordinates were reduced, causing change in the baru fruit color. Increasing the drying temperature resulted in higher total color difference, indicating a loss in its quality aspect.

**Keywords:** Drying kinetics, hygroscopicity, thermodynamic properties, mechanical properties, color

## INTRODUÇÃO GERAL

### 1. Baru

O cerrado é a segunda maior formação vegetal do Brasil, abrangendo, originalmente, 204,7 milhões de hectares do território do país, sendo localizado essencialmente no planalto central, englobando partes dos estados da Bahia, Goiás, Maranhão, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná, Piauí, São Paulo e Tocantins, além do Distrito Federal (SANO et al., 2008).

A intensa pressão da agricultura e da pecuária no cerrado colocou em perigo diversas espécies social e economicamente importantes. Aproximadamente, metade do original dos dois milhões de km<sup>2</sup> do Cerrado foi transformada em pastagens e em culturas anuais (KLINK e MACHADO, 2005). Este bioma é atualmente um dos *hotspots* de biodiversidade do mundo para a conservação. Além da grande diversidade de espécies vegetais, o cerrado tem alta diversidade de solo e de fauna. Por essas razões, é considerado um dos biomas mais ricos, mas também um dos mais ameaçados (BRASIL, 2010).

A *Dipteryx alata* Vogel é uma frutífera do cerrado, que tem tido uma boa aceitação no mercado, em decorrência de seu relevante valor econômico e sabor agradável, principalmente da castanha (SANO et al., 2004). A *Dipteryx alata* Vogel, também conhecida popularmente como cumbaru, cumaru, baru, barujo, feijão coco ou emburena-brava, é uma árvore que ocorre nos estados de Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul e São Paulo (LORENZI, 2008).

O baru, pertence à família Fabaceae, de ocorrência em solos mais férteis de cerrado, é uma árvore alta, podendo atingir mais de 15 metros de altura, com caule ereto e ramos lisos (CORREA et al., 2008). Sua polpa e a amêndoa podem ser usadas para alimentação humana, sendo que a semente tem sabor semelhante ao do amendoim e

pode ser consumida in natura ou torrada, assim como para enriquecer pães, bolos, sorvetes, doces ou paçoquinhas.

O baru é utilizado na alimentação, como madeira, na medicina, indústria, para compor paisagens e na recuperação de áreas degradadas. É uma espécie promissora para o cultivo, além de ser uma das poucas espécies que apresentam frutos com polpa carnosa durante a estação seca, sendo uma importante fonte de alimentação para a fauna silvestre nesta época (SANO et al., 2004).

Os frutos de baru são do tipo drupa e têm coloração castanho-clara, com uma única semente comestível no formato elíptico, de cor marrom escura, comumente chamada de amêndoa. Esta semente tem relevância regional e tem atraído interesse científico devido à sua composição nutricional. As amêndoas de baru têm maiores teores de ácidos graxos monoinsaturados (51,1%) e menores teores de ácidos graxos saturados (BENTO et al., 2014).

Lima et al. (2010), em seus estudos, indicaram que a polpa e a amêndoa dos frutos de baru podem ser inseridas em barras de cereais, tendo tido boa aceitação por parte de potenciais consumidores, podendo a polpa substituir o farelo de aveia, aumentando o teor de fibras insolúveis e reduzindo o valor energético. A utilização dos frutos de baru na sua forma integral em alimentos processados contribui para sua valorização e seu uso sustentável.

## 2. Secagem

Durante a fase de pós-colheita, um manejo inadequado pode conduzir a uma rápida deterioração da qualidade dos frutos. A atividade microbiana pode causar efeitos indesejáveis, como descoloração do epicarpo, e contribuir para o aquecimento da massa armazenada e perdas de matéria seca por meio da utilização de carboidratos, proteínas e lipídeos como fonte de energia durante a respiração (MAGAN e ALDRED, 2007). Vários autores têm estudado as etapas da pós-colheita em frutos e sementes do cerrado, como, por exemplo: macaúba (*Acrocomia aculeata* [Jacq.] Loddiges ex MART.) (RUBIO NETO et al., 2012); caju-de-árvore-do-cerrado (*Anacardium othonianum* Rizz.) (CAETANO et al., 2012; SILVA et al., 2013a); pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) (SILVA et al., 2013b); e guapeva (*Pouteria cf. gardneriana* Radlk.) (CABRAL et al., 2013).

Em meio aos processos de pós-colheita utilizados para a manutenção da qualidade de produtos agrícolas, a secagem destaca-se como forma de reduzir o teor de água e proporcionar redução na atividade biológica e nas mudanças químicas e físicas que ocorrem durante o armazenamento.

Naturalmente, são diversos os fatores que interferem na viabilidade do produto, destacando-se, entre eles, as condições climáticas e de manejo durante sua produção, colheita, manuseio, secagem e armazenamento. Nesse sentido, a redução do teor de água como resultado da secagem atua diretamente na diminuição do metabolismo, que contribui para diminuir a taxa de deterioração e aumentar o tempo em que podem ser armazenados por longos períodos, sem perda da qualidade (CARLESSO et al., 2008). O estudo da secagem de sementes e frutos do cerrado tem contribuído para sua caracterização em relação à sua tolerância à dessecação e ao comportamento ao longo do armazenamento (KOHAMA et al., 2006).

A secagem de produtos agrícolas é o fenômeno de redução do teor de água, que envolve, simultaneamente, a transferência de energia e de massa (BROOKER et al., 1992), podendo alterar de forma substancial a qualidade e as propriedades físicas do produto, dependendo do método e das condições de secagem (RESENDE et al., 2008).

No entanto, durante a secagem em condições de temperatura e umidade relativa do ar são geradas elevadas taxas de remoção de água, podendo afetar a qualidade do produto. A temperatura, a umidade relativa, a velocidade do ar, a taxa de secagem, o teor de água inicial e final, o sistema de secagem empregado e o tempo de permanência do produto na câmara de secagem são os principais parâmetros que podem estar associados à redução da qualidade (BROOKER et al., 1992).

### 3. Higroscopicidade

Os produtos agrícolas têm a propriedade de fazer trocas de água sob a forma de vapor com o ambiente que os envolve. Essas trocas podem acontecer por meio do ganho ou da perda de água, fenômenos conhecidos, respectivamente, por adsorção e dessorção, de acordo com as características higroscópicas recíprocas do produto e do ar. A afinidade existente entre a água e os outros componentes (lipídios, carboidratos, proteínas etc.) de um produto define sua higroscopicidade (BROOKER et al., 1992).

A composição química também influencia diretamente no processo de sorção de água. Produtos agrícolas ricos em óleo apresentam teores de água de equilíbrio

menores em relação aos amiláceos, quando armazenados em condições ambientais semelhantes, pois absorvem menos água, por serem hidrofóbicos (BROOKER et al., 1992).

As isotermas de sorção são importantes para estimar as mudanças de teor de água sob diferentes condições de temperatura e umidade relativa do ar ambiente, bem como definir os teores de água adequados para evitar a atividade de microrganismos e os limites de secagem do produto estudado (AYRANCI e DUMAN, 2005).

O conhecimento do teor inicial e final de água do material e da relação da água com a estrutura sólida e do transporte da água do interior do material até a sua superfície possibilita fundamentar o processo de secagem (FANG et al., 2009).

A disponibilidade de água em materiais biológicos, tais como sementes e frutos, é adequadamente indicada pela atividade de água ( $a_w$ ) ou pelo teor de água de equilíbrio com a temperatura e umidade relativa do ar ambiente. A atividade de água e a umidade relativa, quando atingido o equilíbrio dinâmico, são numericamente iguais (BROOKER et al., 1992).

O conhecimento das interações entre o produto, a umidade relativa do ar e a temperatura pode influenciar diretamente a qualidade dos frutos. Durante o armazenamento dos produtos agrícolas, podem ocorrer mudanças microbiológicas, físicas e químicas que, dependendo da interação entre estes fatores e o ambiente, podem ocasionar perdas na sua qualidade (RESENDE et al., 2006a; BORGES et al., 2009).

A relação entre o teor de água de equilíbrio e a umidade relativa de equilíbrio, também designada por atividade da água, constitui um fator essencial nos projetos e estudos de sistemas de secagem, manuseio, armazenagem, embalagem e transporte, bem como na modelagem da longevidade dos frutos. As isotermas consideram a relação entre a umidade relativa de equilíbrio e o teor de água do produto em uma determinada temperatura (RESENDE et al., 2006b).

As isotermas são importantes para definir limites de desidratação do produto, estimar as mudanças do teor de água sob determinada condição de temperatura e umidade relativa do ambiente e para definir os teores de água adequados ao início de atividade de microrganismos que podem provocar a deterioração do produto. Também fornecem informações necessárias para o desenvolvimento e otimização de processos que preveem o tempo de prateleira e também para a modelagem das mudanças de umidade que ocorrem durante a secagem (SIRIPATRAWAN e JANTAWAT, 2006; JAMALI et al., 2006; CATELAM et al., 2011; COMUNIAN et al. 2011).

A utilização de modelos matemáticos na predição das isotermas de sorção tem a vantagem de, com poucos pontos experimentais, poder construir uma isoterma. Assim, podem ser obtidos pontos nas regiões de baixas e altas atividades de água, determinando o teor de água ideal para o armazenamento seguro dos produtos.

Por meio das isotermas de sorção, são estimadas as propriedades termodinâmicas. As principais funções das isotermas são quantificar as entalpias e entropias diferenciais e integrais, fundamentais na análise da exigência energética e predição dos parâmetros cinéticos nos processos de sorção (KAYA e KAHYAOGU, 2006). Ao estudar as propriedades termodinâmicas de um produto, busca-se solucionar problemas relacionados às questões de estabilidade e otimização das condições dos processos industriais (MARCINKOWSKI, 2006).

#### 4. Propriedades mecânicas

Para o desenvolvimento e o aperfeiçoamento de equipamentos utilizados para a secagem dos frutos do cerrado, são de fundamental importância a simulação e a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto durante a remoção de água. Para a simulação, cujo princípio se fundamenta na secagem de sucessivas camadas delgadas do produto, são utilizados modelos matemáticos que representam, satisfatoriamente, a perda de água durante o período de secagem (BERBERT et al., 1995). As curvas de secagem em camada delgada variam com a espécie, variedade, condições ambientais, métodos de preparo pós-colheita, entre outros fatores.

Durante as etapas da pós-colheita, os frutos são submetidos a uma série de impactos que podem causar escoriações, esmagamento e trincas, aumentando sua suscetibilidade à deterioração durante o armazenamento. Adicionalmente, os danos mecânicos têm efeito cumulativo, isto é, as injúrias se somam, pois, a cada novo impacto sofrido pelos frutos e sementes, eles se tornam cada vez mais sensíveis a essas injúrias (PAIVA et al., 2000). Desta forma, o estudo das características mecânicas dos produtos agrícolas é importante para que os equipamentos possam ser desenvolvidos para atingir a máxima eficiência sem comprometer a qualidade final do produto. As trincas e quebras acontecem quando os esforços aplicados excedem a força de resistência do material (LIU et al., 1990).

Neste sentido, inúmeros trabalhos têm sido conduzidos com o objetivo de identificar as propriedades mecânicas de diversos produtos agrícolas em diferentes teores de água. Entre estes trabalhos, podem ser citados aqueles feitos com frutos de café (COUTO et al., 2002; BATISTA et al., 2003); avelã (GÜNER et al., 2003); soja (RIBEIRO et al., 2007); pistache (GALEDAR et al., 2009); arroz (RESENDE et al., 2013); e trigo (FERNANDES et al., 2014). Entretanto, informações sobre as propriedades mecânicas dos frutos de baru não são encontradas na literatura.

Desta forma, estudos sobre secagem, higroscopicidade, coloração e propriedades mecânicas e termodinâmicas dos frutos do cerrado são de extrema importância para que equipamentos possam ser desenvolvidos para atingir a máxima eficiência sem comprometer a qualidade final do produto.

## 5. Referências bibliográficas

- AYRANCI, E.; DUMAN, O. Moisture sorption isotherms of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) and its protein isotate at 10, 20 and 30°C. **Journal of Food Engineering**, v. 70, n. 1, p. 83-91, 2005.
- BATISTA, C.S.; COUTO, S.M.; CECON, P.R.; PEIXOTO, A.B. Efeito da temperatura do ar de secagem, do teor de umidade e do estágio de maturação no módulo de deformidade de frutos de café (*Coffea arabica* L.). **Revista Brasileira de Armazenamento**, Especial café, n. 6, p. 42-53, 2003.
- BENTO, A. P. N.; COMINETTI, C.; SIMÕES FILHO, A.; NAVES, M. M. V. Baru almond improves lipid profile in mildly hypercholesterolemic subjects: A randomized, controlled, crossover study. **Nutrition, Metabolism & Cardiovascular Diseases**, v. 24, n. 12, p. 1330-1336, 2014.
- BERBERT, P.A.; QUEIROZ, D.M.; SILVA, J.S.; PINHEIRO FILHO, J.B. Simulation of coffee drying in a fixed bed with periodic airflow reversal. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 60, n. 3, p. 167-73, 1995.
- BORGES, S.; BORGES, E.E.L.; CORREA, P.C.; BRUNE, A. Equilíbrio higroscópico e viabilidade de sementes de angico-vermelho (*Anadenanthera peregrina* (L.) Speng) em diferentes condições ambientais de armazenamento. **Scientia Florestalis**, v. 37, n. 84, p. 475-481, 2009.
- BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional**. Brasília, 2010. 59 p.

- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport: The AVI Publishing Company, 1992. 450 p.
- CABRAL, J.S.R.; SALES, J. F.; SILVA, F. G.; BRANQUINHO, A. C.; OLIVEIRA, R. C. Physiological quality of guapeva (*Pouteria gardneriana* radlk.) Seeds during storage. **Global Science and Technology**, v. 06, n. 1, p. 127-133, 2013.
- CAETANO, G. S.; SOUSA, K. A.; RESENDE, O.; SALES, J. F.; COSTA, L. M. Higroscopicidade de sementes de caju-de-árvore-do-cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 4, p. 437-445, 2012.
- CARLESSO, V. O.; BERBERT, P. A.; SILVA, R. F.; DETMANN, E. Armazenamento e qualidade fisiológica de sementes de maracujá-amarelo. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. 33, n. 1, p. 9-18, 2008.
- CATELAM, K. T.; TRINDADE, C. S. F.; ROMERO, J. T. Isotermas de adsorção e calor isostérico de sorção de polpa de maracujá desidratada por spray dryer e liofilizador com aditivos e leite desnatado. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1196-1203, 2011.
- COMUNIAN, T. A.; MONTERREY-QUINTERO, E. S.; THOMAZINI, M.; BALIEIRO, J. C. C.; PICONNE, P.; PITTIA, P.; FAVARO-TRINDADE, C. S. Assessment of production efficiency, physicochemical properties and storage stability of spray-dried chlorophyllide, a natural food colourant, using gum Arabic, maltodextrin and soy protein isolate-based carrier systems. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 46, n. 6, p. 1259-1265, 2011.
- CORREA, G.C.; NAVES, R.V.; ROCHA, M.R.; CHAVES, L.J.; BORGES, J.D. Determinações físicas em frutos e sementes de baru (*Dipteryx alata* Vog.), cajuzinho (*Anacardium othonianum* Rizz.) e pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.), visando melhoramento genético. **Bioscience Journal**, v. 24, n. 4, p. 42-47, 2008.
- COUTO, S.M.; BATISTA, C.S.; PEIXOTO, A.B.; DEVILLA, I. A. Comportamento mecânico de frutos de café: módulo de deformidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 285-294, 2002.
- FANG, S. Z.; WANG, Z. F.; HU, X. S. Hot air drying of whole fruit Chinese jujube (*Zizyphus jujuba* Miller): thinlayer mathematical modelling. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 44, n. 9, p. 1818-1824, 2009.
- FERNANDES, L. S.; CORRÊA, P. C.; DINIZ, M. D. M. S.; LEITE, D. M.; VASCONCELLOS, D. S. L. Influência do teor de água nas propriedades mecânicas dos

grãos de trigo submetidos à compressão. **Bioscience Journal**, v. 30, suplemento 1, p. 219-223, 2014.

GALEDAR, M. N.; MOHTASEBI, S. S.; TABATABAEEFAR, A.; JAFARI, A.; FADAEI, H. Mechanical behavior of pistachio nut and its kernel under compression loading. **Journal of Food Engineering**, v. 95, n. 3, p. 499-504, 2009.

GÜNER, M.; DURSUN, E.; DURSUN, I. G. Mechanical behaviour of hazelnut under compression loading. **Biosystems Engineering**, v. 85, n. 4, p. 485-491, 2003.

JAMALI, A.; KOUHILA, M.; MOHAMED, L. A.; IDLIMAM, A.; LAMHARRAR, A. Moisture adsorption-desorption isotherms of citrus reticulata leaves at three temperatures. **Journal of Food Engineering**, v. 77, n. 1, p. 71-78, 2006.

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

KLINK, C.A.; MACHADO, R.B. Conservation of the Brazilian Cerrado. **Conservation Biology**, v. 19, n. 3, p. 707-713, 2005.

KOHAMA, S.; MALUF, A.M.; BILIA, D.A.C; BARBEDO, C.J. Secagem e armazenamento de sementes de *Eugenia brasiliense* LAM. (Gruxumeira). **Revista Brasileira Sementes**, v.28, n. 1, p. 72-78, 2006.

LIMA, J. C. R.; FREITAS, J. B.; CZEDER, L. P.; FERNANDES, D. C.; NAVES, M. M. V. Qualidade microbiológica, aceitabilidade e valor nutricional de barras de cereais formuladas com polpa e amêndoa de baru. **B.CEPPA**, v. 28, n. 2, p. 331-343, 2010.

LIU, M.; HAGHIGHI, K.; STROSHINE, R.L.; TING, E.C. Mechanical properties of soybean cotyledon and failure strength of soybean kernel. **Transactions of the ASAE**, v. 33, n. 2, p. 559-65, 1990.

LORENZI, H. **Árvores Brasileiras**: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. 5.ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, v.1, 2008. 368p.

MAGAN, N.; ALDRED, D. Post-harvest control strategies: Minimizing in the food chain. **International Journal of Food Microbiology**, v. 119, n. 1-2, p. 131-139, 2007.

MARCINKOWSKI, E. A. **Estudo da cinética de secagem, curva de sorção e predição e propriedades termodinâmicas da proteína texturizada de soja**. 2006, 127 p. (Mestrado em Engenharia) Departamento de Engenharia Química, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2006.

- PAIVA, L. E.; MEDEIROS FILHO, S.; FRAGA, A. C. Beneficiamento de sementes de milho colhidas mecanicamente em espigas: efeitos sobre danos mecânicos e qualidade fisiológica. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 24, n. 4, p. 846-856, 2000.
- RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; RIBEIRO, R.M. Isotermas e calor isostérico de sorção do feijão. **Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 26, n. 3, p. 626-631, 2006a.
- RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; MARTINAZZO, A.P.; RIBEIRO, R.M. Isotermas e calor isostérico de dessorção do arroz em casca. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. 31, n. 1, p. 86-94, 2006b.
- RESENDE, O.; CORREA, P.C.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**. v. 10, n. 1, p. 17-26, 2008.
- RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; GONELI, A. L. D.; JARÉN, C. Mechanical properties of rough and dehulled rice during drying. **International Journal of Food Studies**, v. 2, n. 2, p. 158-166, 2013.
- RIBEIRO, D. M.; CORRÊA, P. C.; FURTADO, B. F.; GONELI, A. L. D.; RESENDE, O. Propriedades mecânicas dos grãos de soja em função do teor de água. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 2, p. 493-500, 2007.
- RUBIO NETO, A.; SILVA, F. G.; SALES, J. F.; REIS, E.F; SILVA, M. V. V.; SOUZA, A.L. Effect of drying and soaking fruits and seeds on germination of macaw palm (*Acrocomia aculeata* [Jacq.] Loddiges ex MART.). **Acta Scientiarum. Agronomy** (Online), v. 34, n. 2, p. 1559-1566, 2012.
- SANO, S. M.; RIBEIRO, J. F.; BRITO, M. A. **Baru: biologia e uso**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados. 2004. 52 p.
- SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L. S.; FERREIRA, L. G. (2008). Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 1, p. 153-156, 2008.
- SILVA, L. A.; SALES, J. F.; SILVA, F. G.; FERREIRA, P. H. C. M. Cryopreservation of achenes of caju-de-árvore-do-cerrado (*Anacardium othonianum* Rizz). **African Journal of Biotechnology**, v. 12, n. 22, p. 3537-3544, 2013a.
- SILVA, G. P.; NETO, A. R.; FRANÇA, C. S.; SALES, J. F.; SILVA, G.F.; RESENDE, O. Influence of the drying temperature on the emergence and vigor of Pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.), an important species of the Brazilian Cerrado. **African Journal of Agricultural Research**, v. 8, n. 6, p. 553-558, 2013b.

SIRIPATRAWAN, U.; JANTAWAT, P. Determination of moisture sorption isotherms of jasmine rice crackers using BET and GAB models. **Food Science and Technology International**, v. 6, n. 12, p. 459-465, 2006.

## OBJETIVOS GERAIS

Estudar a higroscopicidade e a secagem, ajustando modelos matemáticos aos dados experimentais, bem como avaliar coloração e as propriedades termodinâmicas e mecânicas dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel) em função das temperaturas de secagem e do teor de água.

## CAPÍTULO 1

### ISOTERMAS DOS FRUTOS DE BARU (*Dipteryx alata* Vogel)

**Resumo:** Com o conhecimento do equilíbrio higroscópico dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel), pode-se manejar adequadamente o produto, visando à manutenção de seu teor de água nos níveis recomendados para o armazenamento seguro. Desta forma, objetivou-se determinar as isotermas de desorção de água dos frutos de baru nas temperaturas de 20, 25, 30, 35 °C e atividades de água entre 0,14 e 0,80, bem como ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais. Para obtenção do teor de água de equilíbrio higroscópico, foi utilizado o método estático-gravimétrico. Para cada repetição, foram colocados 50 g de frutos envolvidos por tecido permeável para permitir o contato do ar com o produto no interior dos dessecadores. O controle da umidade relativa no interior dos dessecadores foi obtido por meio de soluções saturadas. Verificou-se que quanto maior a temperatura, para um mesmo teor de água de equilíbrio (% b.s.), maiores são os valores de atividade de água. Os modelos Copace, Oswin, GAB, Halsey Modificado e Sigma Copace foram recomendados para determinar a higroscopicidade dos frutos de baru.

**Palavras-chave:** Teor de água de equilíbrio, modelagem matemática, equilíbrio higroscópico

### ISOTHERMS OF BARU FRUIT (*Dypterix alata* Vogel)

**Abstract:** On the basis of the hygroscopic equilibrium knowledge of the baru fruit (*Dipteryx alata* Vogel), the product can be adequately handled to maintain the moisture

content at the recommended levels for safe storage. Thus, this paper aimed to determine the water desorption isotherms from baru fruit at temperatures of 20; 25; 30; and 35 °C, and water activity between 0.14 and 0.80 °C, as well as to adjust different mathematical models to the experimental data. Static gravimetric method was used to obtain the hygroscopic equilibrium moisture content. For each replicate, 50 g of baru fruit wrapped by permeable fabric to allow contact of the air with product were placed within the desiccator. The relative humidity control inside the desiccator was obtained by saturated solutions. It was found that the higher the temperature for the same equilibrium moisture content (% dry basis-d.b.), the higher the water activity values. Copace, Oswin, Guggenheim, Anderson, and de Boer (GAB), Modified Halsey, and Sigma Copace models were recommended to determine the hygroscopicity of the baru fruit.

**Keywords:** Equilibrium moisture content, mathematical modeling, hygroscopic equilibrium.

## INTRODUÇÃO

A *Dipteryx alata* Vogel, também conhecida popularmente como cumbaru, cumaru, baru, barujo, feijão coco ou emburena-brava, é uma árvore que ocorre no cerrado nos estados de Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul e São Paulo. O fruto tem cor parda e contém em seu interior uma única semente, que pode ser comestível (LORENZI, 2008).

Durante a fase de pós-colheita dos frutos e sementes, um manejo inadequado pode conduzir a uma rápida deterioração da qualidade. A atividade microbiana pode causar efeitos indesejáveis e contribuir para o aquecimento do produto armazenado e para perdas de matéria seca por meio da utilização de carboidratos, proteínas e lipídeos como fonte de energia durante a respiração (MAGAN e ALDRED, 2007).

Estudos sobre a higroscopicidade dos produtos agrícolas têm a finalidade de amenizar estas possíveis alterações, uma vez que estes produtos têm a capacidade de absorver e ceder água para o ambiente tendendo para um equilíbrio (RESENDE et al., 2006a). O estudo da higroscopicidade de sorção é importante para estimar as mudanças de teor de água sob diferentes condições de temperatura e umidade relativa do ar ambiente, bem como definir os teores de água adequados para que não ocorram o início

da atividade de microrganismos e os limites de secagem do produto estudado (AYRANCI e DUMAN, 2005). Cada microrganismo tem um limite mínimo de atividade de água para desenvolver suas atividades metabólicas: em torno de 0,7 para fungos; 0,8 para leveduras; e 0,9 para bactérias (OLIVEIRA et al., 2005).

A secagem é indispensável para o controle e a manutenção da qualidade dos produtos vegetais. O processo de secagem reduz o teor de água e, conseqüentemente, a atividade da água para níveis que viabilizem o armazenamento seguro. Elevados valores desses dois parâmetros podem elevar a quantidade de microrganismos e, conseqüentemente, acelerar a deterioração. Por outro lado, valores baixos podem conduzir à utilização excessiva de energia consumida durante a secagem e provocar alterações indesejáveis no produto (CORRÊA et al., 2010).

Assim, objetivou-se determinar as isotermas de dessorção de água dos frutos de baru em diferentes condições de temperaturas e atividades de água e ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Pós-Colheita de Produtos Vegetais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – *Campus Rio Verde*. Para a condução do experimento, foram utilizados frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel) coletados no Município de Santa Helena de Goiás, Goiás, a 17°48' S 50°35' O e altitude de 568 m, com teor de água de 43% base seca (b.s.).

Posteriormente, procedeu-se à limpeza manual dos frutos, retirando as impurezas e os frutos danificados. Para obtenção do teor de água de equilíbrio higroscópico, foi utilizado o método estático-gravimétrico, e para cada repetição, foram colocados aproximadamente 50 g de frutos envolvidos por um tecido permeável (voile) para permitir a passagem do ar através do produto, sendo em seguida colocados no interior de dessecadores. A temperatura e a umidade relativa do ar foram monitoradas por meio de um data logger inserido no interior dos dessecadores.

Visando ao controle da umidade relativa no interior dos dessecadores, foram utilizadas soluções saturadas de diferentes sais (Tabela 1). Os dessecadores foram colocados em câmaras incubadoras tipo B.O.D. (Biochemical Oxygen Demand), reguladas nas temperaturas de 20, 25, 30 e 35 °C. Ressalta-se que não houve presença de fungos nas repetições.

**Tabela 1.** Valores das umidades relativas (%) estabelecidas no interior dos dessecadores para determinação do equilíbrio higroscópico, pelo método estático-gravimétrico

Composto Químico		Umidade relativa (%)
LiCl	Cloreto de lítio	15±0,5
CaCl <sub>2</sub>	Cloreto de cálcio	35±2,0
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Nitrato de cálcio	49±3,0
NaCl	Cloreto de sódio	74±0,5
KBr	Brometo de potássio	80±0,8

As amostras foram pesadas periodicamente, e o equilíbrio higroscópico dos frutos foi atingido quando a variação da massa permaneceu invariável durante três pesagens consecutivas. Após atingir o equilíbrio higroscópico, foi determinado o teor de água em estufa a  $105 \pm 3$  °C, durante 24 h (BRASIL, 2009).

Os modelos matemáticos frequentemente utilizados para representação da higroscopicidade de produtos vegetais, Tabela 2, foram ajustados aos dados experimentais.

**Tabela 2.** Modelos matemáticos utilizados para prever o fenômeno de higroscopicidade de produtos vegetais

Designação do modelo	Modelo	
$X_e = a - b \cdot \ln[-(T+c) \cdot \ln(a_w)]$	Chung-Pfost	(1)
$X_e = \exp[a - (b \cdot T) + (c \cdot a_w)]$	Copace	(2)
$X_e = (a + b \cdot T) / [(1 - a_w) / a_w]^{1/c}$	Oswin	(3)
$X_e = (a \cdot b \cdot c \cdot a_w) / [(1 - c \cdot a_w) \cdot (1 - c \cdot a_w + b \cdot c \cdot a_w)]$	GAB	(4)
$X_e = [\exp(a - b \cdot T) / -\ln(a_w)]^{1/c}$	Halsey Modificado	(5)
$X_e = [\ln(1 - a_w) / (-a \cdot (T + 273,16))]^{1/b}$	Henderson	(6)
$X_e = a \cdot (a_w^{b/T^c})$	Sabbah	(7)
$X_e = \exp\{a - (b \cdot T) + [c \cdot \exp(a_w)]\}$	Sigma Copace	(8)
$X_e = [\ln(1 - a_w) / (-a \cdot (T + b))]^{1/c}$	Henderson Modificado	(9)
$X_e = [\ln(1 - a_w) / (a \cdot (T^b))]^{1/c}$	Cavalcanti Mata	(10)
$X_e = (a \cdot b \cdot a_w) \cdot \frac{\left(\frac{c}{T}\right)}{\left(1 - b \cdot a_w + \left(\frac{c}{T}\right) \cdot b \cdot a_w\right) \cdot (1 - b \cdot a_w)}$	GAB Modificado	(11)
$X_e = \left\{1 / \left[ (1 - a_w) \cdot \left(1/a \cdot b + \left((a - 1)/a \cdot b\right)\right)\right]\right\}$	BET	(12)

Em que:

X<sub>e</sub>: teor de água de equilíbrio, % b.s.;

a<sub>w</sub>: atividade de água, decimal;

T: temperatura, °C; e

a, b e c: parâmetros dos modelos.

Para o ajuste dos modelos matemáticos, realizou-se a análise de regressão não linear, pelo método Gauss Newton. Para verificar o grau de ajuste de cada modelo, foram considerados a significância dos parâmetros de regressão pelo teste t, a magnitude do coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), os valores do erro médio relativo (P), erro médio estimado (SE) e o teste de *Qui*-quadrado (χ<sup>2</sup>) ao nível de significância de 1% e o intervalo de confiança a 99 %, bem como a verificação do comportamento da distribuição dos resíduos. Os erros médios relativo e estimado e o teste de *Qui*-quadrado para cada modelo foram calculados conforme as seguintes equações, respectivamente:

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (13)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (14)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR} \quad (15)$$

Em que:

Y: valor observado experimentalmente;

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

n: número de observações experimentais; e

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

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 estão apresentados os parâmetros dos modelos de equilíbrio higroscópico para os frutos de baru obtidos por dessorção, para diferentes condições de temperatura.

**Tabela 3.** Parâmetros dos modelos ajustados aos teores de água de equilíbrio higroscópico para os frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel), com seus respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ , %), erros médios estimado (SE, decimal) e relativo (P, %), *Qui*-quadrado ( $\chi^2$ , decimal) e tendência de distribuição dos resíduos

MODELOS	Parâmetros	$R^2$ (%)	P (%)	SE	$\chi^2$	Distribuição de Resíduos
Chung-Pfost	a = 58,61948**	96,31	17,04	1,875	3,51	Tendencioso
	b = 10,71409**					
	c = 67,75428 <sup>ns</sup>					
Copace	a = 1,313524**	98,90	4,32	1,022	1,04	Aleatório
	b = 0,006959*					
	c = 2,702633**					
Oswin	a = 14,07099**	99,16	5,37	0,896	0,80	Aleatório
	b = -0,08157*					
	c = -1,6688**					
GAB	a = 5,8226**	99,10	6,41	0,926	0,86	Aleatório
	b = 15,17599 <sup>ns</sup>					
	c = 0,99486**					
Halsey Modificado	a = 2,870722**	99,46	4,44	0,720	0,52	Aleatório
	b = 0,008399**					
	c = 1,248261**					
Henderson	a = 0,000137**	98,13	9,94	1,295	1,68	Tendencioso
	b = 1,115824**					
Sabbah	a = 65,86307*	96,54	15,26	1,815	3,30	Tendencioso
	b = 1,38607**					
	c = 0,18912 <sup>ns</sup>					
Sigma Copace	a = 0,045796 <sup>ns</sup>	99,12	6,05	0,917	0,84	Aleatório
	b = 0,006838*					
	c = 1,546895**					
Henderson Modificado	a = 0,00032 <sup>ns</sup>	98,29	9,86	1,279	1,63	Tendencioso
	b = 99,51437 <sup>ns</sup>					
	c = 1,12538**					
Cavalcanti Mata	a = -0,020411*	98,28	9,89	1,281	1,64	Tendencioso
	b = 0,206295 <sup>ns</sup>					
	c = 1,12436**					
GAB Modificado	a = 6,1346**	99,29	3,92	0,825	0,68	Tendencioso
	b = 0,9815**					
	c = 314,6193**					
BET	a = -118,268 <sup>ns</sup>	98,25	11,69	1,253	1,57	Tendencioso
	b = 0,181**					

\*\* Significativo a 1 % pelo teste de t; <sup>ns</sup>Não Significativo.

Os modelos Copace, Oswin, Halsey Modificado, Henderson e GAB Modificado apresentaram todos os parâmetros significativos pelo teste de t. Os modelos Copace, Oswin, Halsey Modificado, Sigma Copace e GAB Modificado apresentaram o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) superior a 99%, sendo que o modelo de Halsey Modificado obteve o maior valor (99,46%).

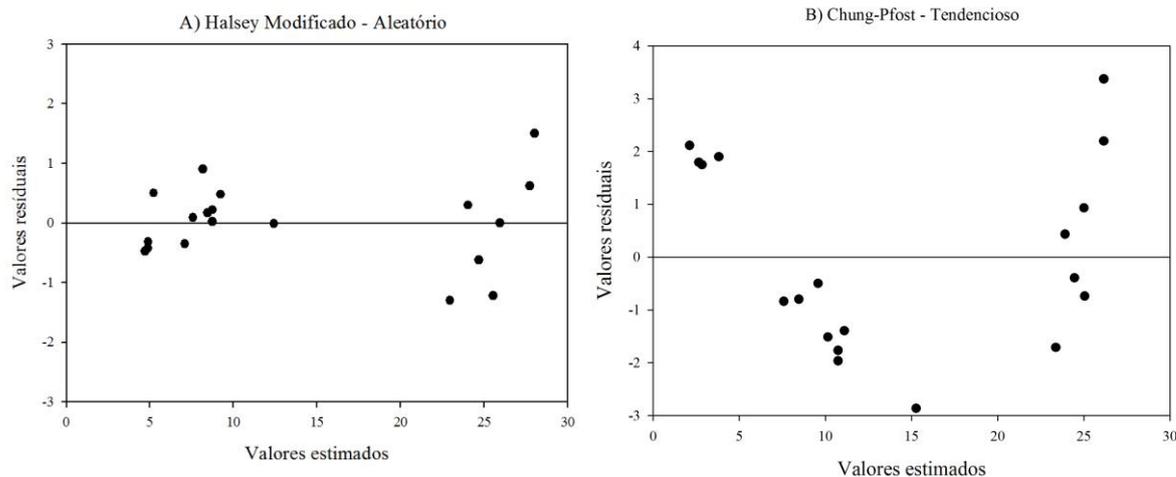
Com relação ao erro médio relativo (P), nota-se que os modelos Copace e Halsey Modificado apresentaram os menores valores, já os modelos Chung-Pfost, Sabbah e BET apresentaram valores superiores a 10%, que, de acordo com Mohapatra & Rao (2005), são inapropriados para a representação do fenômeno.

O modelo de Halsey Modificado apresentou o menor valor do erro médio estimado (SE), sendo que a capacidade de um modelo representar adequadamente um determinado processo físico é inversamente proporcional ao valor deste parâmetro (DRAPER & SMITH, 1981).

Em relação ao teste de *Qui*-quadrado ( $\chi^2$ ), todos os modelos analisados estão no intervalo de confiança de 95%, tendo os modelos de Halsey Modificado, Oswin e Sigma Copace apresentado os menores valores. Quanto menor o valor de *Qui*-quadrado, melhor o ajuste do modelo aos dados experimentais (GÜNHAN et al., 2005).

Para considerar um modelo aleatório, é necessário que a distribuição dos resíduos no eixo dos valores estimados esteja próxima de zero e também quando estes valores residuais não formarem figuras definidas, o que não caracteriza tendenciosidade nos valores residuais. Se os modelos analisados apresentarem distribuição tendenciosa, o modelo é considerado impróprio para representar o fenômeno estudado (GONELI, 2008). Assim, os modelos Copace, Oswin, GAB, Halsey modificado e Sigma Copace apresentaram distribuição dos resíduos aleatória, indicando ajuste adequado aos dados experimentais.

Na Figura 1 estão apresentados exemplos de tendências de distribuição dos resíduos: a Figura 1A mostra a distribuição aleatória para o modelo de Halsey Modificado e a Figura 1B, a distribuição tendenciosa para o modelo de Henderson Modificado.

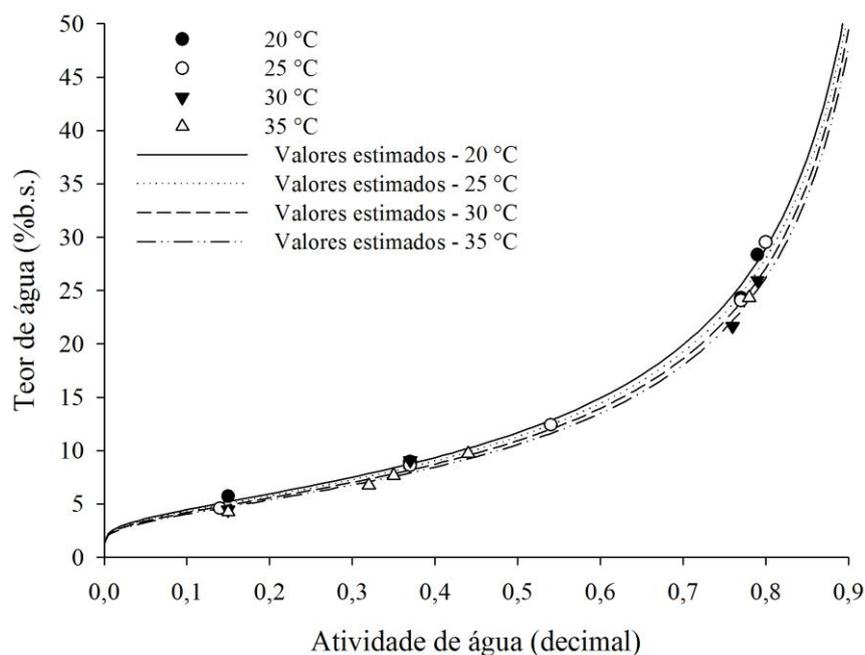


**Figura 1.** Exemplos de tendências de distribuição dos resíduos para os modelos de Halsey Modificado – aleatório e Henderson Modificado – tendencioso, em função dos valores estimados do equilíbrio higroscópico dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel).

Desta forma, entre os modelos avaliados, Copace, Oswin, GAB, Halsey Modificado e Sigma Copace podem ser recomendados para determinar a higroscopicidade dos frutos de baru. O modelo de Halsey Modificado apresentou maior coeficiente de determinação, distribuição aleatória dos resíduos e menores valores dos erros médios relativo e estimado, bem como menor magnitude no teste de *Qui-quadrado*, sendo selecionado para predição do teor de água de equilíbrio dos frutos de baru.

Resende et al. (2006b) estudaram a higroscopicidade dos grãos de feijão e verificaram que o modelo de Halsey Modificado se ajustou melhor aos dados experimentais. Caetano et al. (2012) e Costa et al. (2015) avaliaram as isotermas de sorção de sementes de caju-de-árvore-do-cerrado (*Anacardium othonianum* Rizz.) e de boca boa (*Buchenavia capitata* (Vahl) Eichler), espécies do cerrado, tendo verificado que os modelos de Chung-Pfost e Copace, respectivamente, foram os que melhor se ajustaram aos dados experimentais.

Na Figura 2 apresentados os valores experimentais do teor de água de equilíbrio dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel), obtidos por dessorção, bem como suas isotermas estimadas pelo modelo de Halsey Modificado.



**Figura 2.** Valores experimentais do teor de água de equilíbrio e isotermas de dessorção estimadas pelo modelo de Halsey Modificado para os frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel), em diferentes condições de temperatura e atividades de água.

Com o aumento da temperatura, para um mesmo teor de água, tem-se elevação da atividade de água e, para uma atividade de água constante, os valores do teor de água de equilíbrio diminuíram com o aumento da temperatura, seguindo a mesma tendência da maioria dos vegetais (RESENDE et al., 2006a; CORRÊA et al., 2006; GONELI et al., 2010; CAETANO et al. 2012; SILVA e RODOVALHO, 2012; CORRÊA et al., 2014; HASSINI et al., 2015).

As isotermas de dessorção obtidas para os frutos de baru apresentaram-se no formato sigmoidal, tipo II (IUPAC, 1985), característico para diversos produtos agrícolas (RESENDE et al., 2006b; FURMANIAK et al., 2007; ANSELMO et al., 2008; IGUAZ e VÍRSEDA, 2007; OLIVEIRA et al., 2010; CAETANO et al. 2012; OLIVEIRA et al., 2014; SILVA et al., 2015; HASSINI et al., 2015).

Considerando que o desenvolvimento de fungos tem início com a atividade de água em torno de 0,7 (OLIVEIRA et al., 2005), verifica-se que os teores de água recomendados para o armazenamento seguro dos frutos de baru são de, no máximo, 19,9; 19,3; 18,6 e 18,0 (% b.s.), para as respectivas temperaturas de 20, 25, 30 e 35 °C, sendo estes valores estimados pelo modelo de Halsey Modificado.

## CONCLUSÕES

As isotermas de dessorção dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel) na faixa de temperatura de 20 a 35 °C apresentam-se no formato sigmoidal, típico de produtos agrícolas.

O teor de água de equilíbrio frutos de baru é fortemente influenciado pela atividade de água e diminui com o aumento da temperatura, em uma mesma atividade de água.

Os modelos Copace, Oswin, GAB, Halsey Modificado e Sigma Copace foram recomendados para determinar a higroscopicidade dos frutos de baru.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSELMO, G. C. S.; CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; RODRIGUES, E. Comportamento higroscópico do extrato seco de urucum (*Bixa Orellana* L). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 6, p. 1888-1892, 2008.

AYRANCI, E.; DUMAN, O. Moisture sorption isotherms of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) and its protein isotate at 10, 20 and 30°C. **Journal of Food Engineering**, v.70, n. 1, p.83-91, 2005.

Brasil, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes**. Brasília: Mapa/ACS, 2009. 399p.

CAETANO, G. S.; SOUSA, K. A.; RESENDE, O.; SALES, J. F.; COSTA, L. M. Higroscopicidade de sementes de caju-de-árvore-do-cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 4, p. 437-445, 2012.

CORRÊA, P. C.; AFONSO JÚNIOR, P. C.; RIBEIRO, D. M.; SILVA, F. S. Equilíbrio higroscópico de milheto, alpiste e painço: Obtenção e modelagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 162-167, 2006.

CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; AFONSO JUNIOR, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; VALENTE, D. S. M. Moisture sorption isotherms and isosteric heat of sorption of coffee in different processing levels. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 45, n. 10, p. 2016-2022, 2010.

- CORRÊA, P. C.; BOTELHO, F. M.; BOTELHO, S. C. C.; GONELI, A. L. D. Isotermas de sorção de água de frutos de *Coffea canephora*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 10, p. 1047-1052, 2014.
- COSTA, L. M.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C.; SOUSA, K. A. Isotermas e calor isostérico de sementes de *Buchenavia capitata* (Vahl) Eichler. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 3, p. 516-523, 2015.
- DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. John Wiley & Sons, 3th edition, New York, 1998. 712p.
- FURMANIAK, S.; TERZYK, A. P.; GAUDEN, P. A. The general mechanism of water sorption on foodstuffs – Importance of the multitemperature fitting of data and the hierarchy of models. **Journal of Food Engineering**, v. 82, n. 4, p. 528-535, 2007.
- GONELI, A.L.D. **Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade da mamona (*Ricinus communis* L.) durante a secagem e o armazenamento**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2008. 186p. Tese Doutorado.
- GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P.C.; OLIVEIRA, G.H.H.; BOTELHO, F.M. Water desorption and thermodynamic properties of okra seeds. **Transactions of the ASAE**, v. 53, n. 1, p. 191-197, 2010.
- GÜNHAN, T.; DEMIR, V.; HANCIOGLU, E.; HEPBASLI, A. Mathematical modelling of drying of bay leaves. **Energy Conversion and Management**, v.46, n.11-12, p.1667-1679, 2005.
- HASSINI, L.; BETTAIEB, E.; DESMORIEUX, H.; TORRES, S. S.; TOUIL, A. Desorption isotherms and thermodynamic properties of prickly pear seeds. **Industrial Crops and Products**, v. 67, n. 1, p. 457-465, 2015.
- IGUAZ, A.; VÍRSEDA, P. Moisture desorption isotherms of rough rice at high temperatures. **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 3, p. 794-802, 2007.
- IUPAC - International Union of Pure and Applied Chemistry. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984), **Pure & Applied Chemistry**, v. 57, n. 4, p. 603-619, 1985.
- LORENZI, H. **Árvores Brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 5.ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, v.1, 2008. 368p.
- MAGAN, N; ALDRED, D. Post-harvest control strategies: Minimizing mycotoxins in the food chain. **International Journal of Food Microbiology**, v. 119, n. 1-2, p. 131-139, 2007.

MOHAPATRA, D.; RAO, P.S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v. 66, n. 4, p. 513-518, 2005.

OLIVEIRA, M. M.; CAMPOS, A. R. N.; GOMES, J. P.; SILVA, F. L. H. Isotermas de sorção do resíduo agroindustrial de casca do abacaxi (*Ananas comosus* L. Mer). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 4, p. 565-569, 2005.

OLIVEIRA, G. H. H.; CORRÊA, P. C.; ARAÚJO, E. F.; VALENTE, D. S. M.; BOTELHO, F. M. Desorption isotherms and thermodynamic properties of sweet corn cultivars (*Zea mays* L.). **International Journal of Food Science and Technology**, v. 45, n. 3, p. 546-554, 2010.

OLIVEIRA, G. H. H.; CORRÊA, P. C.; SANTOS, E. S.; TRETO, P. C.; DINIZ, M. D. M. S. Evaluation of thermodynamic properties using GAB model to describe the desorption process of cocoa beans. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 46, n. 10, p. 2077-2084, 2011.

OLIVEIRA, D. E. C.; RESENDE, O.; CAMPOS, R. C.; DONADON, J. R. Obtenção e modelagem das isotermas de dessorção e do calor isostérico para sementes de arroz em casca. **Científica**, v. 42, n. 3, p. 203-210, 2014.

RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; MARTINAZZO, A.P.; RIBEIRO, R.M. Isotermas e calor isostérico de dessorção do arroz em casca. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. 31, n. 1, p. 91-91, 2006a.

RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; RIBEIRO, D.M. Isotermas e calor isostérico de sorção do feijão. **Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 26, n. 3, p. 626-631, 2006b.

SILVA, H. W.; RODOVALHO, R. S. Isotermas de dessorção das sementes de pimenta malagueta. **Global Science and Technology**, v. 5, n. 1, p. 32-39, 2012.

SILVA, H. W.; COSTA, L. M.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C.; SOARES, R. S.; VALE, L. S. R. Higroscopicidade das sementes de pimenta (*Capsicum chinense* L.). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 8, p. 780-784, 2015.

## CAPÍTULO 2

### PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DOS FRUTOS DE BARU (*Dipteryx alata* Vogel)

**Resumo:** Neste trabalho, objetivou-se determinar e avaliar as propriedades termodinâmicas para diferentes teores de água de equilíbrio dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel). Para obter os dados experimentais, utilizou-se o método estático direto. O experimento foi desenvolvido no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - *Campus* Rio Verde no Laboratório de Pós-Colheita de Produtos Vegetais. Para determinar as propriedades termodinâmicas dos frutos de baru, foi utilizado o modelo de Halsey Modificado. Com base nos resultados obtidos, concluiu-se que as propriedades termodinâmicas são influenciadas pelo teor de água. O calor isostérico integral de dessorção aumenta com o decréscimo do teor de água de equilíbrio. O processo de dessorção dos frutos de baru é controlado pela entalpia. A energia livre de Gibbs é positiva para as temperaturas estudadas, com aumento ao longo do processo de dessorção, mostrando ser um processo não espontâneo.

**Palavras-chave:** Calor isostérico; entalpia; entropia; energia livre de Gibbs.

### THERMODYNAMIC PROPERTIES OF BARU FRUIT (*Dipteryx alata* Vogel)

**Abstract:** This paper aimed to determine and evaluate the thermodynamic properties for different equilibrium moisture content of baru fruit (*Dipteryx alata* Vogel). Direct static method was used to obtain the experimental data. The experiment was carried out at the Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano (Federal Institute of

Education, Science, and Technology of Goiás State, Brazil), Rio Verde *Campus*, at the Laboratório de Pós-Colheita de Produtos Vegetais (Postharvest Laboratory of Vegetable Products). Modified Halsey model was used to determine the thermodynamic properties of the baru fruit. On the basis of the results, it was concluded that the thermodynamic properties of the baru fruit are affected by the moisture content. The full isosteric heat of desorption increases with the decrease of the equilibrium moisture content. The desorption process of baru fruit is controlled by enthalpy. The Gibbs free energy is positive for the studied temperatures and has increased during the desorption process, showing that it is a non-spontaneous process.

**Keywords:** Isosteric heat; enthalpy; entropy; Gibbs free energy.

## INTRODUÇÃO

Baru (*Dipteryx alata* Vogel) é uma planta típica do Cerrado, seus frutos são do tipo drupa, com coloração castanho-clara, contendo uma semente comestível de formato elíptico, de cor marrom escura, comumente chamada de amêndoa. Esta semente tem grande importância regional e tem atraído interesse científico devido à sua composição nutricional. As amêndoas de baru têm maiores teores de ácidos graxos monoinsaturados (51,1%) e menores teores de ácidos graxos saturados (BENTO et al., 2014).

Entretanto, para manutenção da qualidade dos frutos e da amêndoa após a colheita, é necessário o conhecimento dos processos de pós-colheita. Entre os processos mais utilizados para a manutenção da qualidade dos produtos agrícolas após a colheita, destaca-se a secagem, por reduzir a atividade biológica e as mudanças químicas e físicas que ocorrem durante o armazenamento (RESENDE et al., 2008), evitando danos à qualidade dos frutos. A secagem é indispensável para o controle e manutenção da qualidade dos produtos agrícolas (OLIVEIRA et al., 2011).

Além da secagem, o estudo das propriedades termodinâmicas tem a finalidade de compreender as propriedades da água e calcular as necessidades energéticas associadas com o calor e transferência de massa em sistemas biológicos (CLADERA-OLIVEIRA et al., 2011).

O conhecimento das propriedades termodinâmicas nos processos de secagem de produtos agrícolas é importante para projetar equipamentos de secagem, estudar as propriedades da água adsorvida, calcular a energia requerida nesse processo e ainda

avaliar a microestrutura dos alimentos e o estudo dos fenômenos físicos que ocorrem na superfície dos alimentos (CORRÊA et al., 2010).

Além disso, a determinação das propriedades termodinâmicas é fundamental para prever o ponto final no qual o fruto deve ser secado de modo a obter um produto que possa ser armazenado por longos períodos, consumindo uma quantidade mínima de energia para reduzir o teor de água a níveis indicados para um armazenamento seguro. Recentemente, parâmetros termodinâmicos, como entalpia, entropia, energia livre de Gibbs, foram investigados em diferentes produtos, entre os quais: sementes de quiabo (GONELI et al., 2010), grãos de cacau (OLIVEIRA et al., 2011), milho (SMANIOTTO et al., 2012), pinhão-manso (OLIVEIRA et al., 2014a), sementes de tucumã-de-Goiás (OLIVEIRA et al., 2014b), semente de cactos (HASSINI et al., 2015) e pimenta (SILVA et al., 2016).

Ressalta-se que não foram encontrados estudos sobre as propriedades termodinâmicas dos frutos de baru. Assim, o objetivo neste trabalho foi estudar as propriedades termodinâmicas dos frutos de baru em função do teor de água de equilíbrio.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Pós-Colheita de Produtos Vegetais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – *Campus* Rio Verde. Foram utilizados frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel) coletados no Município de Santa Helena de Goiás, Goiás, a 17°48' S 50°35' O e altitude de 568 m, com teor de água de 43% base seca (b.s.).

Para obtenção do teor de água de equilíbrio higroscópico, foi utilizado o método estático-gravimétrico e, para cada repetição, foram colocados aproximadamente 50 g de frutos envolvidos por um tecido permeável (voile) para permitir a passagem do ar através do produto, sendo em seguida colocados no interior de dessecadores. A temperatura e a umidade relativa do ar foram monitoradas por meio de um data logger inserido no interior dos dessecadores.

A umidade relativa no interior dos dessecadores foi controlada com a utilização de soluções saturadas de diferentes sais (cloreto de lítio, cloreto de cálcio, nitrato de cálcio, cloreto de sódio e brometo de potássio). Os dessecadores foram colocados em câmaras

incubadoras tipo B.O.D. (Biochemical Oxigen Demand), reguladas nas temperaturas de 20, 25, 30 e 35 °C.

Para determinar as propriedades termodinâmicas dos frutos de baru, foi utilizado o modelo de Halsey Modificado, por ter apresentado o melhor ajuste aos dados experimentais, tendo sido o coeficiente de determinação, erro médio estimado (SE), *Qui*-quadrado ( $\chi^2$ ) e o erro médio relativo (P) 99,46%; 0,72; 0,52 e 4,44%, respectivamente. Os valores de atividade de água foram obtidos pela seguinte expressão:

$$X_e = \left[ \exp(2,8707^{**} - 0,0084^{**} \cdot T) / -\ln(a_w) \right]^{\frac{1}{1,2483^{**}}} \quad (1)$$

\*\* Significativo a 1% pelo teste t.

Em que:

X<sub>e</sub>: teor de água de equilíbrio, % b.s.;

a<sub>w</sub>: atividade de água, decimal; e

T: temperatura, °C.

Brooker et al. (1992), tendo como referência os estudos de Clausius-Clapeyron, propuseram a seguinte equação para quantificar a pressão parcial do vapor, contida em sistemas porosos:

$$\ln(P_v) = \left( \frac{L}{L'} \right) \cdot \ln(P_{vs}) + C \quad (2)$$

Em que:

P<sub>vs</sub>: pressão de vapor de saturação da água livre, para determinada temperatura (T), de equilíbrio;

P<sub>v</sub>: pressão de vapor da água livre, para determinada temperatura T, de equilíbrio;

L: calor latente de vaporização da água do produto, kJ kg<sup>-1</sup>;

L': calor latente de vaporização da água livre, a temperatura de equilíbrio, kJ kg<sup>-1</sup>; e

C: constante de integração.

Com base nas isotermas de sorção dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel), determinou-se o valor da relação L/L' da Equação 3, conforme metodologia descrita por Pereira (1987) para diferentes teores de água de equilíbrio, X<sub>e</sub> (decimal), sendo ajustada

a equação para a entalpia de vaporização da água, apresentada por Rodrigues - Arias (BROOKER et al., 1992), com a inclusão de mais um parâmetro na Equação 3 para melhorar as estimativas de  $L/L'$  (CORRÊA et al., 1998):

$$\frac{L}{L'} - 1 = a \cdot \text{Exp}(-b \cdot X e^m) \quad (3)$$

Em que:

a, b, m: parâmetros determinados por regressão.

O calor latente de vaporização da água livre ( $\text{kJ kg}^{-1}$ ) à temperatura de equilíbrio ( $^{\circ}\text{C}$ ) foi calculado utilizando a temperatura média (T) na faixa em estudo, em  $^{\circ}\text{C}$ , por meio da seguinte equação:

$$L' = 2502,2 - 2,39 \cdot T \quad (4)$$

Calculou-se a pressão de vapor de saturação da água livre,  $P_{vs}$ , mediante a equação de Thétens:

$$P_{vs} = 0,61078 \cdot 10^{((7,5T)/(273,3+T))} \quad (5)$$

O valor da pressão de vapor,  $P_v$ , foi determinado de acordo com a seguinte equação:

$$P_v = a_w \cdot P_{vs} \quad (6)$$

Para estimar o calor latente de vaporização da água do produto (CORRÊA et al., 1998), combinam-se as Equações 3 e 4, chegando-se à seguinte expressão: :

$$L = (2502,2 - 2,39 \cdot T) \cdot [1 + a \cdot \text{Exp}(-b \cdot X e^m)] \quad (7)$$

Para os cálculos do calor isostérico líquido de sorção (ou entalpia diferencial) para cada teor de água de equilíbrio, utilizou-se a equação de Clausius-Clayperon (IGLESIAS & CHIRIFE 1976):

$$\frac{\partial \ln(a_w)}{\partial T} = \frac{\Delta h_{st}}{RT_{abs}^2} \quad (8)$$

Em que:

$T_{abs}$ : temperatura absoluta, K;

$h_{st}$ : entalpia diferencial,  $\text{kJ kg}^{-1}$ ; e

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

Integrando a Equação 8 e assumindo que o calor isostérico líquido de sorção seja independente da temperatura, o teor de água de equilíbrio é obtido conforme a Equação 9 (WANG & BRENNAN 1991):

$$\ln(a_w) = -\left(\frac{h_{st}}{R}\right) \cdot \frac{1}{T_{abs}} + C \quad (9)$$

Em que:

C: parâmetro do modelo.

O calor isostérico integral de sorção foi obtido, adicionando aos valores de calor isostérico líquido de sorção, o valor do calor latente de vaporização da água livre, de acordo com a Equação 9, e o valor de calor latente de vaporização da água livre ( $L'$ ), em  $\text{kJ kg}^{-1}$ , necessário ao cálculo de  $Q_{st}$  foi obtido utilizando a Equação 10:

$$Q_{st} = h_{st} + L' = a \cdot \exp(-b \cdot X_e) + L' \quad (10)$$

Em que:

$Q_{st}$ : calor isostérico integral de sorção,  $\text{kJ kg}^{-1}$ ; e

a, b: parâmetros do modelo.

A entropia diferencial de sorção foi calculada pela equação de Gibbs-Helmholtz, mostrada a seguir (RIZVI, 1995):

$$S = \frac{h_{st} - G}{T_{abs}} \quad (11)$$

Em que:

S: entropia diferencial de sorção ( $\text{kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ); e

G: energia livre de Gibbs ( $\text{kJ kg}^{-1}$ ).

A energia livre de Gibbs pode ser calculada pela seguinte equação:

$$G = R \cdot T_{abs} \cdot \ln(a_w) \quad (12)$$

Os efeitos de mudanças na sorção da água sobre a energia livre normalmente são acompanhados de alterações nos valores de entalpia e entropia. Assim, substituindo a Equação 11 na 12 e rearranjando, tem-se:

$$\ln(a_w) = \frac{h_{st}}{R \cdot T_{abs}} - \frac{S}{R} \quad (13)$$

Os valores da entalpia diferencial e da entropia diferencial de sorção foram calculados pela Equação 14. Os valores calculados de entalpia diferencial de sorção ( $h_{st}$ ) e de entropia ( $S$ ) foram correlacionados pela equação a seguir (BERISTAIN et al. 1996):

$$h_{st} = T_B \cdot S + G_B \quad (14)$$

Em que:

$T_B$ : temperatura isocinética (K); e

$G_B$ : energia livre de Gibbs à temperatura isocinética ( $\text{kJ kg}^{-1}$ ).

A temperatura isocinética representa a temperatura em que todas as reações em série ocorrem em uma mesma taxa. Uma vez que a entalpia e a entropia são altamente correlacionadas, assume-se que a teoria da compensação possa ser válida para a sorção (BERISTAIN et al. 1996). Para confirmar a existência da compensação, a temperatura isocinética foi comparada com a média harmônica das temperaturas utilizadas para determinação das isotermas de sorção, conforme a Equação 15 (KRUG et al. 1976a, 1976b):

$$T_{hm} = \frac{n}{\sum \left( \frac{1}{T} \right)} \quad (15)$$

Em que:

$T_{hm}$ : média harmônica da temperatura (K); e

$n$ : número de temperaturas utilizadas.

De acordo com Krug et al. (1976a; 1976b), a compensação química linear ou a teoria da compensação só existe se a temperatura isocinética ( $T_B$ ) for diferente da média harmônica da temperatura ( $T_{hm}$ ). Um intervalo de confiança aproximado,  $(1-\alpha)$  100%, para a temperatura isocinética foi calculado pela seguinte equação:

$$T_B = T_{hm} \pm t_{m-2, \alpha/2} \sqrt{\text{Var}(T_B)} \quad (16)$$

Em que:

$$\hat{T}_B = \frac{\sum (h_{st} - \bar{h}_{st})(S - \bar{S})}{\sum (S - \bar{S})^2} \quad (17)$$

e,

$$\text{Var}(T_B) = \frac{\sum (h_{st} - \bar{G}_B - \hat{T}_B \cdot S)^2}{(m-2) \sum (S - \bar{S})^2} \quad (18)$$

Em que:

m: número de pares de dados de entalpia e entropia;

$\bar{h}_{st}$ : entalpia média, kJ kg<sup>-1</sup>; e

$\bar{S}$ : entropia média kJ kg<sup>-1</sup>.

Se a média harmônica da temperatura  $T_{hm}$  estiver dentro do intervalo calculado da temperatura isocinética  $T_B$ , a relação entre os valores de entalpia e entropia diferencial de sorção reflete apenas erros experimentais, não a existência de fatores químicos e físicos que regem a teoria da compensação (BERISTAIN et al. 1996). Adotou-se para  $T_B$  um intervalo de confiança de 99% em toda a faixa de dados observados.

O erro médio relativo (P) foi calculado conforme a seguinte expressão:

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (19)$$

Em que:

Y: valor experimental;

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

n: número de observações experimentais.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 estão apresentados os valores de atividade de água estimados pelo modelo de Halsey Modificado, Equação 1, para as temperaturas de 20, 25, 30 e 35 °C e para os teores de água de equilíbrio de 4,2 a 29,5 (% b.s.). Com o aumento do teor de água, tem-se acréscimo da atividade de água, sendo o mesmo efeito observado com

aumento da temperatura. Este comportamento foi observado por outros autores estudando as propriedades termodinâmicas de diversos produtos agrícolas como milho (SMANIOTTO et al., 2012), pinhão-manso (OLIVEIRA et al., 2014a) e pimenta (SILVA et al., 2016)

**Tabela 1.** Valores de atividade de água (decimal) estimados pelo modelo de Halsey Modificado em função da temperatura e do teor de água de equilíbrio

Xe (% b.s.)	Temperatura (°C)			
	20	25	30	35
4,2	0,0856	0,0947	0,1043	0,1145
4,5	0,0992	0,1091	0,1195	0,1304
4,6	0,1077	0,1181	0,1289	0,1402
5,7	0,1842	0,1974	0,2110	0,2250
6,8	0,2526	0,2674	0,2823	0,2973
7,7	0,3093	0,3246	0,3400	0,3554
8,6	0,3635	0,3789	0,3944	0,4097
8,8	0,3710	0,3865	0,4019	0,4172
9,0	0,3813	0,3967	0,4121	0,4274
9,1	0,3870	0,4024	0,4177	0,4330
9,7	0,4172	0,4325	0,4476	0,4627
12,4	0,5254	0,5395	0,5534	0,5670
21,7	0,7255	0,7351	0,7445	0,7535
24,1	0,7547	0,7635	0,7720	0,7803
24,3	0,7574	0,7661	0,7745	0,7827
25,9	0,7739	0,7821	0,7900	0,7977
28,4	0,7951	0,8026	0,8099	0,8169
29,5	0,8041	0,8113	0,8183	0,8251

Os valores de atividade de água, Tabela 1, foram utilizados para determinação dos valores da entalpia diferencial de dessorção. Na Tabela 2 são apresentados os valores da relação  $L/L'$  para os diferentes teores de água. O decréscimo do teor de água proporciona aumento na relação  $L/L'$  para os frutos de baru.

**Tabela 2.** Relações entre L/L' para os diferentes teores de água dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel)

Teor de água (% b.s.)	Relação L/L'	Teor de água (% b.s.)	Relação L/L'
4,2	1,3317	9,1	1,1281
4,5	1,3118	9,7	1,1180
4,6	1,3006	12,4	1,0868
5,7	1,2283	21,7	1,0433
6,8	1,1856	24,1	1,0380
7,7	1,1583	24,3	1,0375
8,6	1,1365	25,9	1,0346
8,8	1,1338	28,4	1,0309
9,0	1,1301	29,5	1,0294

Os valores da relação L/L' aumentam com a redução do teor de água, sendo que para elevados teores de água, estes valores foram próximos a 1,0. Oliveira et al. (2014b) e Silva e Rodovalho (2016), em estudos com sementes de tucumã-de-Goiás e de pimenta malagueta, respectivamente, verificaram comportamento semelhante.

Na Tabela 3 estão apresentados os parâmetros “a”, “b” e “m” utilizados para o cálculo da relação entre o calor latente de vaporização da água de produtos agrícolas (L) e o calor latente da água livre (L/L') obtidos por meio de regressão não linear. A equação de regressão pode ser utilizada para estimar o calor latente de vaporização para os frutos de baru, uma vez que apresenta elevado coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) e baixo erro médio relativo (P).

**Tabela 3.** Parâmetros “a”, “b” e “m” utilizados para o cálculo da relação entre o calor latente de vaporização da água de produtos agrícolas e o calor latente da água livre (L/L')

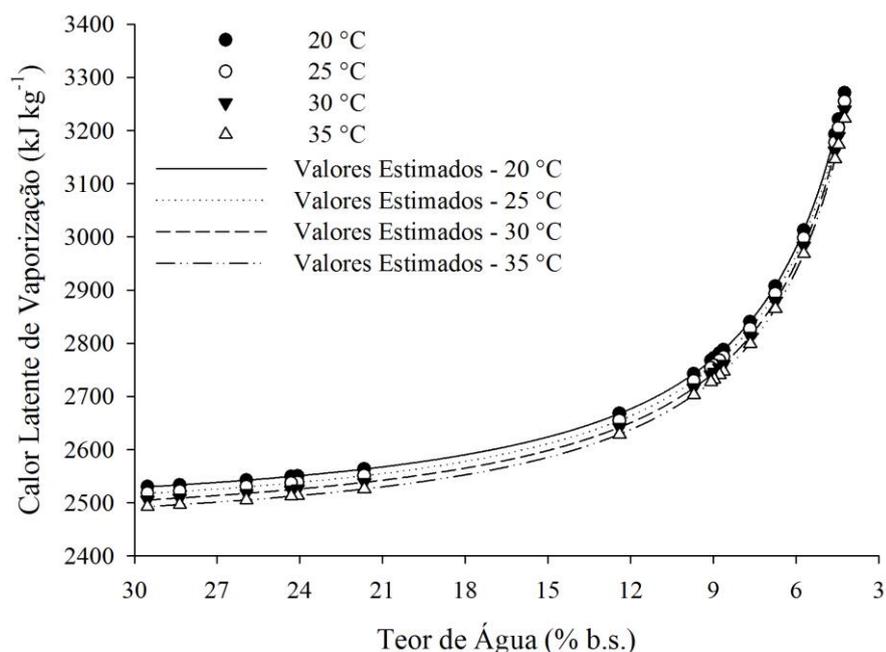
a	b	m	R <sup>2</sup> (%)	P (%)
1,2886x10 <sup>-13</sup> **	-30,4896**	-0,0448**	99,99	1,50

\*\*Significativo a 1% pelo teste de t.

Alterando os valores de “a”, “b” e “m” na equação proposta por Corrêa et al. (1998), obtém-se a seguinte equação para o cálculo do calor latente de vaporização da água para os frutos de baru.

$$L = (2502,2 - 2,39 \cdot T) \cdot \left[ 1 + 1,2886 \times 10^{-13} \cdot \exp(30,4896 \cdot X e^{-0,0448}) \right] \quad (20)$$

Na Figura 1 são ilustradas as curvas de calor latente de vaporização de água dos frutos de baru nas temperaturas de 20, 25, 30 e 35 °C.



**Figura 1.** Valores experimentais e estimados do calor latente de vaporização da água em função do teor de água de equilíbrio para os frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel).

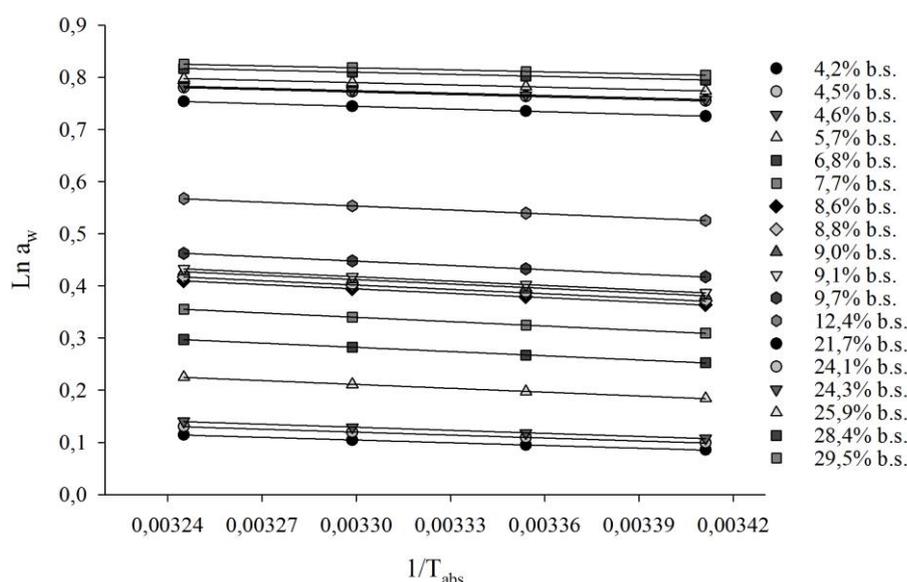
O calor latente de vaporização é inversamente proporcional ao teor de água e à temperatura dos frutos de baru, sendo que para o mesmo teor de água, o aumento da temperatura promoveu redução do calor latente de vaporização, corroborando os resultados obtidos por Oliveira et al. (2014a, b).

O calor latente de vaporização dos frutos de baru variou de 3.271,06 a 2.493,09 kJ kg<sup>-1</sup> para os teores de água de 4,2 a 29,5% b.s.. Brooker et al. (1992) ressaltam que o calor latente de vaporização do produto é influenciado principalmente pelo teor de água e pela temperatura.

Em estudos com sementes de pinhão-manso (OLIVEIRA et al., 2014a) e grãos de milho (SMANIOTTO et al., 2012), os autores verificaram que o calor latente variou de 2.762,92 a 2.495,56 kJ kg<sup>-1</sup> com teores de água de 5,61 a 13,42% b.s. para as sementes de pinhão-manso e de 2.775,87 a 2.468,14 kJ kg<sup>-1</sup> na faixa de 12,76 a 23,26%

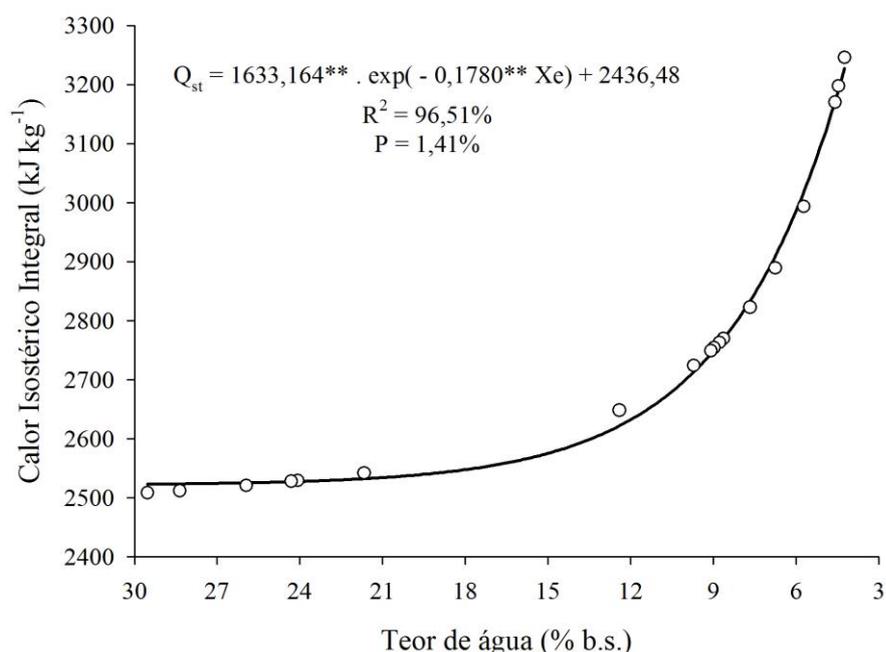
b.s. para os grãos de milho. Esta variação nos valores obtidos para os diferentes produtos agrícolas pode estar relacionada com a estrutura e a composição química, além da temperatura e do teor de água.

Na Figura 2 estão apresentadas as retas do logaritmo neperiano da atividade de água (decimal), para específicos valores de teor de água de equilíbrio (% b.s.), em função de valores do inverso da temperatura absoluta para os frutos de baru. As retas se ajustaram bem aos dados experimentais. Hassini et al. (2015), estudando as propriedades das sementes de cactos da variedade Ameclya, verificaram comportamento semelhante.



**Figura 2.** Curvas do logaritmo neperiano da atividade de água (decimal), para específicos valores de teor de água de equilíbrio (% b.s.), em função de valores de  $1/T_{abs}$  para os frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel).

Na Figura 3 são apresentados os valores do calor isostérico integral de dessorção em função do teor de água de equilíbrio (% b.s.), para os frutos de baru. A redução do teor de água proporcionou aumento da energia necessária para a remoção de água do produto, representada pelos valores do calor isostérico integral de dessorção ( $Q_{st}$ ), conforme observado por Oliveira et al. (2011) e por Silva et al. (2016), estudando grãos de cacau e sementes de pimenta, respectivamente.



\*\*Significativo a 1% pelo teste de t.

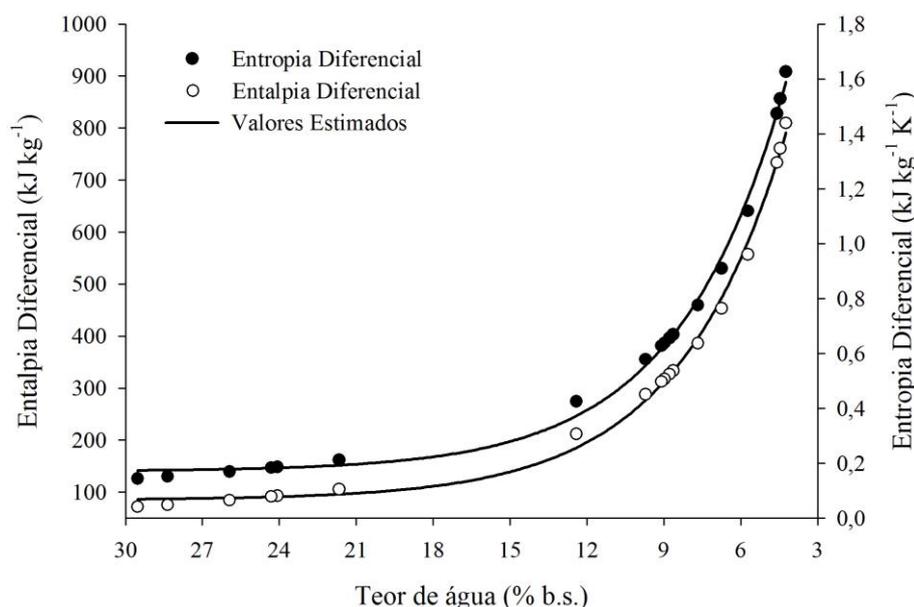
**Figura 3.** Valores experimentais e estimados do calor isotérico integral de dessorção em função do teor de água de equilíbrio para os frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel).

Os valores do calor isotérico dos frutos de baru variaram de 2.508,28 a 3.246,07 kJ kg<sup>-1</sup>, para os respectivos teores de água de 29,5 e 4,2% b.s. A necessidade de maior gasto de energia em teores de água mais baixos ocorre em função da proximidade das moléculas de água da camada monomolecular, estando estas camadas fortemente ligadas às moléculas de matéria seca, necessitando assim de elevadas quantidades de energia para sua remoção (AL-MUHTASEB et al., 2004).

Oliveira et al. (2011), estudando as propriedades termodinâmicas de grãos de cacau (*Theobroma cacao*) com teores de água de equilíbrio de 5,9 a 16,67% b.s., verificaram comportamento semelhante para o calor isotérico integral, ressaltando que o conhecimento do calor isotérico é vital para os estudos sobre as condições de armazenagem.

Ainda na Figura 3, nota-se que a equação de regressão pode ser utilizada para estimar o calor isotérico integral de dessorção para os frutos de baru, pois apresenta elevado coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e baixo erro médio relativo (P).

Na Figura 4 estão apresentados os valores de entalpia diferencial ( $h_{st}$ ) e entropia diferencial (S) de dessorção, em função do teor de água de equilíbrio (% b.s.).



**Figura 4.** Valores observados e estimados de entalpia e entropia diferencial de dessecamento dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel).

Os valores de entalpia e entropia diferenciais apresentaram tendências similares em relação ao teor de água, sendo que a entalpia e a entropia diferenciais também apresentam tendência a se estabilizar para elevados teores de água. A entalpia e a entropia diferenciais aumentam com a redução do teor de água dos frutos de baru, Figura 4, em consonância com os resultados obtidos para as sementes de quiabo (GONELI et al., 2010), pinhão (CLADERA-OLIVERA et al., 2008; THYS et al., 2010), cacau (OLIVEIRA et al., 2011), pinhão-manso (OLIVEIRA et al., 2014a) e tucumã-de-Goiás (OLIVEIRA et al., 2014b). Além disso, verifica-se que os valores de entalpia e entropia diferencial variaram de 71,80 a 809,60  $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$  e 0,1443 a 1,6263  $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ , respectivamente, para a faixa de teor de água de 3,9 a 10,9 % b.s..

Este comportamento da entropia está relacionado com a mobilidade das moléculas de água, presentes durante o processo de dessecamento. Com a elevada atividade de água, há menos locais disponíveis para as ligações entre as moléculas, implicando menor demanda de mobilidade das moléculas de água (GONELI et al. 2010).

Na Tabela 4 estão apresentadas as equações para determinar a entalpia e entropia diferencial, bem como os coeficientes de determinação para os frutos de baru. As equações apresentaram elevados coeficientes de determinação e baixo erro médio relativo. Além disso, todos os parâmetros das equações foram significativos a 1% de

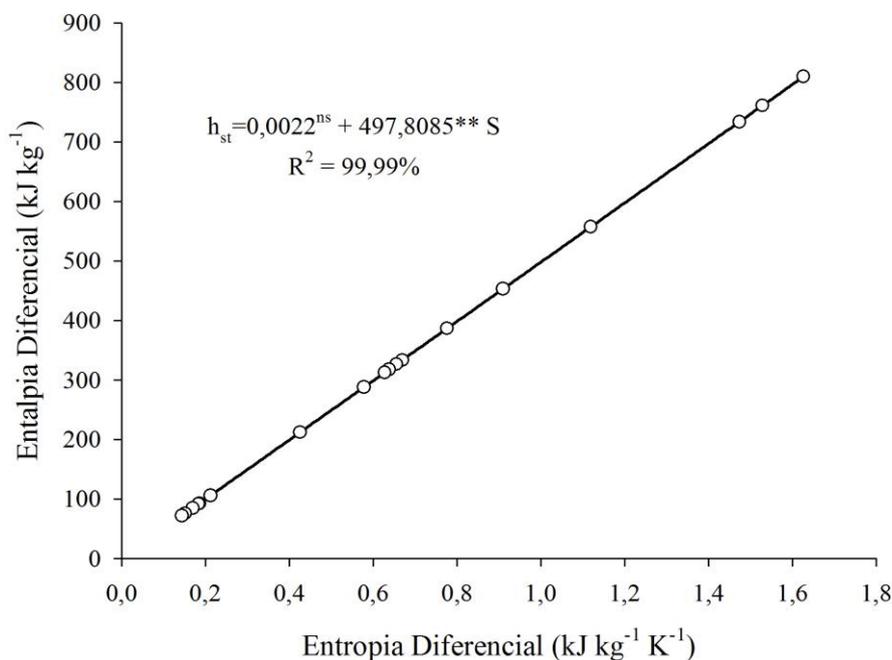
significância pelo teste t, evidenciando a adequação das equações aos dados experimentais.

**Tabela 4.** Equações e coeficientes de determinação de entalpia ( $h_{st}$ ) e entropia diferenciais (S) de dessorção dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel)

Propriedades	Equações	R <sup>2</sup>	P
Termodinâmicas		(%)	(%)
Entalpia diferencial	$h_{st}=84,6574^{**}+1942,4311^{**}.\exp(-0,2384^{**}.Xe)$	99,73	4,869
Entropia diferencial	$S=0,1700^{**}+3,9019^{**}.\exp(-0,2384^{**}.Xe)$	99,73	4,867

\*\*Significativo a 1% pelo teste de t.

Na relação entre entalpia e entropia no processo de dessorção para os frutos de baru, os dados se ajustaram ao modelo linear (Figura 5). Nota-se a elevada precisão experimental pelo elevado coeficiente de determinação (99,99%).



\*\*Significativo a 1% pelo teste de t. <sup>ns</sup>Não significativo pelo teste de t.

**Figura 5.** Relação entalpia-entropia para o processo de dessorção da água dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel).

Com a linearidade entre a relação de entalpia diferencial e entropia diferencial de sorção, pode-se considerar válida a teoria isocinética ou teoria da compensação entalpia-entropia para o fenômeno de dessorção de água dos frutos de baru. Thys et al. (2010) e Silva et al. (2016) verificaram comportamento semelhante para sementes de pinhão e pimenta.

Na Tabela 5 estão apresentados a temperatura isocinética e os resultados do Teste de Krug para os frutos de baru.

**Tabela 5.** Temperatura isocinética para o processo de dessorção dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel)

Temperatura isocinética ( $T_B$ )	497,81
Temperatura media harmônica $T_{hm}$	299,48
Variância da temperatura isocinética $Var(T_B)$	0,000039
Intervalo de temperatura isocinética	[497,83; 497,79]

A compensação linear é verificada apenas se  $T_B \neq T_{hm}$ . Caso  $T_{hm}$  esteja no intervalo de temperatura isocinética, considera-se um erro experimental. Se  $T_B > T_{hm}$  indica que o processo é controlado pela entalpia, caso contrário,  $T_B < T_{hm}$ , o processo será controlado pela entropia (GABAS et al., 2005).

O valor obtido de média harmônica está fora do intervalo de temperatura isocinética e foi diferente da temperatura isocinética. Ainda na Tabela 5, a temperatura isocinética foi maior que a temperatura da média harmônica, indicando que o processo é controlado pela entalpia. Esses resultados estão de acordo com diversos pesquisadores que têm aplicado com sucesso a teoria isocinética sobre a sorção de vários produtos (GONELI et al., 2010; LAGO et al., 2013; LAGO & NOREÑA, 2015; SILVA et al., 2016).

Na Tabela 6 está apresentada a energia livre de Gibbs em função dos teores de água para cada temperatura durante o processo de dessorção, para os frutos de baru.

**Tabela 6.** Energia livre de Gibbs em função do teor de água dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel)

Xe % b.s.	Temperatura (°C)			
	20	25	30	35
4,2	332,91	324,66	316,53	308,52
4,5	312,91	305,16	297,51	289,98
4,6	301,72	294,25	286,88	279,62
5,7	229,10	223,43	217,83	212,32
6,8	186,29	181,67	177,12	172,64
7,7	158,90	154,96	151,08	147,25
8,6	137,04	133,64	130,29	127,00
8,8	134,25	130,93	127,65	124,42
9,0	130,56	127,32	124,14	120,99
9,1	128,56	125,37	122,23	119,14
9,7	118,38	115,44	112,55	109,70
12,4	87,13	84,98	82,85	80,75
21,7	43,46	42,38	41,32	40,28
24,1	38,11	37,16	36,23	35,31
24,3	37,63	36,69	35,78	34,87
25,9	34,71	33,85	33,01	32,17
28,4	31,05	30,28	29,52	28,78
29,5	29,53	28,79	28,07	27,36

A energia livre de Gibbs aumenta com o decréscimo do teor de água, sendo positiva para todas as temperaturas estudadas, com tendência a se estabilizar em níveis mais elevados de teor de água de equilíbrio. Este comportamento também foi observado por Oliveira et al. (2010), Oliveira et al. (2011) e por Goneli et al. (2010), estudando sementes de milho doce, grãos de cacau e sementes de quiabo, respectivamente.

A energia livre de Gibbs está relacionada ao trabalho necessário para tornar os sítios de sorção disponíveis (NKOLO MEZE'E et al., 2008). Os valores de energia livre de Gibbs positivos são característicos de uma reação exógena, ou seja, aquela que necessita de um agente externo fornecendo energia ao ambiente. Estes valores positivos são esperados, uma vez que a dessorção é um processo não espontâneo, conforme

observado no presente trabalho para os frutos de baru, e corroboram os resultados obtidos por Cladera-Olivera et al. (2011) e Oliveira et al. (2014b).

A energia livre de Gibbs para cada temperatura pode ser descrita pela regressão exponencial, Equação 21, conforme Oliveira et al. (2011):

$$G = \alpha \cdot \text{Exp}(-\beta \cdot X_{e^*}) + \delta \quad (21)$$

Em que:

$\alpha$ ,  $\beta$  e  $\delta$ : parâmetros de regressão da equação.

Na Tabela 7 estão apresentadas as equações de regressão da energia livre de Gibbs, para os frutos de baru.

**Tabela 7.** Equações da energia livre de Gibbs para as diversas temperaturas

Temperatura (° C)	Equação	R <sup>2</sup> (%)	P (%)
20	$\Delta G = 798,729^{**} \exp(-0,238^{**} X_e) + 34,812^{**}$	99,73	4,869
25	$\Delta G = 778,944^{**} \exp(-0,238^{**} X_e) + 33,949^{**}$	99,73	4,869
30	$\Delta G = 759,435^{**} \exp(-0,238^{**} X_e) + 33,099^{**}$	99,73	4,869
35	$\Delta G = 740,213^{**} \exp(-0,238^{**} X_e) + 32,261^{**}$	99,73	4,869

\*\*Significativo a 1% pelo teste de t.

As equações apresentaram elevados coeficientes de determinação e baixo erro médio relativo, e todos os parâmetros das equações foram significativos a 1% de significância pelo teste t, sendo assim possível determinar a energia livre de Gibbs para as temperaturas estudadas. Nota-se que os parâmetros  $\alpha$  e  $\delta$  diminuem com aumento da temperatura e o parâmetro  $\beta$  foi igual para todas as temperaturas.

## CONCLUSÕES

As propriedades termodinâmicas são influenciadas pelo teor de água dos frutos de baru, com aumento da energia necessária para a retirada de água do produto, com a redução do teor de água.

O calor isostérico integral de desorção aumenta com a redução do teor de água, ocorrendo incremento da energia necessária para a remoção de água do produto.

O calor latente de vaporização, a entalpia, a entropia e a energia livre de Gibbs aumentam com a redução do teor de água dos frutos de baru, sendo o processo de dessecção controlado pela entalpia.

A energia livre de Gibbs é positiva para as temperaturas de 20, 25, 30 e 35 °C e aumenta ao longo do processo de dessecção, sendo um processo não espontâneo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-MUHTASEB, A. H.; MCMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Water sorption isotherms of starch powders. Part 2: Thermodynamic characteristics. **Journal of Food Engineering**, v. 62, n. 2, p. 135-142, 2004.

BENTO, A. P. N.; COMINETTI, C.; SIMÕES FILHO, A.; NAVES, M. M. V. Baru almond improves lipid profile in mildly hypercholesterolemic subjects: A randomized, controlled, crossover study. **Nutrition, Metabolism & Cardiovascular Diseases**, v. 24, n. 12, p. 1330-1336, 2014.

BERISTAIN, C. I.; GARCIA, H. S.; AZUARA, E. Enthalpy-entropy compensation in food vapor adsorption. **Journal of Food Engineering**, v. 30, n. 3-4, p. 405-415, 1996.

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

CLADERA-OLIVEIRA, F.; MARCZAK, L. D. F.; NOREÑA, C. P. Z.; PETTERMANN, A. C. Modeling water adsorption isotherms of pinhão (*Araucaria angustifolia* seeds) flour and thermodynamic analysis of the adsorption process. **Journal of Food Process Engineering**, v. 34, n. 3, p. 826-843, 2011.

CLADERA-OLIVEIRA, F.; PETTERMANN, A. C.; NOREÑA, C. P. Z.; WADA, K.; MARCZAK, L. D. F. Thermodynamic properties of moisture desorption of raw pinhão (*Araucaria angustifolia* seeds). **International Journal of Food Science and Technology**, v. 43, n. 3, p. 900-907, 2008.

CORRÊA, P. C.; CHRIST, D.; MARTINS, J. H.; MANTOVANI, B. H. M. Curvas de dessecção e calor latente de vaporização para as sementes de milho pipoca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, n. 1, p. 7-11, 1998.

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

- GABAS, A. L.; TELIS-ROMERO, J.; KOHAYAKAWA, M. N.; SILVEIRA JR, V.; PEDRO, M. A. M. Enthalpy-entropy compensation based on isotherms of mango. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 25, n. 2, p. 297-303, 2005.
- GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; BOTELHO, F. M. Water desorption and thermodynamic properties of okra seeds. **Transaction of the ASAE**, v. 53, n. 1, p. 191-197, 2010.
- HASSINI, L.; BETTAIEB, E.; DESMORIEUX, H.; TORRES, S. S.; TOUIL, A. Desorption isotherms and thermodynamic properties of prickly pear seeds. **Industrial Crops and Products**, v. 67, n. 1, p. 457-465, 2015.
- 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.
- KRUG, R. R.; HUNTER, W. G.; GRIEGER, R. A. Enthalpy-entropy compensation. 1 - Some fundamental statistical problems associated with the analysis of Van't Hoff and Arrhenius data. **Journal of Physical Chemistry**, v. 80, n. 21, p. 2335-2341, 1976a.
- KRUG, R. R.; HUNTER, W. G.; GRIEGER, R. A. Enthalpy-entropy compensation. 2 - Separation of the chemical from the statistical effect. **Journal of Physical Chemistry**, v. 80, n. 21, p. 2341-2351, 1976b.
- LAGO, C. C.; LIENDO-CÁRDENAS, M.; NOREÑA, C. P. Z. Thermodynamic sorption properties of potato and sweet potato flakes. **Food and Bioprocess Processing**, v. 91, n. 4, p. 389-395, 2013.
- LAGO, C. C.; NOREÑA, C. P. Z. Thermodynamic analysis of sorption isotherms of dehydrated yacon (*Smallanthus sonchifolius*) bagasse. **Food Bioscience**, v. 12, n. 1, p. 26-33, 2015.
- NKOLO MEZE'E, Y.,N.; NOAH NGAMVENG, J.; BARDET, S. Effect of enthalpy-entropy compensation during sorption of water vapour in tropical woods: The case of Bubinga (*Guibourtia Tessmanii* J. L'eonard; *G. Pellegriniana* J.L.). **Thermochimica Acta**, v. 468, n. 3-4, p. 1-5, 2008.
- OLIVEIRA, G.H.H; CORRÊA, P.C.; ARAÚJO, E.F.; VALENTE, D.S.M.; BOTELHO, F.M. Desorption isotherms and thermodynamic properties of sweet corn cultivars (*Zea mays* L.). **International Journal of Food Science and Technology**, v. 45, n. 3, p. 546-554, 2010.
- OLIVEIRA, G. H. H.; CORRÊA, P. C.; SANTOS, E. S.; TRETO, P. C.; DINIZ, M. D. M. S. Evaluation of thermodynamic properties using GAB model to describe the

- desorption process of cocoa beans. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 46, n. 10, p. 2077-2084, 2011.
- OLIVEIRA, D. E. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H.; SOUZA, K. A.; SMANIOTTO, T. A. S. Propriedades termodinâmicas das sementes de pinhão-mansô. **Bioscience Journal**, v. 30, suplemento 1, p. 147-157, 2014a.
- OLIVEIRA, D. E. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H.; SOUZA, K. A.; SMANIOTTO, T. A. S. Propriedades termodinâmicas de sementes de tucumã-de-goias (*Astrocaryum huaimi* Mart.). **Revista Caatinga**, v. 27, n. 3, p. 53-62, 2014b.
- PEREIRA, I. A. M.; QUEIROZ, D. M. de. **Higroscopia**, Viçosa, MG: Centreinar, 1987, 28 p.
- RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 10, n. 1, p. 17-26, 2008.
- RIZVI, S. S. H. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In: RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H. **Engineering properties of foods**. New York: Academic Press, 1995. p. 223-309.
- SILVA, H. W.; COSTA, L. M.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C.; SOARES, R. S.; VALE, L. S. R. Thermodynamic properties of pepper seeds - variety 'Cabacinha'. **Científica**, v. 44, n. 1, p. 14-22, 2016.
- SMANIOTTO, T. A. S.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C.; SOUSA, K. A.; CAMPOS, R. C. Isotermas e calor latente de dessorção dos grãos de milho da cultivar AG 7088. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 11, n. 3, p. 312-322, 2012.
- THYS, R.C.S.; NOREÑA, C.P.Z.; MARCZAK, L.D.F.; AIRES, A.G.; CLADERA-OLIVERA, F. Adsorption isotherms of pinhão (*Araucaria angustifolia* seeds) starch and thermodynamic analysis. **Journal of Food Engineering**, v. 100, n. 3, p. 468-473, 2010.
- WANG, N.; BRENNAN, J.G. Moisture sorption isotherm characteristics of potato at four temperatures. **Journal of Food Engineering**, v. 14, n. 1, p. 269-287, 1991.

### CAPÍTULO 3

#### CINÉTICA DE SECAGEM DOS FRUTOS DE BARU (*Dipteryx alata* Vogel)

**Resumo:** No presente trabalho, objetivou-se ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel), determinar e avaliar o coeficiente de difusão efetivo, bem como obter a energia de ativação e as propriedades termodinâmicas para o processo durante a secagem em diversas condições de ar. O experimento foi desenvolvido no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – *Campus* Rio Verde. Frutos de baru, com teor de água inicial de  $0,429 \pm 0,044$  (base seca, b.s.), foram submetidos à secagem em estufa com ventilação de ar forçada, em quatro condições de temperatura - 40, 60, 80 e 100 °C - até atingirem o teor de água de  $0,065 \pm 0,018$  (b.s.). Entre os modelos analisados, o Logarítmico apresentou o melhor ajuste para descrever o fenômeno. O coeficiente de difusão efetivo aumenta com a elevação da temperatura, sendo descrito pela equação de Arrhenius, com energia de ativação de  $37,64 \text{ kJ mol}^{-1}$ . A entalpia e a entropia decrescem, enquanto a energia livre de Gibbs aumenta com o incremento da temperatura de secagem.

**Palavras-chave:** Modelagem matemática, difusividade líquida, Logarítmico

#### DRYING KINETICS OF BARU FRUIT (*Dipteryx alata* Vogel)

**Abstract:** This paper aimed at (a) adjusting different mathematical models to experimental data of drying the baru fruit (*Dipteryx alata* Vogel); (b) determining and evaluating the effective diffusion coefficient; and (c) obtaining the activation energy

and thermodynamic properties during the drying process under different air conditions. This experiment was carried out at the Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano (Federal Institute of Education, Science, and Technology of Goiás State, Brazil), Rio Verde *Campus*. The baru fruits, with an initial moisture content of  $0.429 \pm 0.044$  (dry basis-d.b.), were dried in an oven with air ventilation forced into four temperature conditions, 40; 60; 80; and 100 °C, until to reach the moisture content of  $0.065 \pm 0.018$  (dry basis-d.b.). Among the analyzed models, the Logarithmic model showed the best fit to describe the phenomenon. The effective diffusion coefficient increases with increasing temperature, being described by the Arrhenius equation with activation energy of 37.64 kJ mol<sup>-1</sup>. Enthalpy and entropy decrease, while the Gibbs free energy increases with increasing drying temperature.

**Keywords:** Mathematical modeling, liquid diffusivity, Logarithmic.

## INTRODUÇÃO

O baru (*Dipteryx alata* Vogel) pertence à família Fabaceae, de ocorrência em solos mais férteis do cerrado. Árvore alta, podendo atingir mais de 15 metros de altura, com caule ereto e ramos lisos (CORREA et al., 2008), seus frutos têm polpa e amêndoa utilizadas na alimentação humana.

Em meio aos processos de pós-colheita utilizados para a manutenção da qualidade de produtos agrícolas, a secagem destaca-se como forma de reduzir a atividade biológica e as mudanças químicas e físicas que ocorrem durante o armazenamento (RESENDE et al., 2008). As condições e os métodos adotados para a secagem devem ser ajustados para as características de cada produto agrícola (SILVA et al., 2015), assim torna-se relevante a obtenção de informações teóricas sobre a secagem dos frutos de baru.

A secagem é um processo fundamental na tecnologia utilizado para a produção de frutos de alta qualidade, pois permite a redução do teor de água em níveis adequados para o armazenamento, preserva as características físicas e químicas e torna possível a manutenção da qualidade inicial durante o armazenamento, possibilitando colheitas próximas à maturidade fisiológica.

O estudo do processo de secagem fornece informações sobre as características da transferência de energia e massa entre o fruto e o ar. As curvas de secagem em

camada delgada variam com a espécie, variedade, condições ambientais, métodos de preparo pós-colheita, entre outros fatores (CORRÊA et al., 2007). Nesse sentido, inúmeros trabalhos têm sido desenvolvidos com o objetivo de identificar as características de diversos produtos agrícolas durante a secagem, entre os quais, trabalhos com carambola (SANTOS et al., 2010), cenoura (BOTELHO et al., 2011), frutos de crambe (COSTA et al., 2015), folhas de jenipapo (SILVA et al., 2015), pimenta bode (RODOVALHO et al., 2015) e frutos de pimenta Cabacinha (SILVA et al., 2016).

Considerando a importância do estudo teórico do processo de secagem dos produtos vegetais, no presente trabalho objetivou-se ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem dos frutos de baru e determinar e avaliar o coeficiente de difusão efetivo, bem como determinar a energia de ativação e as propriedades termodinâmicas para o processo, durante a secagem em diversas condições de ar.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Pós-Colheita de Produtos Vegetais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - *Campus* Rio Verde. Foram utilizados frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel) coletados manualmente no município de Santa Helena de Goiás - Goiás, com o teor de água inicial de  $0,429 \pm 0,044$  base seca (base seca, b.s.). Os frutos foram submetidos à secagem em estufa com ventilação de ar forçada, em quatro condições de temperatura - 40, 60, 80 e 100 °C - que promoveram as umidades relativas médias de 25,1; 12,2; 5,3 e 1,7%, respectivamente. A secagem prosseguiu até que os frutos atingissem o teor de água de  $0,065 \pm 0,018$  (b.s.), determinado em estufa a  $105 \pm 3$  °C, durante 24 h (BRASIL, 2009).

A redução do teor de água ao longo da secagem foi acompanhada pelo método gravimétrico (perda de massa), conhecendo-se o teor de água inicial do produto até atingir o teor de água desejado. O acompanhamento da redução da massa durante a secagem foi feito com auxílio de uma balança com resolução de 0,01 g.

As temperaturas do ar de secagem e temperatura ambiente foram monitoradas por meio de um termômetro no interior e exterior do secador, sendo a umidade relativa no interior da estufa obtida por meio dos princípios básicos de psicrometria, com o auxílio do programa computacional GRAPSI.

Para a determinação das razões de teor de água dos frutos de baru durante a secagem, utilizou-se a seguinte expressão:

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} \quad (1)$$

Em que:

RX: razão de teor de água do produto, adimensional;

X: teor de água do produto (b.s.);

X<sub>i</sub>: teor de água inicial do produto (b.s.); e

X<sub>e</sub>: teor de água de equilíbrio do produto (b.s.).

Para obter o teor de água de equilíbrio dos frutos de baru em cada temperatura, foi utilizado o modelo de Halsey Modificado, indicado pela Equação 2.

$$X_e = \left[ \exp(2,8707^{**} - 0,0084^{**} \cdot T) / -\ln(a_w) \right]^{\frac{1}{1,2483^{**}}} \quad (2)$$

\*\*Significativo a 1% pelo teste de t.

Os modelos matemáticos frequentemente utilizados para representação da secagem de produtos vegetais, Tabela 1, foram ajustados aos dados experimentais da secagem dos frutos de baru.

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

Designação do modelo	Modelo	
$RX = 1 + a t + b t^2$	Wang e Sing	(3)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k_1 \cdot t)$	Verma	(4)
$RX = \exp \left( \left( \frac{-a \left( a^2 + 4 \cdot b \cdot t \right)^{0,5}}{2 \cdot b} \right) \right)$	Thompson	(5)
$RX = \exp(-k \cdot t^n)$	Page	(6)
$RX = \exp(-k \cdot t)$	Newton	(7)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	Midilli	(8)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$	Logarítmico	(9)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	Henderson e Pabis	(10)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k \cdot a \cdot t)$	Exponencial de Dois Termos	(11)
$RX = a \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$	Dois Termos	(12)
$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \cdot \exp(-k \cdot b \cdot t)$	Aproximação da Difusão	(13)

Em que:

t : tempo de secagem, h;

k, k<sub>0</sub>, k<sub>1</sub> : constantes de secagem h<sup>-1</sup>; e

a, b, c, n : parâmetros dos modelos.

Os modelos matemáticos foram ajustados por meio de análise de regressão não linear pelo método Gauss-Newton e, para o grau de ajuste, considerou-se a magnitude do coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), do teste de *Qui*-quadrado (χ<sup>2</sup>), do erro médio relativo (P) e do desvio padrão da estimativa (SE).

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

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

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

Em que:

Y: valor observado experimentalmente;

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

N: número de observações experimentais; e

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

Para descrever a difusão líquida, foi utilizado o modelo da forma geométrica de cilindro infinito, com aproximação de oito termos, de acordo com a seguinte expressão:

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} = \sum_{n_i=1}^{\infty} \frac{4}{\lambda_n^2} \exp \left[ -\frac{\lambda_n^2 \cdot D \cdot t}{4} \cdot \left( \frac{2}{r} \right)^2 \right] \quad (17)$$

Em que:

$n_i$ : número de termos;

D: coeficiente de difusão líquida,  $m^2 s^{-1}$ ;

r: Raio equivalente, m; e

$\lambda_n$ : raízes da equação de Bessel de ordem zero.

Os raios equivalentes dos frutos foram determinados pela seguinte expressão:

$$r = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V_f}{4 \cdot \pi}} \quad (18)$$

Em que:

$V_f$ : volume dos frutos,  $m^{-3}$

O volume de cada fruto ( $V_f$ ) foi obtido pela medição dos três eixos ortogonais (comprimento, largura e espessura), em quinze unidades, no final da secagem, com auxílio de um paquímetro digital, com resolução de 0,01 mm, de acordo com a seguinte expressão:

$$V_f = \frac{\pi \cdot A \cdot B \cdot C}{6} \quad (19)$$

Em que:

A: comprimento, m;

B: largura, m; e

C: espessura, m.

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

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

Em que:

$D_o$ : fator pré-exponencial;

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

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

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

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

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

As propriedades termodinâmicas do processo de secagem dos frutos de baru foram obtidas pelo método descrito por Jideani & Mpotokwana (2009):

$$H = E_a - R \cdot T \quad (22)$$

$$S = R \cdot \left( \ln k - \ln \frac{k_B}{h_p} \right) - \ln T_{abs} \quad (23)$$

$$G = H - T_{abs} \cdot S \quad (24)$$

Em que:

$H$  = entalpia,  $\text{J mol}^{-1}$ ;

$S$  = entropia,  $\text{J mol}^{-1}$ ;

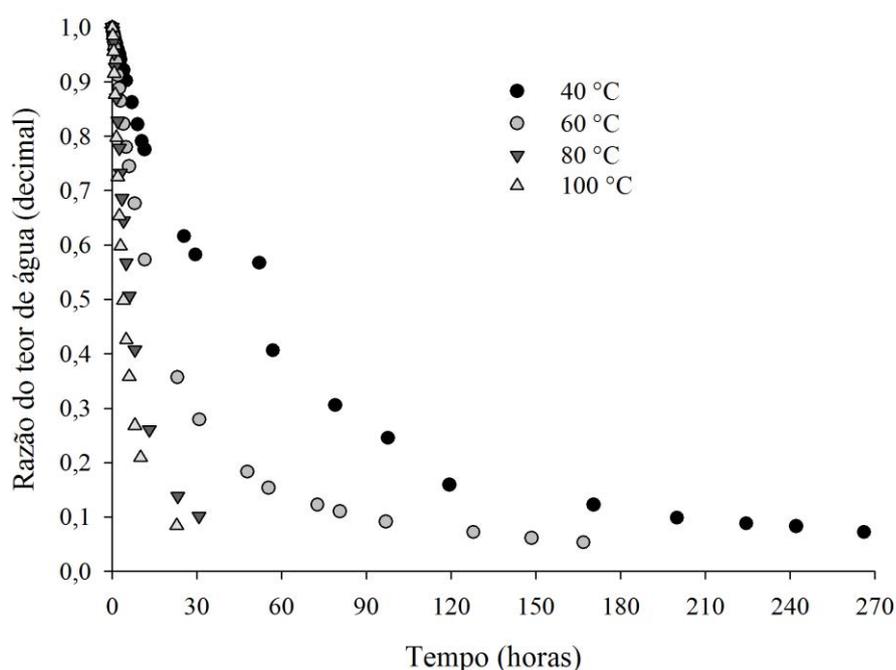
$G$  = energia livre de Gibbs,  $\text{J mol}^{-1}$ ;

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

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

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O tempo necessário para que os frutos atingissem o teor de água de  $0,065 \pm 0,018$  (b.s.) foi de 266,3; 166,9; 30,8 e 22,8 h para as temperaturas de secagem de 40, 60, 80 e 100 °C, respectivamente, evidenciando que o aumento da temperatura do ar promove redução no tempo de secagem dos frutos (Figura 1).



**Figura 1.** Razão de teor de água dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel) ao longo do tempo de secagem em quatro condições de temperatura.

O valor de razão de teor de água diminui bruscamente com o aumento da temperatura de secagem (Figura 1). Com o incremento da temperatura do ar de secagem, ocorre maior taxa de remoção de água do produto, conforme relatado por diversos pesquisadores para diferentes produtos vegetais (ROBERTS et al., 2008; SANTOS et al., 2010; ISQUIERDO et al., 2013; SANTOS et al., 2013; COSTA et al., 2015; RODOVALHO et al., 2015).

A Tabela 2 apresenta os valores do teste de *Qui*-quadrado e erro médio estimado (SE) obtidos para os diferentes modelos ajustados às curvas de secagem dos frutos de baru. Todos os modelos analisados apresentaram valores adequados de *Qui*-quadrado. O valor do *Qui*-quadrado está relacionado à qualidade do ajuste do modelo aos dados experimentais. Günhan et al. (2005) indicam que quanto menor os valores de *Qui*-quadrado melhor será o ajuste do modelo. Assim, de uma maneira geral, os modelos de Thompson, Midilli, Logarítmico, Dois Termos e Aproximação da Difusão apresentaram os menores valores de *Qui*-quadrado. Com relação ao SE, todos os modelos apresentaram valores reduzidos, sendo adequados para o bom ajuste dos modelos aos dados experimentais.

**Tabela 2.** Valores para o teste de *Qui*-quadrado ( $\chi^2$ , decimal  $\times 10^{-4}$ ) e erro médio estimado (SE, decimal) calculados para os onze modelos utilizados na representação da cinética de secagem dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel)

Modelo	40 °C		60 °C		80 °C		100 °C	
	$\chi^2$	SE	$\chi^2$	SE	$\chi^2$	SE	$\chi^2$	SE
Wang e Sing	46,4	0,068	145,4	0,121	19,4	0,044	18,3	0,043
Verma	20,0	0,045	19,0	0,044	4,0	0,020	4,3	0,021
Thompson	8,9	0,030	3,2	0,018	5,8	0,024	6,5	0,025
Page	8,7	0,029	8,4	0,029	7,7	0,028	6,6	0,026
Newton	18,5	0,043	17,4	0,042	7,4	0,027	6,4	0,025
Midilli	8,7	0,030	2,0	0,014	1,4	0,012	1,7	0,013
Logarítmico	10,7	0,033	1,9	0,014	1,5	0,012	1,8	0,013
Henderson e Pabis	15,7	0,040	16,8	0,041	7,1	0,027	5,3	0,023
Exponencial de Dois Termos	9,1	0,030	7,6	0,027	5,7	0,024	6,4	0,025
Dois Termos	9,2	0,030	0,1	0,003	1,6	0,013	1,9	0,014
Aproximação da Difusão	8,9	0,030	0,3	0,005	4,0	0,020	4,3	0,021

Na Tabela 3 estão indicados os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e erro médio relativo (P) para a comparação entre os modelos analisados. Os modelos matemáticos apresentaram elevados coeficientes de determinação, exceto o modelo de Wang e Singh. Os modelos com elevados coeficientes de determinação indicam uma representação satisfatória para o processo de secagem (MADAMBA et al., 1996). Ressalta-se que os modelos que apresentaram os maiores coeficientes de determinação foram Thompson, Page, Midilli, Logarítmico, Exponencial de Dois Termos, Dois Termos e Aproximação da Difusão para todas as temperaturas estudadas.

**Tabela 3.** Coeficientes de determinação ( $R^2$ , %) e erro médio relativo (P, %) para os modelos analisados, durante a secagem dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel) nas diversas condições de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )

Modelo	40 $^{\circ}\text{C}$		60 $^{\circ}\text{C}$		80 $^{\circ}\text{C}$		100 $^{\circ}\text{C}$	
	P	$R^2$	P	$R^2$	P	$R^2$	P	$R^2$
Wang e Sing	20,466	96,53	49,06	90,33	12,29	97,94	8,90	98,15
Verma	14,200	98,56	24,81	98,79	2,90	99,60	2,44	99,60
Thompson	4,090	99,34	9,93	99,78	5,24	99,39	6,43	99,35
Page	6,829	99,35	15,78	99,44	7,27	99,18	7,84	99,33
Newton	14,200	98,56	24,81	98,79	7,89	99,16	7,39	99,31
Midilli	3,918	99,40	6,23	99,88	2,58	99,87	2,25	99,86
Logarítmico	3,737	99,23	7,49	99,88	1,58	99,85	1,53	99,83
Henderson e Pabis	13,170	98,82	23,96	98,88	8,10	99,25	7,43	99,46
Exponencial de Dois Termos	9,308	99,32	17,15	99,50	5,39	99,39	6,35	99,36
Dois Termos	8,054	99,37	0,86	99,99	1,83	99,85	1,54	99,84
Aproximação da Difusão	7,951	99,36	0,79	99,98	2,89	99,60	2,44	99,60

Entre os modelos estudados, apenas os modelos Thompson, Midilli, Logarítmico, Dois Termos e Aproximação da Difusão obtiveram valores de erro médio relativo (P), para todas as temperaturas, inferiores a 10%. Mohapatra e Rao (2005) ressaltam que, para os modelos representarem de forma adequada o fenômeno de secagem, é necessário que o erro médio relativo seja inferior a 10%, assim estes modelos são os mais adequados para representar a secagem dos frutos de baru.

A Tabela 4 apresenta os valores dos parâmetros dos modelos Thompson, Midilli, Logarítmico, Dois Termos e Aproximação da Difusão, ajustados aos dados experimentais da cinética de secagem dos frutos de baru em diferentes temperaturas.

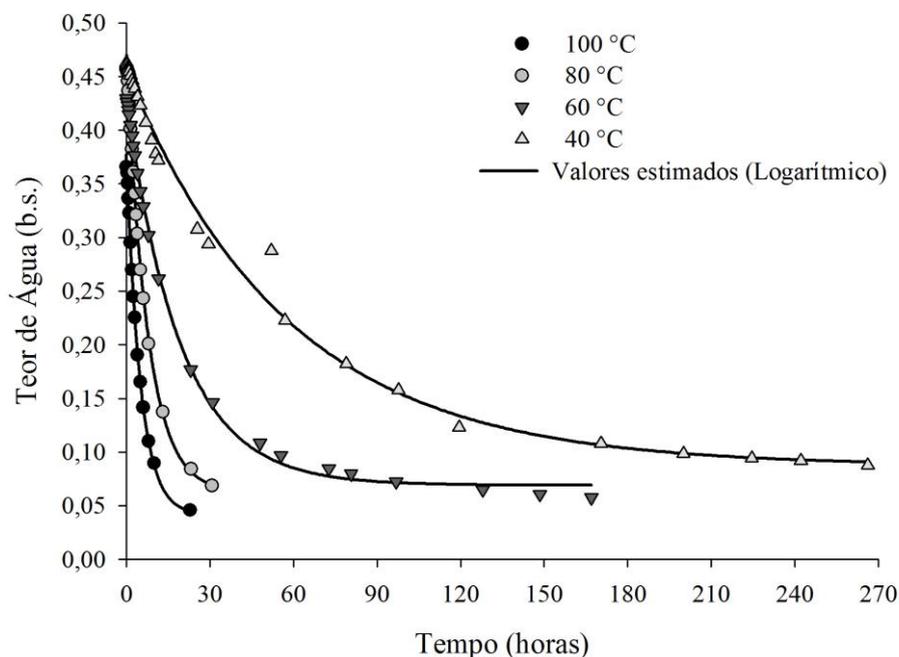
**Tabela 4.** Parâmetros dos modelos Thompson, Midilli, Logarítmico, Dois Termos e Aproximação da Difusão, ajustados para as diferentes condições de secagem dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel), com a respectiva equação em função da temperatura

Parâmetros	Temperatura (°C)			
	40	60	80	100
Thompson				
a	-6,72844**	-4,75078**	-9,08335*	-13,6793 <sup>ns</sup>
b	0,37770**	0,51890**	1,01066**	1,5261*
Midilli				
a	1,007300**	1,024445**	1,020260**	1,022305**
k	0,030846**	0,071452**	0,109998**	0,171084**
n	0,833390**	0,844882**	1,045745**	1,038561**
b	0,000103 <sup>ns</sup>	0,000421**	0,003104**	0,003414**
Logarítmico				
a	0,911724**	0,917230**	0,944254**	0,962794**
k	0,017255**	0,051663**	0,130410**	0,197454**
c	0,070180**	0,082451**	0,086418**	0,070809**
Dois Termos				
a	0,820626**	0,796116**	0,061104 <sup>ns</sup>	0,037974 <sup>ns</sup>
k <sub>0</sub>	0,011334**	0,063355**	-0,011338 <sup>ns</sup>	-0,027937 <sup>ns</sup>
b	0,186481**	0,211949**	0,968744**	0,993755**
k <sub>1</sub>	0,092732*	0,008508**	0,126721**	0,189091**
Aproximação da Difusão				
a	0,188057*	0,805022**	0,987270**	0,99904**
k	0,081676*	0,060455**	0,110474**	0,16608**
b	0,137565**	0,129341**	-0,518596 <sup>ns</sup>	-1,09801 <sup>ns</sup>

\*\*Significativo a 1% pelo teste t. \*Significativo a 5% pelo teste t. <sup>ns</sup>Não significativo pelo teste t.

Os parâmetros do modelo Logarítmico foram todos significativos pelo teste t. Desta forma, o modelo Logarítmico foi selecionado para representar o fenômeno de secagem dos frutos de baru. Ainda na Tabela 4, observa-se que a magnitude da constante de secagem k para o modelo de Logarítmico e o parâmetro “a” aumentou com a elevação da temperatura do ar de secagem. Já o parâmetro “c” não obteve tendência clara com o aumento da temperatura.

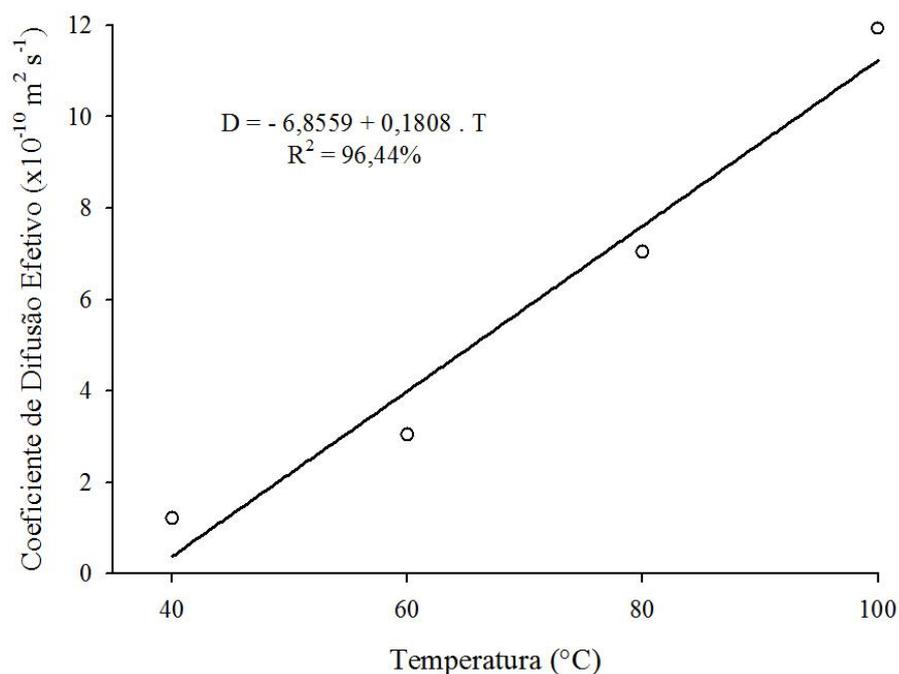
A Figura 2 apresenta as curvas de secagem dos frutos de baru estimadas pelo modelo Logarítmico. Verifica-se ajuste satisfatório do modelo aos valores experimentais obtidos ao longo da secagem dos frutos de baru.



**Figura 2.** Valores dos teores de água experimentais e estimados pelo modelo do Logarítmico para a secagem dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel), nas diversas condições de temperatura.

Chen et al. (2015) estudaram a secagem de *Zizyphus jujuba* Mill. nas temperaturas de 60, 70, 80 e 90 °C e verificaram que os modelos Logarítmico e Dois Termos foram os que melhor se ajustaram aos dados experimentais. Por outro lado, Santos et al. (2010) estudaram frutos de carambola (*Averrhoa carambola* L.) nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C e verificaram que o modelo de Page apresentou o melhor ajuste.

O coeficiente de difusão efetivo dos frutos de baru aumenta linearmente com o incremento da temperatura do ar de secagem, Figura 3, concordando com resultados obtidos por outros pesquisadores para os frutos de carambola (SANTOS et al., 2010), sementes de crambe (COSTA et al., 2011), cenoura (BOTELHO et al., 2011), café (ISQUIERDO et al., 2013), frutos de crambe (COSTA et al., 2015) e grãos de pimenta bode (RODOVALHO et al., 2015).

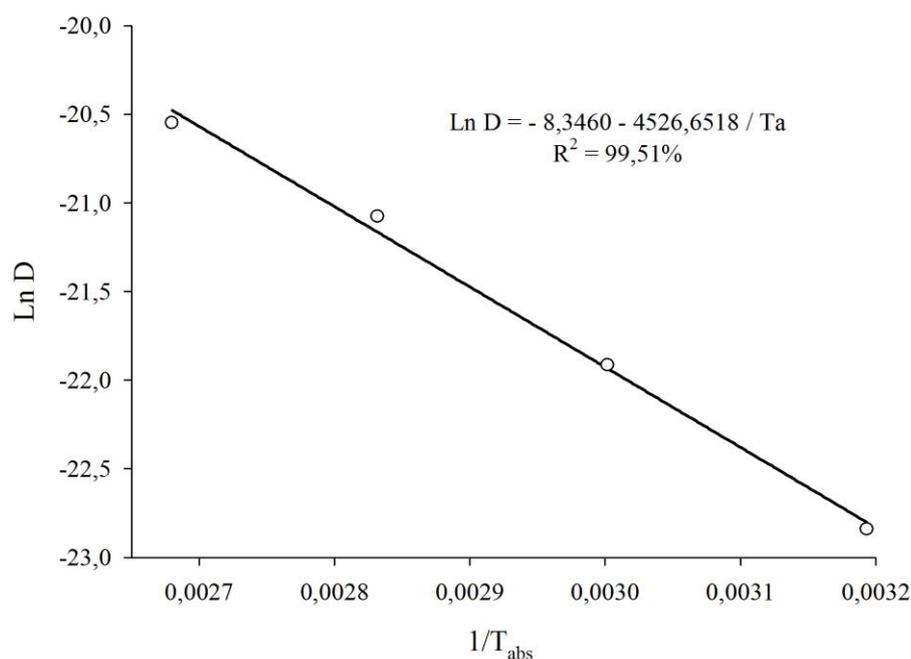


**Figura 3.** Coeficiente de difusão efetivo obtido para a secagem dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel) nas temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C.

A difusividade da água depende da temperatura do ar de secagem, ou seja, quanto maior a temperatura do ar de secagem, menor a resistência dos frutos à remoção de água, aumentando a difusividade.

Os coeficientes de difusão efetivos dos frutos de baru apresentaram magnitudes entre  $1,20 \times 10^{-10}$  a  $11,93 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Valores próximos foram encontrados por Botelho et al. (2011) para fatias de cenoura,  $8,94 \times 10^{-10}$  e  $3,57 \times 10^{-9}$ , para as temperaturas de 50 e 100 °C, e Costa et al. (2015), para frutos de crambe,  $2,84 \times 10^{-11}$  e  $9,14 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , para temperaturas de 35 e 90 °C. Diferentemente de Santos et al. (2010), que, durante a secagem de frutas de carambola, verificaram coeficientes de difusão efetivos com magnitudes entre  $6,18 \times 10^{-8}$  e  $4,57 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  para a faixa de temperatura de 50 a 70 °C.

A dependência do coeficiente de difusão efetivo dos frutos de baru com relação à temperatura do ar de secagem foi representada pela expressão de Arrhenius (Figura 4).



**Figura 4.** Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo em função da temperatura do ar de secagem, obtido durante a secagem dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel).

A energia de ativação para o fenômeno de secagem dos frutos de baru foi de  $37,63 \text{ kJ mol}^{-1}$  para a faixa de temperatura estudada. A energia de ativação para produtos vegetais varia entre  $12,7$  a  $110 \text{ kJ mol}^{-1}$  (ZOGZAS et al., 1996), estando, assim, o valor obtido no presente trabalho dentro desta faixa. Corrêa et al. (2007) ressaltam que a energia de ativação é a facilidade com que as moléculas de água superam a barreira de energia durante a migração no interior do produto.

A Tabela 5 apresenta os valores de entalpia, entropia e energia livre de Gibbs para as diferentes condições de secagem. Com acréscimo da temperatura de secagem, a entalpia e entropia decrescem, enquanto a energia livre de Gibbs aumenta.

**Tabela 5.** Valores de entalpia (H, J mol<sup>-1</sup>), entropia (S, J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>) e energia livre de Gibbs (G, J mol<sup>-1</sup>) para diferentes condições de ar de secagem dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel)

Temperatura (°C)	Propriedades termodinâmicas		
	H	S	G
40	35031,45	-227,67	106327,6
60	34865,17	-228,19	110886,27
80	34698,89	-228,67	115454,9
100	34532,61	-229,13	120033,0
Equação	H=35364,01-8,31T	S=-226,72-0,024T	G=97185,7+228,4T
R <sup>2</sup> (%)	99,99	99,93	99,99

A entalpia está relacionada com a energia necessária para remover a água ligada à matéria seca durante o processo de secagem, desta forma, a entalpia se reduz com o aumento da temperatura de secagem (OLIVEIRA et al., 2010). O menor valor de entalpia em menores temperaturas significa maior quantidade de energia requerida para promover a secagem dos frutos de baru. O comportamento da entalpia para os frutos de baru é semelhante ao obtido por Corrêa et al. (2010) e Rodovalho et al. (2015) para café e grãos de pimenta bode, respectivamente.

A entropia é uma propriedade termodinâmica que pode ser associada ao grau de desordem entre a água e o produto (GONELI et al., 2010). A entropia diminuiu com o aumento da temperatura do ar de secagem, comportamento similar à secagem de outros produtos, como sementes de *Vigna subterranea* (L.) verdc. (JIDEANI & MPOTOKWANA, 2009), espiga de milho (CORRÊA et al., 2011) e frutos de pimenta Cabacinha (SILVA et al., 2016). Corrêa et al. (2010) ressaltam que o aumento da temperatura de secagem aumenta a excitação das moléculas de água do produto e diminui a ordem do sistema água-produto.

A energia livre de Gibbs observada neste estudo foi positiva e aumentou com o incremento da temperatura de secagem. A energia livre de Gibbs está relacionada ao trabalho necessário para tornar os locais de sorção disponíveis, e seu valor positivo indica uma reação endergônica, na qual é necessária a adição de energia ao ar para que ocorra a secagem do produto (NKOLO MEZE'E et al., 2008). Este comportamento também foi relatado por Corrêa et al. (2011) e Rodovalho et al. (2015).

## CONCLUSÕES

O tempo de secagem se reduz com o aumento da temperatura, sendo de 266,3 horas para a temperatura de 40 °C e de 22,8 horas para a temperatura de 100 °C.

Os modelos de Thompson, Midilli, Logarítmico, Dois Termos e Aproximação da Difusão são adequados para representar a secagem dos frutos de baru.

O coeficiente de difusão efetivo aumenta com a elevação da temperatura do ar de secagem, sendo descrito pela equação de Arrhenius, com energia de ativação de 37,64 kJ mol<sup>-1</sup>.

A entalpia e entropia decrescem, enquanto a energia livre de Gibbs aumenta com o incremento da temperatura de secagem.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOTELHO, F. M.; CORRÊA, P. C.; GONELI, 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.

BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de defesa Agropecuária. **Regras para Análise de Sementes**. Brasília, 2009. 395p.

CHEN, Q.; BI, J.; WU, X.; YI, J.; ZHOU, L.; ZHOU, Y. Drying kinetics and quality attributes of jujube (*Zizyphus jujuba* Miller) slices dried by hot-air and short- and medium-wave infrared radiation. **LWT - Food Science and Technology**, v. 64, n. 2, p. 759-766, 2015.

CORREA, G.C.; NAVES, R.V.; ROCHA, M.R.; CHAVES, L.J.; BORGES, J.D. Determinações físicas em frutos e sementes de baru (*Dipteryx alata* Vog.), cajuzinho (*Anacardium othonianum* Rizz.) e pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.), visando melhoramento genético. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 24, n. 4, p. 42-47, 2008.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO A. P.; GONELI, A. L. G.; BOTELHO, F. M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 2, p. 501-510, 2007.

CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; BOTELHO, F. M.; GONELI, A. L. D.; CARVALHO, F. M. Modelagem matemática e determinação das propriedades

termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, v. 57, n. 5, p. 595-601, 2010.

CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; GONELI, A. L. D.; RESENDE, O.; CAMPOS, S. C. Mathematical modeling of the drying process of corn ears. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 4, p. 575-581, 2011.

COSTA, L.M.; RESENDE, O.; SOUSA, K.A.; GONÇALVES, D.N. Coeficiente de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.10, p.1089-1096, 2011.

COSTA, L. M.; RESENDE, O.; GONÇALVES, D. N.; OLIVEIRA, D. E. C. Modelagem matemática da secagem de frutos de crambe em camada delgada. **Bioscience Journal**, v. 31, n. 2, p. 392-403, 2015.

GONELI, A. L. D.; CORREA, P.; OLIVEIRA, G. H. H.; BOTELHO, F. M. Water desorption and thermodynamic properties of okra seeds. **Transaction of the ASAE**, v. 53, n. 1, p. 191-197, 2010.

ISQUIERDO, E. P.; BORÉM, F. M.; ANDRADE, E. T.; CORRÊA, J. L. G.; OLIVEIRA, P. D.; ALVES, G. E. Drying kinetics and quality of natural coffee. **Journal of Food Engineering**, v. 56, n. 3, p. 1003-1010, 2013.

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

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. The thin layer drying characteristic of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v. 29, n. 1, p. 75-97, 1996.

MOHAPATRA, D.; RAO, P.S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v. 66, n. 4, p. 513-518, 2005.

NKOLO MEZE'E, Y.,N.; NOAH NGAMVENG, J.; BARDET, S. Effect of enthalpy-entropy compensation during sorption of water vapour in tropical woods: The case of Bubinga (*Guibourtia Tessmanii* J. L'eonard; *G. Pellegriniana* J.L.). **Thermochimica Acta**, v. 468, n. 3-4, p. 1-5, 2008.

OLIVEIRA, G. H. H.; CORRÊA, P. C.; ARAÚJO, E. F.; VALENTE, D. S. M.; BOTELHO, F. M. Desorption isotherms and thermodynamic properties of sweet corn cultivars (*Zea mays* L.). **International Journal of Food Science and Technology**, v. 45, n. 3, p. 546-554, 2010.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades

de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 10, n. 1, p. 17-26, 2008.

ROBERTS, J. S.; KIDD, D. R.; PADILLA-ZAKOUR, O. Drying kinetics of grape seeds. **Journal of Food Engineering**, v. 89, n. 4, p. 460-465, 2008.

RODOVALHO, R. S.; SILVA, H. W.; SILVA, I. L.; ROSSETTO, C. A. V. Cinética de secagem dos grãos de pimenta bode. **Global Science Technology**, v. 8, n. 2, p. 128-142, 2015.

SANTOS, C. T.; BONOMO, R. F.; CHAVES, M. A.; FONTAN, R. C. I.; BONOMO, P. Cinética e modelagem da secagem de carambola (*Averrhoa carambola* L.) em secador de bandeja. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 32, n. 3, p. 309-313, 2010.

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.

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

SILVA, H. W.; RODOVALHO, R. S.; VELASCO, M. F.; SILVA, C. F.; VALE, L. S. R. Kinetics and thermodynamic properties related to the drying of ‘Cabacinha’ pepper fruits. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 2, p. 174–180, 2016.

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

## CAPÍTULO 4

### **PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS FRUTOS DE BARU (*Dipteryx alata* Vogel)**

**Resumo:** Neste trabalho objetivou-se verificar a influência do teor de água e da temperatura de secagem nos valores da força máxima de compressão para deformações fixas (1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 mm), força de ruptura e o módulo proporcional de deformidade nos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel), submetidos à compressão na posição natural de repouso. Foram utilizados frutos de baru com teores de água variando de 0,333 a 0,053 (decimal b.s.), secos nas temperaturas de 60, 80 e 100 °C e comprimidos uniaxialmente entre duas placas paralelas, na posição natural de repouso. Concluiu-se que a força de compressão e o módulo proporcional de deformidade diminuem com o aumento do teor de água. A redução do teor de água elevou a força necessária à ruptura dos frutos de baru, independentemente da temperatura de secagem.

**Palavras-chave:** Módulo proporcional de deformidade, força de ruptura, teor de água

### **MECHANICAL PROPERTIES OF BARU FRUIT (*Dipteryx alata* Vogel)**

**Abstract:** This paper aimed to verify the influence of moisture content and drying temperature on the values of maximum compression strength for fixed strains (1; 2; 3; 4; 5; 6; and 7 mm), tensile strength, and proportional deformity modulus on the baru fruit (*Dipteryx alata* Vogel), under compression in natural resting position. Baru fruits with moisture content ranging from 0.333 to 0.053 (decimal dry basis-d.b.) were used; they were uniaxially compressed between two parallel plates, in the natural resting position, and the nuts were dried at temperatures of 60; 80; and 100 °C. On the basis of

results, it was concluded that the compression force and the proportional deformity modulus decrease with increasing moisture content. Moreover, the moisture content reduction increased the required force for breaking the baru fruits, regardless of the drying temperature.

**Keywords:** Proportional deformity modulus, breaking force, moisture content

## INTRODUÇÃO

O conhecimento das propriedades mecânicas dos frutos nativos do cerrado em função do teor de água e da temperatura de secagem é essencial para o desenvolvimento de projeto de máquinas que auxiliem no beneficiamento destes frutos.

Neste sentido, inúmeros trabalhos têm sido desenvolvidos com o objetivo de identificar as propriedades mecânicas de diversos produtos agrícolas em diferentes teores de água, entre os quais: frutos de café (COUTO et al., 2002; BATISTA et al., 2003), avelã (GÜNER et al., 2003), soja (RIBEIRO et al., 2007), pistache (GALEDAR et al., 2009), arroz (RESENDE et al., 2013) e trigo (FERNANDES et al., 2014). Entretanto, informações sobre as propriedades mecânicas dos frutos de baru não são encontradas na literatura.

Resende et al. (2007) ressaltam que as informações referentes às características mecânicas dos produtos agrícolas são indispensáveis para que novos equipamentos possam ser desenvolvidos e alcancem a máxima eficiência sem comprometer a qualidade final. Durante as etapas de beneficiamento e armazenamento, os produtos agrícolas sofrem com impactos que podem causar danos e, conseqüentemente, aumentar a susceptibilidade à deterioração (BARGALE et al., 1995).

Diversos fatores como as condições de secagem, o teor de água, o tipo de força aplicada e a região na qual a força é aplicada afetam diretamente as propriedades mecânicas (MOHSENIN, 1986). Ribeiro et al. (2007) indicam que, tendo como referência a curva de “força-deformação”, obtida pelo teste de compressão, podem ser obtidos parâmetros que caracterizam a resposta do material quando submetido a uma carga. Entre as diversas propriedades mecânicas, o módulo de deformidade permite que sejam feitas comparações de resistência relativa entre os diversos materiais (RESENDE et al., 2007).

Pela inexistência de informações sobre as propriedades mecânicas dos frutos de baru e pela necessidade de desenvolver equipamentos que possam ser utilizados com mais eficiência para o seu processamento, objetivou-se com o presente trabalho, verificar a influência do teor de água e da temperatura de secagem na força máxima de compressão para deformações fixas (1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 mm), força de ruptura e no módulo proporcional de deformidade nos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel), submetidos à compressão na posição natural de repouso.

## MATERIAL E MÉTODOS

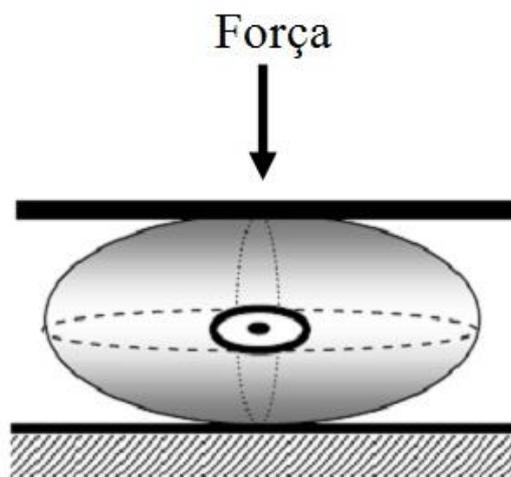
O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Pós-Colheita de Produtos Vegetais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - *Campus* Rio Verde e Laboratório de Secagem e Armazenagem de Produtos Vegetais da Universidade Estadual de Goiás (UEG), em Anápolis-GO. Foram utilizados frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel) coletados manualmente no município de Santa Helena de Goiás, Goiás, a 17°48' S 50°35' O e altitude de 568 m, com o teor de água inicial de 0,333 base seca (base seca, b.s.).

Para condução do experimento, os teores de água foram obtidos por secagem em estufa com ventilação forçada, mantida nas temperaturas de 60, 80 e 100 °C. A redução do teor de água ao longo da secagem foi acompanhada pelo método gravimétrico (perda de massa), conhecendo-se o teor de água inicial do produto, até atingir o teor de água final de 0,053 (b.s.), com auxílio de uma balança semianalítica com resolução de 0,01 g.

Os teores de água dos frutos foram determinados pelo método de estufa, a  $105 \pm 3$  °C, durante 24 horas, em três repetições (BRASIL, 2009). Para cada teor de água obtido, as amostras foram homogeneizadas e encaminhadas para o teste de compressão.

Os ensaios experimentais de compressão dos frutos, testados individualmente, foram realizados com uma máquina de ensaio universal de teste, modelo EMIC GR049, utilizando uma célula de carga de 1000 KN.

Os frutos foram submetidos à compressão uniaxial, entre duas placas paralelas, aplicadas em sua posição natural de repouso, Figura 1, em quinze repetições.



**Figura 1.** Orientação dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel) durante o ensaio de compressão na posição natural de repouso.

Após a obtenção das curvas de força pela deformação dos frutos, foram extraídas a força e a deformação na ruptura, que forneceram o “bioyield point”. Este ponto é definido como a posição na curva em que ocorre aumento da deformação do produto, associado a uma diminuição da força de compressão (ASAE, 1974), indicando o início da ruptura e a desorganização da estrutura dos produtos.

O módulo proporcional de deformidade dos frutos ( $E_p$ ) foi determinado, segundo a Equação 1, sendo obtido para as deformações de  $1 \times 10^{-3}$ ;  $2 \times 10^{-3}$ ;  $3 \times 10^{-3}$ ;  $4 \times 10^{-3}$ ;  $5 \times 10^{-3}$ ;  $6 \times 10^{-3}$  e  $7 \times 10^{-3}$  m, adaptadas das deformações utilizadas por Batista et al. (2003).

$$E_p = \frac{E}{(1-\mu^2)} = \frac{0,531 \times F}{D^{3/2}} \cdot \left[ 2 \cdot \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{R} \right)^{1/3} \right]^{3/2} \quad (1)$$

Em que:

$E_p$ : módulo proporcional de deformidade,  $N \, m^{-2}$ ;

$E$ : módulo de deformidade,  $N \, m^{-2}$ ;

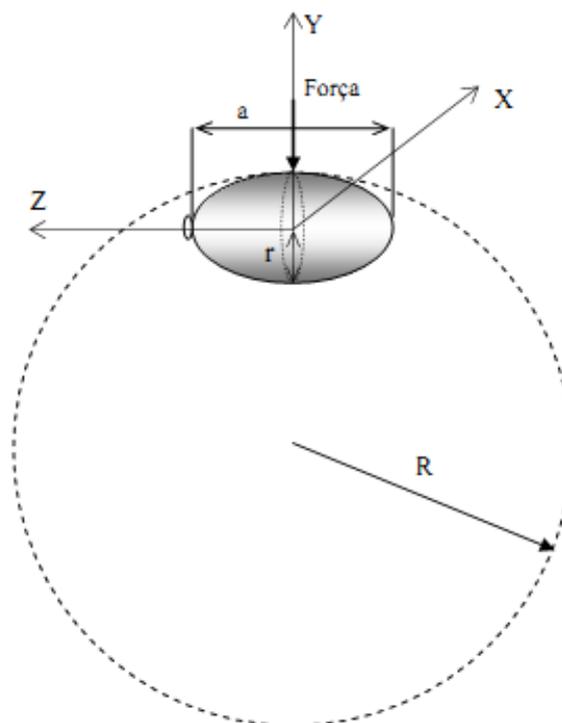
$D$ : deformação total (elástica e plástica) do corpo nos pontos de contato com a placa superior e inferior, m;

$F$ : Força, N;

$\mu$ : razão de Poisson; e

$R$  e  $r$ : raios de curvatura no ponto de contato, m.

Os valores dos raios de curvatura ( $r$  e  $R$ ) dos frutos nos pontos de contato foram obtidos pelo ajuste da circunferência à curvatura do objeto, segundo os planos coordenados relevantes à posição de compressão, segundo Couto et al. (2002), conforme ilustrado na Figura 2.



**Figura 2.** Raio de curvatura dos frutos na região de contato entre o fruto e a placa de compressão.

O experimento foi montado segundo o esquema fatorial  $3 \times 5 \times 7$  (3 temperaturas de secagem, 5 teores de água e 7 deformações), no delineamento inteiramente casualizado, com quinze repetições. Os dados foram analisados por meio de análise de variância e regressão.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

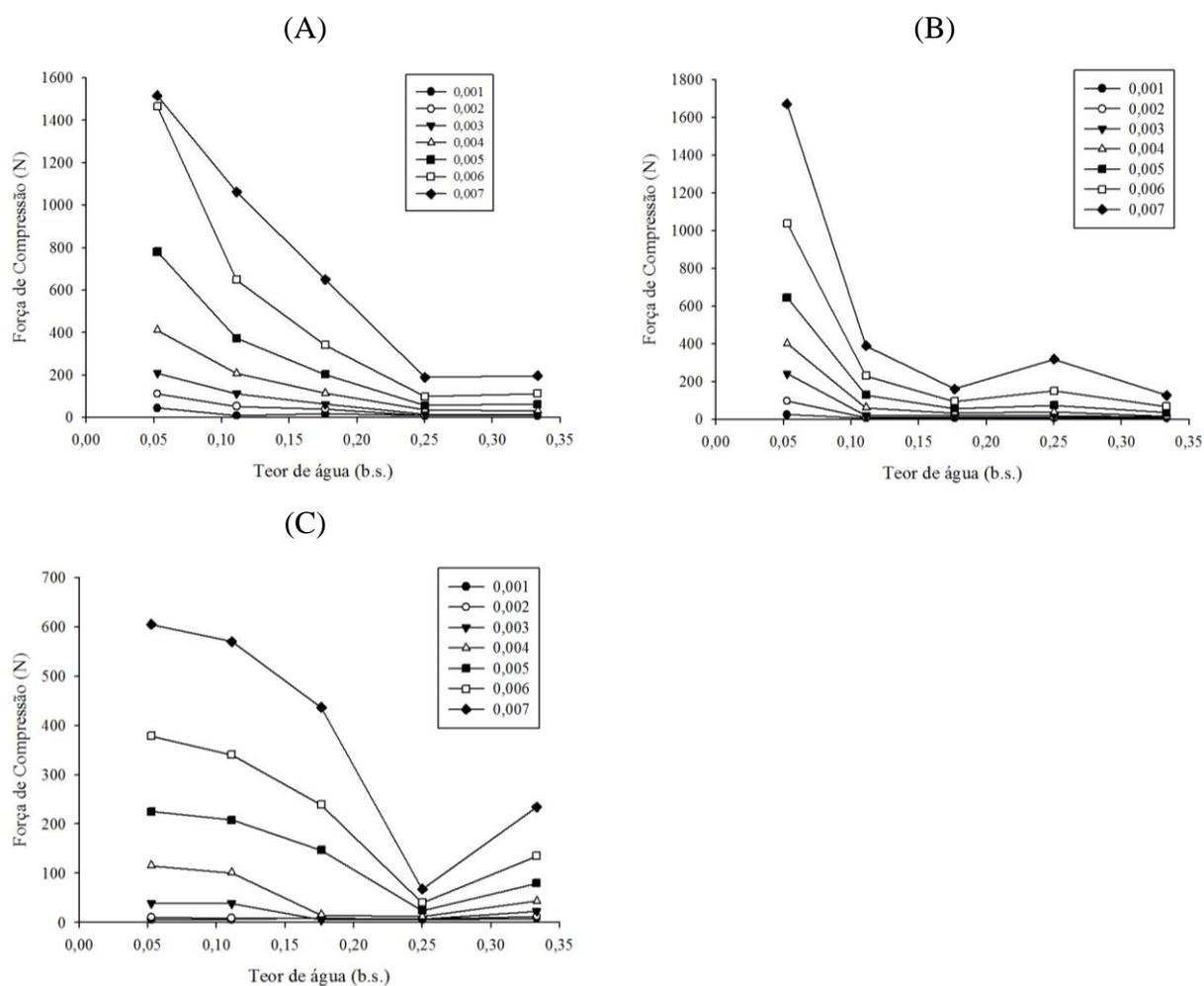
Os valores médios dos raios de curvatura dos frutos de baru para cada temperatura e teor de água, utilizados nos cálculos para determinação do módulo proporcional de deformidade, estão apresentados na Tabela 1. Os raios de curvatura oscilaram em função do teor de água e da temperatura de secagem, não tendo havido tendência clara em função destas variáveis. Este resultado pode ser explicado pelo fato de os frutos de baru não apresentarem uma forma homogênea. Fernandes et al. (2014)

estudaram a influência do teor de água nas propriedades mecânicas dos grãos de trigo e verificaram comportamento similar.

**Tabela 1.** Valores médios dos raios de curvatura dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel) ( $\times 10^{-3}$  m) para cada posição e teor de água

Teor de Água (b.s.)	Temperatura					
	100 °C		80 °C		60 °C	
	R	r	R	r	R	r
0,333	41,231	24,539	43,234	23,859	43,472	25,418
0,250	42,420	25,682	46,043	26,702	42,534	24,955
0,177	42,683	24,809	41,625	25,535	43,255	24,630
0,111	45,619	25,4583	41,599	24,559	43,357	26,052
0,053	42,147	26,632	43,154	24,150	43,243	24,398

Na Figura 3 são apresentados os valores médios da força máxima de compressão nas três temperaturas de secagem, em função dos teores de água, para as diversas deformações. A força de compressão necessária para deformar os frutos de baru diminuiu com o aumento do teor de água, para todas as temperaturas. Resultados semelhantes foram observados por Resende et al. (2007) e Ribeiro et al. (2007) para grãos de feijão e soja, respectivamente.



**Figura 3.** Valores médios da força máxima de compressão para as temperaturas de secagem de 60 (A), 80 (B) e 100 (C) °C, em função do teor de água para as deformações de  $1 \times 10^{-3}$ ;  $2 \times 10^{-3}$ ;  $3 \times 10^{-3}$ ;  $4 \times 10^{-3}$ ;  $5 \times 10^{-3}$ ;  $6 \times 10^{-3}$  e  $7 \times 10^{-3}$  m.

A força de compressão média necessária para as diversas deformações em função do teor de água variou de 8,09 a 1516,37 N, de 7,19 a 1672,25 N e de 5,06 a 605,33 N, para as temperaturas de 60, 80 e 100 °C, respectivamente (Figuras 3 A, B e C). Com a redução do teor de água, aumentou-se a força necessária para deformar os frutos de baru. Este comportamento foi observado para todas as temperaturas estudadas. O aumento da resistência à compressão com a redução do teor de água pode estar relacionado com a integridade da matriz celular pela redução do teor de água (GUPTA & DAS, 2000) e por outra característica que pode influenciar no aumento da resistência à compressão e à contração volumétrica dos frutos.

Vursavus e Özgüven (2004) e Ribeiro et al. (2007) estudaram as propriedades mecânicas dos frutos de damasco e soja, respectivamente, e observaram comportamento

similar. Já Resende et al. (2013), em estudo das propriedades mecânicas dos grãos de arroz com e sem casca, verificaram comportamento diferente, em que os valores de força de compressão variaram de forma aleatória, independentemente do tipo de processamento.

Pelos dados de força de compressão, foi possível determinar os módulos proporcionais de deformidade, Figura 4, os quais apresentaram o mesmo comportamento da força de compressão, em função do teor de água e da deformação.

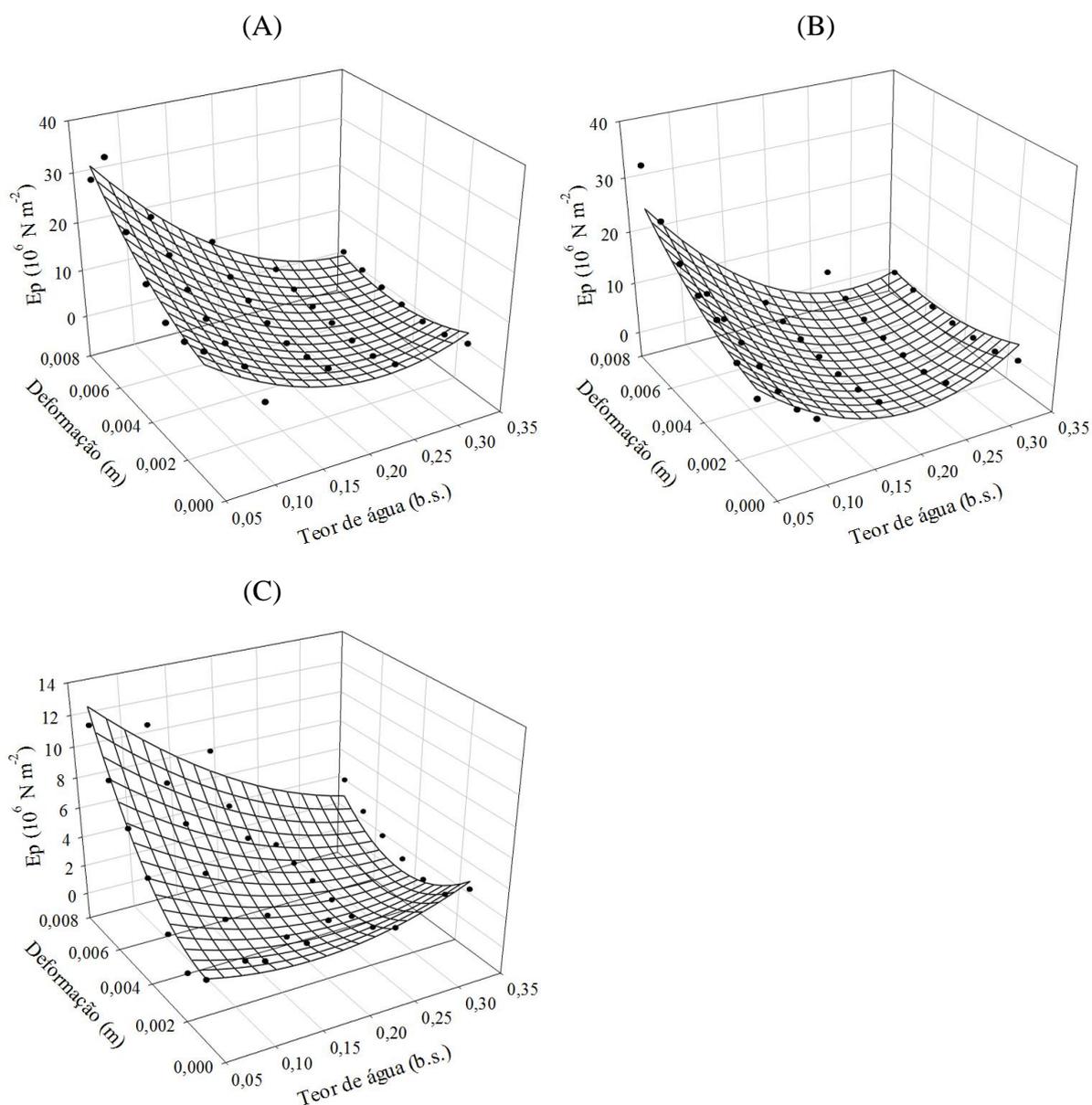
Na Tabela 2 estão apresentadas as equações de regressão ajustadas aos valores experimentais do módulo proporcional de deformidade dos frutos de baru, em função do teor de água e da deformação, para cada temperatura de secagem. Pela análise dos resultados, observa-se que as equações ajustadas se mostraram satisfatórias, apresentando altos valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

**Tabela 2.** Equações ajustadas aos valores experimentais do módulo proporcional de deformidade dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel) ( $E_p$ ) em função do teor de água ( $X$ ) e da deformação ( $D$ ), para as temperaturas de secagem

Temperatura (°C)	Modelo	$R^2$ (%)
60	$E_p = 20,9643 - 167,1678.X + 1255,9089.D + 384,8782.X^2 + 338189,5976.D^2 - 12959,6428.X.D$	93,47*
80	$E_p = 20,5188 - 200,2462.X + 922,2225.D + 490,4072.X^2 + 263175,0655.D^2 - 10540,6016.X.D$	82,13*
100	$E_p = 3,1422 - 17,3821.X - 29,4599.D + 74,6832.X^2 + 274936,9633.D^2 - 6520,3826.X.D$	84,90*

\* Significativo a 5% pelo teste F.

Na Figura 4 estão ilustradas as superfícies de resposta ajustadas, de acordo com as equações obtidas, Tabela 2, para o módulo proporcional de deformidade dos frutos de baru, em função do teor de água e da deformação, para cada temperatura de secagem. Nota-se que, independentemente da temperatura de secagem, os valores do módulo proporcional de deformidade aumentam com a redução do teor de água.



**Figura 4.** Valores médios do módulo proporcional de deformidade ( $E_p$ ) dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel), em função do teor de água e da deformação para as temperaturas de secagem de 60 (A), 80 (B) e 100 (C) °C.

Resende et al. (2007) e Ribeiro et al. (2007), avaliando o módulo proporcional de deformidade nos grãos de feijão e soja, respectivamente, verificaram que o módulo proporcional de deformidade aumenta com a redução do teor de água e da deformação. Batista et al. (2003) ressaltam que o valor do módulo de deformidade maior para os teores de água mais baixos indica ser necessário aplicar uma força maior para obter uma determinada deformação.

Para os teores de água analisados, os valores do módulo proporcional de deformidade variaram de  $0,96 \times 10^6$  a  $31,14 \times 10^6$ , de  $0,84 \times 10^6$  a  $34,46 \times 10^6$  e de  $0,5 \times 10^6$  a  $12,15 \times 10^6$  N m<sup>-2</sup> para as temperaturas de 60, 80 e 100 °C, respectivamente. Batista et al. (2003) estudaram o módulo proporcional dos frutos de café (*Coffea arabica* L.) em três estádios de maturação e três temperaturas (40, 50 e 60 °C) para a faixa de teor de água de 1,50 a 0,14 (b.s.) e verificaram que o módulo proporcional de deformidade de frutos de café apresentou valores entre  $2,0 \times 10^7$  e  $18,0 \times 10^7$  N m<sup>-2</sup> para os frutos de café cereja, entre  $5,0 \times 10^7$  e  $40,0 \times 10^7$  N m<sup>-2</sup> para os frutos verdes e entre  $1,0 \times 10^7$  e  $50 \times 10^7$  N m<sup>-2</sup> para os frutos verdoengos. Já Resende et al. (2013) verificaram que o módulo proporcional de deformidade dos grãos de arroz com e sem casca para a faixa de teor de água de 0,30 a 0,12 (b.s.) e obtiveram valores entre  $5,5 \times 10^9$  e  $7,4 \times 10^9$  N m<sup>-2</sup> para os grãos de arroz sem casca e entre  $9,5 \times 10^9$  e  $12,3 \times 10^9$  N m<sup>-2</sup> para os grãos de arroz com casca.

Ainda, na Figura 4, nota-se que o módulo proporcional de deformidade diminui com a redução da deformação do produto. Resultados diferentes foram observados por Resende et al. (2007) e Fernandes et al. (2014) para grãos de feijão e trigo, respectivamente.

Na Tabela 3 estão apresentados os parâmetros dos modelos lineares que podem ser utilizadas para determinar a força de ruptura em função do teor de água para os frutos de baru para todas as condições de secagem estudadas.

**Tabela 3.** Parâmetros do modelo do linear ajustado para a força de ruptura dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel) nas diferentes condições de secagem

Parâmetros	Temperaturas (°C)		
	60	80	100
a	9006,8778**	8028,1154**	9455,8561**
b	10186,6531*	10911,6666**	10192,6240**
R <sup>2</sup> (%)	91,79	97,39	94,72

\*\*Significativo a 1% pelo teste t. \*Significativo a 5% pelo teste t.

A equação linear representa adequadamente os dados experimentais e pode ser utilizada para estimar a força de ruptura para os frutos de baru, pois apresenta elevados coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>). Resende et al. (2013) estudaram a força de ruptura dos grãos de arroz com e sem casca durante o processo de secagem e verificaram que a

equação linear também pode ser utilizada para representar a força de ruptura. Bargale et al. (1995) verificaram que a força de ruptura decresce linearmente com o aumento do teor de água dos grãos de trigo e canola.

Desta forma, procedeu-se ao teste de identidade de modelos objetivando viabilizar o uso de um único modelo linear para a representação da força de ruptura dos frutos de baru, independentemente da temperatura de secagem, segundo metodologia descrita por Regazzi (2003).

Os parâmetros do modelo de linear para a força de ruptura nas temperaturas de 60 ( $a_1$  e  $b_1$ ), 80 ( $a_2$  e  $b_2$ ) e 100 °C ( $a_3$  e  $b_3$ ) foram comparados entre si para verificar a sua igualdade. As seguintes hipóteses foram formuladas:

$H_0^{(1)} : a_1 = a_2 = a_3 = a$  versus  $H_a^{(1)}$ : nem todos  $a_i$  são iguais

$H_0^{(2)} : b_1 = b_2 = b_3 = b$  versus  $H_a^{(2)}$ : nem todos  $b_i$  são iguais

$H_0^{(3)} : a_1 = a_2 = a_3 = a$  e  $b_1 = b$  versus  $H_a^{(3)}$ : existe pelo menos uma desigualdade

A regra de decisão baseou-se no teste de *Qui*-quadrado ( $\chi^2$ ), de acordo com a seguinte expressão:

$$\chi^2_{\text{calculado}} = -N \ln \left( \frac{SQR_{\Omega}}{SQR_{W_i}} \right) \quad (2)$$

Em que:

$N$  : número de observações;

$SQR_{\Omega}$  : soma dos quadrados residuais do modelo completo; e

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

O valor tabelado de ( $\chi^2$ ) é função do nível de significância  $\alpha$  ( $p=5\%$ ) e do número de graus de liberdade:

$$\nu = p_{\Omega} - p_{W_i} \quad (3)$$

Em que:

$\nu$  : graus de liberdade do modelo;

$p_{\Omega}$  : número de parâmetros do modelo completo; e

$p_{W_i}$  : número de parâmetros do modelo com restrição.

Inicialmente, foram testadas as três condições de ar que apresentavam as temperaturas de 60, 80 e 100 °C. Em seguida, as condições de ar foram comparadas em pares. A Tabela 4 apresenta os resultados das hipóteses analisadas pelo teste de *Qui*-quadrado.

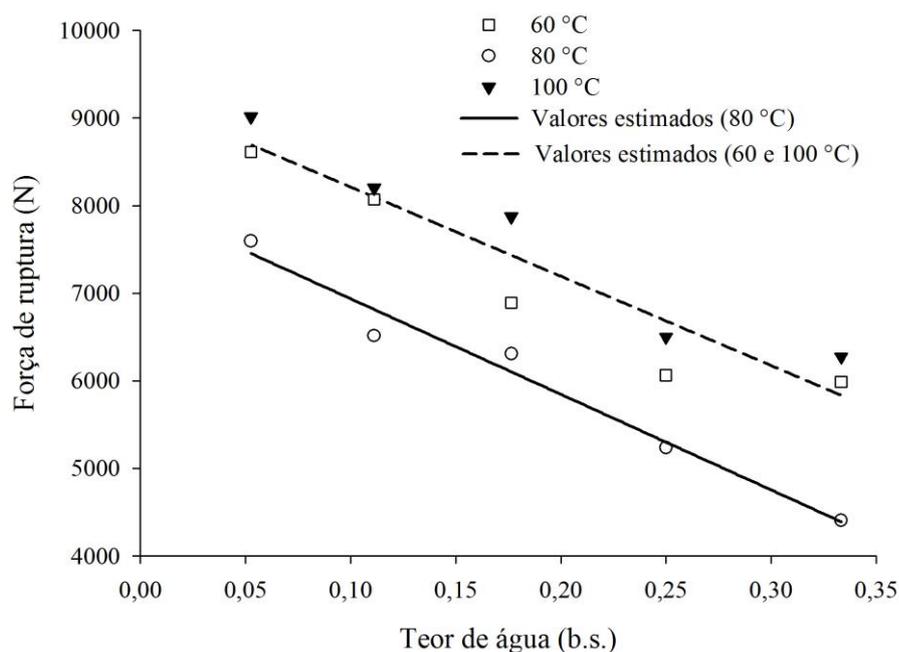
**Tabela 4.** Teste das hipóteses ( $H_0$ ) utilizando o teste de *Qui*-quadrado para a força de ruptura dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel)

Hipóteses	GL	$\chi^2_{\text{tabelado}}$	$\chi^2_{\text{calculado}}$
60 e 80 °C	2	5,991	18,010
60 e 100 °C	2	5,991	5,157
80 e 100 °C	2	5,991	26,933
60, 80 e 100 °C	4	9,488	31,545

Apenas a valor de  $\chi^2_{\text{calculado}}$  da força de ruptura dos frutos de baru para as temperaturas de 60 e 100 °C foi menor que o valor de  $\chi^2_{\text{tabelado}}$ . Assim, aceitou-se a hipótese formulada ( $H_0$ ), ou seja, os modelos lineares analisados para determinação da força de ruptura das temperaturas de 60 e 100 °C não diferem estatisticamente entre si, podendo ser utilizado um único modelo para as duas temperaturas estudadas.

Nas demais combinações, o valor de  $\chi^2_{\text{calculado}}$  foi maior que os valores  $\chi^2_{\text{tabelado}}$ . Assim, rejeita-se a hipótese formulada, logo, a força de ruptura dos frutos de baru ocorre diferentemente para cada temperatura utilizada.

As forças médias de ruptura dos frutos de baru em função do teor de água e da temperatura de secagem estão ilustradas na Figura 5.



**Figura 5.** Valores médios da força de ruptura em função do teor de água, para os frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel) para as temperaturas de secagem.

A redução do teor de água para todas as temperaturas resultou em aumento linear na força necessária para atingir o “bioyield point” de 5.988,63 a 8609,82 N, de 4.406,50 a 7.594,96 e de 6.274,28 a 9.014,51 N para as temperaturas de 60, 80 e 100 °C, respectivamente. Os resultados confirmam outros obtidos por pesquisadores que trabalharam com diferentes produtos agrícolas (GÜNER et al., 2003; VURSAVUS & ÖZGÜVEN, 2004; VURSAVUS & ÖZGÜVEN, 2005; SAIEDIRAD et al., 2008; SHARMA et al., 2009; RESENDE et al., 2013). Este comportamento pode estar relacionado com o adensamento celular que ocorre com a saída de água durante o processo de secagem dos frutos de baru, ou seja, as células dos frutos se aproximam e, conseqüentemente, o fruto terá maior resistência à compressão em teores de água mais baixos. Goneli (2008) indica que a redução do teor de água promove mudança na integridade celular, assim, tendem a se tornar mais organizadas, conseqüentemente, mais resistentes à compressão.

Ainda na Figura 5, nota-se que a temperatura de secagem também influenciou a força de ruptura, entretanto, não houve tendência clara quando comparamos entre temperaturas de secagem, sendo que a temperatura de 80 °C obteve os menores valores e a temperatura de 100 °C, os maiores valores para todos os teores de água estudados. Liu et al. (1990) estudaram as propriedades mecânicas dos grãos de soja e verificaram

que a temperatura do ar de secagem e o teor de água influenciaram o comportamento mecânico do produto, sendo que com a redução da temperatura do ar de secagem ocorre aumento das forças para a ruptura dos frutos, enquanto a elevação do teor de água do produto reduziu essas forças.

Na Tabela 5 estão apresentadas as equações utilizadas para estimar os valores da força de ruptura (Fr) dos frutos de baru para as temperaturas de 60-100 e 80 °C, em função da redução do teor de água. Verifica-se que todos os parâmetros foram significativos a 1% pelo teste de t e apresentaram elevados coeficientes de determinação ( $R^2$ ).

**Tabela 5.** Equações ajustadas aos valores experimentais de força de ruptura dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel) (Fr) em função do teor de água (Ta), para as temperaturas de secagem

Temperatura (°C)	Modelo	$R^2$ (%)
60 e 100	$Fr = 9231,3621^{**} - 10189,6179^{**} Ta$	89,15
80	$Fr = 8028,1154^{**} - 10911,6666^{**} Ta$	97,39

\*Significativo a 1% pelo teste t.

Com os resultados obtidos para o módulo proporcional de deformidade e para a força de ruptura, pode-se inferir que os frutos de baru com menores teores de água têm maiores resistências à quebra durante as etapas de beneficiamento.

## CONCLUSÕES

A força de compressão necessária para deformar os frutos de baru diminui com o aumento do teor de água, independentemente da temperatura de secagem.

O módulo proporcional de deformidade aumenta com a redução do teor de água para todas as temperaturas estudadas.

A redução do teor de água eleva a força necessária à ruptura dos frutos de baru, independentemente da temperatura de secagem.

As forças de ruptura para as temperaturas de secagem de 60 e 100 °C podem ser representadas por um único modelo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASAE, AGRICULTURAL ENGINEERS YEARBOOK OF STANDARDS. **American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, MI, 1974.
- BARGALE, C. P.; IRUDAYARAJ, J.; MARQUIS, B. Studies on rheological behavior of canola and wheat. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 61, n. 2, 267-274, 1995.
- BATISTA, C.S.; COUTO, S.M.; CECON, P.R.; PEIXOTO, A.B. Efeito da temperatura do ar de secagem, do teor de umidade e do estágio de maturação no módulo de deformidade de frutos de café (*Coffea arabica* L.). **Revista Brasileira de Armazenamento**, Especial café, n. 6, p. 42-53, 2003.
- BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. **Regras para Análise de Sementes**. Brasília, 2009. 395p.
- COUTO, S.M.; BATISTA, C.S.; PEIXOTO, A.B.; DEVILLA, I. A. Comportamento mecânico de frutos de café: módulo de deformidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 285-294, 2002.
- FERNANDES, L. S.; CORRÊA, P. C.; DINIZ, M. D. M. S.; LEITE, D. M.; VASCONCELLOS, D. S. L. Influência do teor de água nas propriedades mecânicas dos grãos de trigo submetidos à compressão. **Bioscience Journal**, v. 30, suplemento 1, p. 219-223, 2014.
- GALEDAR, M. N.; MOHTASEBI, S. S.; TABATABAEEFAR, A.; JAFARI, A.; FADAEI, H. Mechanical behavior of pistachio nut and its kernel under compression loading. **Journal of Food Engineering**, v. 95, n. 3, p. 499-504, 2009.
- GONELI, A.L.D. **Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade da mamona (*Ricinus communis* L.) durante a secagem e o armazenamento**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2008. 186p. Tese Doutorado.
- GÜNER, M.; DURSUN, E.; DURSUN, I. G. Mechanical behaviour of hazelnut under compression loading. **Biosystems Engineering**, v. 85, n. 4, p. 485-491, 2003.
- GUPTA, R. K.; DAS, S. K. Fracture resistance of sunflower seed and kernel to compressive loading. **Journal of Food Engineering**, v. 46, n. 2, p. 1-8, 2000.
- MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841p.

- LIU, M.; HAGHIGHI, K.; STROSHINE, R. L.; TING, E. C. Mechanical properties of soybean cotyledon and failure strength of soybean kernel. **Transactions of the ASAE**, v. 33, n. 2, p. 559-65, 1990.
- REGAZZI, A. J. Teste para verificar a igualdade de parâmetros e a identidade de modelos de regressão não linear. **Revista Ceres**, v. 50, n. 287, p. 9-26, 2003.
- RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; RIBEIRO, D. M.; FIGUEIREDO NETO, A. Comportamento mecânico dos grãos de feijão submetidos a compressão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 4, p. 404-409, 2007.
- RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; GONELI, A. L. D.; JARÉN, C. Mechanical properties of rough and dehulled rice during drying. **International Journal of Food Studies**, v. 2, n. 2, p. 158-166, 2013.
- RIBEIRO, D. M.; CORRÊA, P. C.; FURTADO, B. F.; GONELI, A. L. D.; RESENDE, O. Propriedades mecânicas dos grãos de soja em função do teor de água. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 2, p. 493-500, 2007.
- SAIEDIRAD, M. H.; TABATABAEEFAR, A.; BORGHEI, A.; MIRSALEHI, M.; BADII, F.; VARNAMKHAJASTI, M. G. Effects of moisture content, seed size, loading rate and seed orientation on force and energy required for fracturing cumin seed (*Cuminum cyminum* Linn.) under quasi-static loading. **Journal of Food Engineering**, v. 86, n. 4, p. 565-572, 2008.
- SHARMA, R.; SOGI, D. S.; SAXENA, D. C. Dehulling performance and textural characteristics of unshelled and shelled sunflower (*Helianthus annuus* L.) seeds. **Journal of Food Engineering**, v. 92, n. 1, p. 1-7, 2009.
- VURSAVUŞ, K.; ÖZGÜVEN, F. Mechanical behaviour of apricot pit under compression loading. **Journal of Food Engineering**, v. 65, n. 2, p. 255-261, 2004.
- VURSAVUŞ, K.; ÖZGÜVEN, F. Fracture resistance of pine nut to compressive loading. **Biosystems Engineering**, v. 90, n. 2, p. 185-191, 2005.

## CAPÍTULO 5

### EFEITOS DA SECAGEM NA COLORAÇÃO DOS FRUTOS DE BARU (*Dipteryx alata* Vogel)

**Resumo:** Objetivou-se com este trabalho verificar a influência do teor de água e da temperatura de secagem na coloração dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel). O teor de água inicial foi de 0,333 base seca (b.s.) e os demais teores de água (0,25; 0,177; 0,111 e 0,053 b.s.) foram obtidos por secagem em estufa com ventilação forçada, mantida nas temperaturas de 60, 80 e 100 °C. Com base nos dos resultados obtidos, concluiu-se que a coordenada “L” e a diferença total de cor ( $\Delta E$ ) aumentaram com a redução do teor de água, enquanto os valores do croma (Cr), ângulo hue (°h) e as coordenadas “a” e “b” se reduziram, provocando alteração na coloração dos frutos de baru, independentemente da temperatura de secagem.

**Palavras-chave:** Teor de água, luminosidade, ângulo hue, croma

### DRYING EFFECTS ON THE BARU FRUIT COLOR (*Dipteryx alata* Vogel)

**Abstract:** This paper aimed to verify the influence of moisture content and drying temperature on the baru fruit color (*Dipteryx alata* Vogel). The initial moisture content of 0.333 dry basis (d.b.) and the remaining moisture content (0.25; 0.177; 0.111 e 0.053 d.b.) was obtained by drying in oven with forced ventilation, maintained at temperatures of 60; 80; and 100 °C. On the basis of results, it was concluded that the "L" coordinate and the total color difference ( $\Delta E$ ) increased by reducing the moisture content, while chroma (Cr) and hue angle (h °) values, and "a" and " b" coordinates were reduced, causing a change in color of baru fruit, regardless of drying temperature.

**Keywords:** Moisture content, brightness, hue angle, chroma

## INTRODUÇÃO

*Dipteryx alata* Vogel é uma árvore de ocorrência no cerrado, conhecida como cumbaru, cumaru, baru, barujo, feijão coco ou emburena-brava (LORENZI, 2008), cuja amêndoa é beneficiada e comercializada “in natura”, torrada ou sob a forma de farinha, gerando renda para diversas comunidades regionais que vivem em áreas de cerrado (SILVA & EGITO, 2005). A amêndoa do baru contém elevado nível de lipídios (cerca de 40%) e de proteínas (aproximadamente 30%) (FERNANDES et al., 2010). Outros estudos apontam a presença de outros minerais na amêndoa como zinco, cálcio, ferro e potássio (FREITAS & NAVES, 2010).

Apesar da importância econômica do baru, dados sobre a pós-colheita dos frutos são escassos. As técnicas aplicadas na pós-colheita não melhoram a qualidade final dos frutos, mas diminuem os processos fisiológicos que degradam suas qualidades físicas e sensoriais, garantindo sua conservação por maior período e, conseqüentemente, prolongando o tempo de sua comercialização.

A secagem dos produtos agrícolas é a técnica mais empregada na pós-colheita, pois assegura sua qualidade e estabilidade, considerando que a diminuição da quantidade de água do material reduz a atividade biológica e as alterações químicas e físicas que ocorrem durante o armazenamento (RESENDE et al., 2008).

A utilização do processo de secagem proporciona diversas vantagens como proteção contra a degradação enzimática e oxidativa, redução da massa, dispensa refrigeração durante o armazenamento e transporte, disponibilidade do produto durante qualquer época do ano e agregação de valor ao produto, também facilita a manutenção dos componentes aromáticos em temperatura ambiente por longo período (DOYMAZ, 2004).

Estudos com café indicam que a secagem em temperaturas inadequadas pode provocar desorganização e, conseqüentemente, desestruturação das membranas celulares, fazendo com que os componentes químicos, antes compartimentalizados, entrem em contato com enzimas hidrolíticas e oxidativas, afetando as características de cor, sabor e aroma da bebida (MARQUES et al., 2008). Isquierdo et al. (2011) ressaltam que alterações na cor indicam ocorrência de processos oxidativos e de transformações

bioquímicas de natureza enzimática, influenciando, portanto, negativamente a qualidade final do produto.

A alteração na coloração de grãos e frutos está frequentemente associada às características de qualidade desejada ou não pelos processadores e consumidores. Desta forma, a alteração na coloração de produtos agrícolas é um atributo de qualidade de fácil identificação (FARONI et al., 2006).

A cor é um atributo relevante para qualquer alimento por ser o fator inicial na escolha do produto pelo consumidor. Ao se aplicar um processo tecnológico sobre um alimento, deve-se ter o cuidado de conferir uma aparência desejável ao produto final. No caso da secagem, deve-se utilizar uma combinação tempo/temperatura que seja eficaz na remoção da água, para aumentar a conservação do alimento, mas que não escureça demais o produto (REIS et al., 2006).

Em função do exposto, objetivou-se com o presente trabalho verificar a influência do teor de água e da temperatura de secagem na cor dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel).

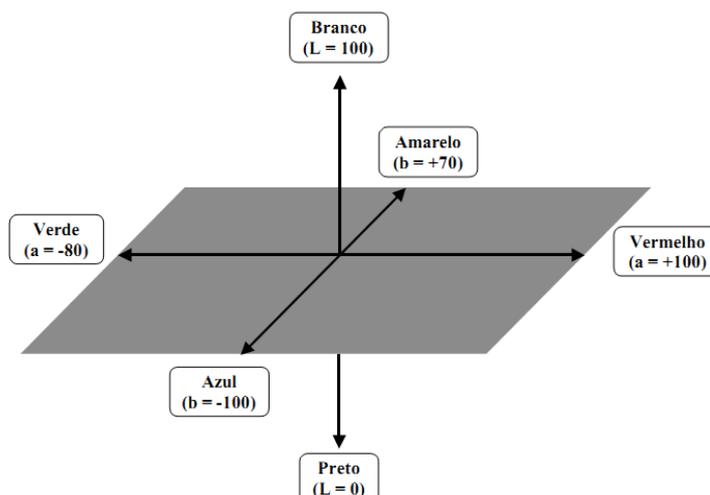
## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Pós-Colheita de Produtos Vegetais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - *Campus* Rio Verde. Foram utilizados frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel) coletados manualmente no município de Santa Helena de Goiás, Goiás, a 17°48' S 50°35' O e altitude de 568 m, com o teor de água inicial de 0,333 base seca (base seca, b.s.).

Para condução do experimento, os teores de água foram obtidos pela secagem feita em estufa com ventilação forçada, mantida nas temperaturas de 60, 80 e 100 °C. A redução do teor de água ao longo da secagem foi acompanhada pelo método gravimétrico (perda de massa), conhecendo-se o teor de água inicial do produto, até atingir o teor de água final de 0,053 base seca (b.s.), com auxílio de uma balança semianalítica com resolução de 0,01 g.

Os teores de água dos frutos foram determinados pelo método de estufa, a 105±3 °C, durante 24 horas, em três repetições (BRASIL, 2009). Para cada teor de água, foram feitas análises em 15 frutos, tendo sido avaliados cinco teores de água (0,333; 0,25; 0,177; 0,111 e 0,053 b.s.) e três temperaturas de secagem (60, 80 e 100 °C).

A avaliação da cor dos frutos de baru foi feita pela leitura direta de refletância das coordenadas “L”, “a” e “b”, empregando o calorímetro ColorFlex EZ com o sistema Hunter de cor, sendo “L” relativo ao branco e negro; “a”, ao vermelho e verde; e “b”, ao amarelo e azul, Figura 1, conforme Afonso Júnior & Corrêa (2003).



**Figura 1.** Representação esquemática do sistema de coordenadas de Hunter para avaliação de cor.

Para fazer uma melhor caracterização, os frutos foram avaliados em dois pontos diferentes na posição de repouso, tendo sido, posteriormente, calculada a média para cada fruto. Assim, as coordenadas “L”, “a” e “b” foram determinadas e calculados os valores de croma (Cr), ângulo de cor hue ( $^{\circ}h$ ) e a diferença total de cor ( $\Delta E$ ) conforme as equações 1, 2 e 3, respectivamente.

$$Cr = \left[ (a^2 + b^2)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (1)$$

$$^{\circ}h = \left[ \arctang\left(\frac{b}{a}\right) \right] \quad (2)$$

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad (3)$$

Em que:

Cr: Croma;

$^{\circ}h$ : ângulo hue;

$\Delta E$ : diferença total de cor; e

L, a e b: coordenadas determinadas pelo calorímetro.

O experimento foi montado segundo o esquema fatorial 3 x 5 (3 temperaturas de secagem e 5 teores de água), em delineamento inteiramente casualizado, com quinze repetições. Os dados foram analisados por meio de análise de variância, regressão e teste de médias Tukey a 5% de significância, utilizando software estatístico SISVAR<sup>®</sup> (FERREIRA, 2011).

O erro médio relativo (P) foi calculado conforme a seguinte expressão:

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (4)$$

Em que:

P: erro médio relativo, %;

Y: valor observado experimentalmente;

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

n: número de observações experimentais.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta as análises estatísticas do croma, ângulo hue, diferença total de cor e das coordenadas “L”, “a” e “b”, submetidas à secagem nas temperaturas de 60, 80 e 100 °C. A interação entre os dois fatores, teor de água e temperatura, foi significativa para três variáveis estudadas (“L”, “b” e Cr). Já para a coordenada “a”, houve efeito isolado do teor de água, e para o ângulo hue (°h) e para a diferença total de cor ( $\Delta E$ ), houve efeito isolado da temperatura e do teor de água.

**Tabela 1.** Resumo da análise de variância para as coordenadas “L”, “a”, “b”, croma (Cr), ângulo hue (°h) e diferença total de cor ( $\Delta E$ ) dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel) submetidos a diferentes temperaturas de secagem

FV	GL	Quadrados médios					
		L	a	b	Cr	°h	$\Delta E$
T	2	122,54 <sup>**</sup>	2,96 <sup>ns</sup>	85,59 <sup>**</sup>	77,20 <sup>**</sup>	55,36 <sup>*</sup>	91,79 <sup>**</sup>
TA	4	394,56 <sup>**</sup>	17,40 <sup>**</sup>	178,68 <sup>**</sup>	182,54 <sup>**</sup>	54,50 <sup>**</sup>	668,56 <sup>**</sup>
T x TA	8	18,65 <sup>*</sup>	0,37 <sup>ns</sup>	20,25 <sup>**</sup>	16,06 <sup>**</sup>	27,01 <sup>ns</sup>	25,26 <sup>ns</sup>
Erro	210	8,12	2,17	6,86	5,87	14,77	15,62
CV (%)		7,08	11,13	10,64	8,65	6,25	62,41

<sup>\*\*</sup>Significativo a 1% pelo teste de F. <sup>\*</sup>Significativo a 5% pelo teste de F. <sup>ns</sup>Não significativo.

FV: Fonte de variação. T: Temperatura. TA: Teor de água. CV: Coeficiente de variação. GL: Grau de liberdade.

Na Tabela 2 estão as equações utilizadas para estimar os valores do croma e das coordenadas “L” e “b” dos frutos de baru para as temperaturas de 60, 80 e 100 °C, em função do teor de água. As equações lineares foram ajustadas aos dados experimentais e apresentaram os parâmetros significativos pelo teste de t, elevados valores dos coeficientes de determinação e baixos do erro médio relativo.

**Tabela 2.** Equações ajustadas aos valores experimentais das coordenadas “L”, “b” e croma (Cr) dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel) submetidos a diferentes temperaturas de secagem

Variáveis	a	b	R <sup>2</sup> (%)	P (%)
	60 °C			
L	44,7013**	-17,0048*	87,95	1,29
b	24,0857**	8,1536**	98,28	0,40
Cr	27,2379**	9,3085**	99,10	0,26
80 °C				
L	44,9751**	-32,3213**	98,65	0,77
b	18,6681**	26,0293**	93,77	2,86
Cr	22,2434**	25,4205**	93,08	2,50
100 °C				
L	45,6133**	-29,2182*	89,95	1,84
b	21,5305**	17,6537*	78,74	3,27
Cr	24,8608**	17,6932*	82,40	2,56

\*\*Significativo a 1% pelo teste de t. \*Significativo a 5% pelo teste de t.

Para viabilizar o uso de um único modelo linear para a representação do croma (Cr) e das coordenada “L” e “b” dos frutos de baru, independentemente da temperatura de secagem, utilizou-se a metodologia descrita por Regazzi (2003), procedendo-se ao teste de identidade de modelos.

Os parâmetros do modelo linear nas temperaturas de 60 (a<sub>1</sub> e b<sub>1</sub>), 80 (a<sub>2</sub> e b<sub>2</sub>) e 100 °C (a<sub>3</sub> e b<sub>3</sub>) foram comparados entre si para verificar sua igualdade. As seguintes hipóteses foram formuladas:

H<sub>0</sub><sup>(1)</sup> : a<sub>1</sub> = a<sub>2</sub> = a<sub>3</sub> = a versus H<sub>a</sub><sup>(1)</sup>: nem todos a<sub>i</sub> são iguais

H<sub>0</sub><sup>(2)</sup> : b<sub>1</sub> = b<sub>2</sub> = b<sub>3</sub> = b versus H<sub>a</sub><sup>(2)</sup>: nem todos b<sub>i</sub> são iguais

H<sub>0</sub><sup>(3)</sup> : a<sub>1</sub> = a<sub>2</sub> = a<sub>3</sub> = a e b<sub>1</sub> = b versus H<sub>a</sub><sup>(3)</sup>: existe pelo menos uma desigualdade

A regra de decisão baseou-se no teste de *Qui*-quadrado ( $\chi^2$ ), de acordo com a seguinte expressão:

$$\chi^2_{\text{calculado}} = -N \ln \left( \frac{SQR_{\Omega}}{SQR_{W_i}} \right) \quad (5)$$

Em que:

$N$  : número de observações;

$SQR_{\Omega}$  : soma dos quadrados residuais do modelo completo;

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

O valor tabelado de ( $\chi^2$ ) é função do nível de significância  $\alpha$  ( $p=5\%$ ) e do número de graus de liberdade:

$$\nu = p_{\Omega} - p_{w_i} \quad (6)$$

Em que:

$\nu$  : graus de liberdade do modelo;

$p_{\Omega}$  : número de parâmetros do modelo completo;

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

Inicialmente, foram testadas as três condições de ar que apresentavam as temperaturas de 60, 80 e 100 °C. Em seguida, as condições de ar foram comparadas em pares. A Tabela 4 apresenta os resultados das hipóteses analisadas pelo teste de *Qui*-quadrado.

**Tabela 3.** Teste das hipóteses ( $H_0$ ) utilizando o teste de *Qui*-quadrado para o croma (Cr) e as coordenada “L” e “b” dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel)

Hipóteses	GL	$\chi^2$ tabelado	$\chi^2$ calculado
“L”			
60 e 80 °C	2	5,991	22,325
60 e 100 °C	2	5,991	8,023
80 e 100 °C	2	5,991	5,438
60, 80 e 100 °C	4	9,488	21,159
“b”			
60 e 80 °C	2	5,991	22,379
60 e 100 °C	2	5,991	6,472
80 e 100 °C	2	5,991	6,683
60, 80 e 100 °C	4	9,488	20,810
Cr			
60 e 80 °C	2	5,991	20,658
60 e 100 °C	2	5,991	7,101
80 e 100 °C	2	5,991	6,341
60, 80 e 100 °C	4	9,488	20,524

Apenas a valor de *Qui*-quadrado calculado da coordena “L” dos frutos de baru para as temperaturas de 80 e 100 °C foi menor que o valor de *Qui*-quadrado tabelado. Assim, aceitou-se a hipótese formulada, ou seja, os modelos lineares analisados para determinação da coordenada “L” secados nas temperaturas de 80 e 100 °C não diferem estatisticamente entre si, podendo ser utilizado um único modelo para as duas temperaturas estudadas.

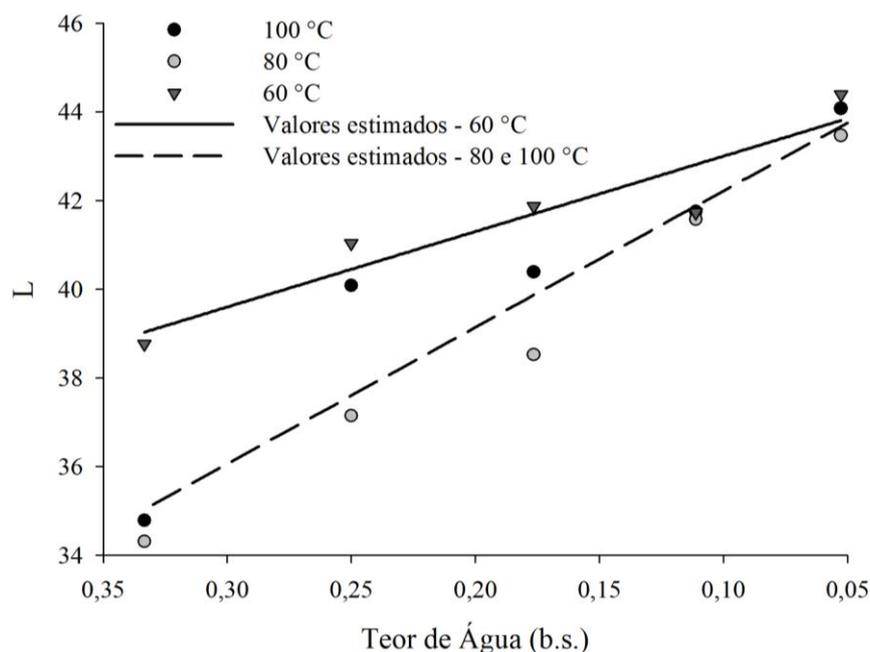
Nas demais combinações, o valor de *Qui*-quadrado calculado foi maior que os valores *Qui*-quadrado tabelado. Assim, rejeita-se a hipótese formulada ( $H_0$ ), logo, os valores ocorrem diferentemente para cada temperatura utilizada.

Na Figura 2 estão os valores da coordenada “L” dos frutos em função do teor de água e da temperatura de secagem. Esta característica indica a quantidade de luz perceptível ao olho humano dentro de uma mesma tonalidade, ou seja, se a cor é mais clara ou mais escura, variando do branco ao preto (BOTELHO et al., 2015).

Os valores da coordenada “L” em função do teor de água variaram de 38,77 a 44,39, de 34,31 a 43,46 e de 34,79 a 44,08 para as temperaturas 60, 80 e 100 °C, respectivamente. A variação na coordenada “L” dos frutos de baru ocorreu do preto para o branco.

Desta forma, houve incremento da luminosidade dos frutos de baru com a redução do teor de água para todas as temperaturas de secagem estudadas. Este comportamento mostra tendência ao branqueamento dos frutos de baru com redução do teor de água, independentemente da temperatura de secagem.

As diferenças entre as temperaturas de secagem para a coordenada “L” foram maiores para os teores de água mais elevados, em decorrência da heterogeneidade dos frutos, e foram diminuindo com redução do teor de água. Entretanto, não houve tendência clara quando comparados entre as temperaturas de secagem, corroborando os resultados obtidos por Botelho et al. (2015) em estudo da influência da temperatura de secagem na cor dos grãos de soja.



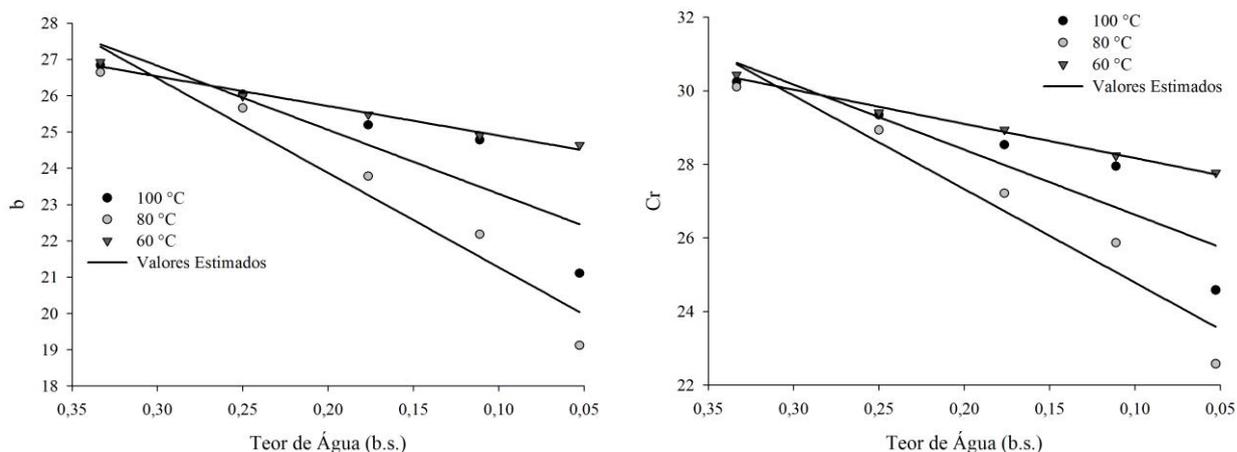
**Figura 2.** Valores médios da coordenada “L” dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel), em função do teor de água e das temperaturas de secagem.

Com base no teste de identidade de modelos, a Equação 5 pode ser utilizada para estimar os valores da coordenada “L” dos frutos de baru para as temperaturas de 80-100, tendo seus parâmetros sido significativos a 1% pelo teste de t.

$$L_{(80-100)} = 45,2942^{**} - 30,7697^{**} Ta \quad (5)$$

\*\*Significativo a 1% pelo teste de t.

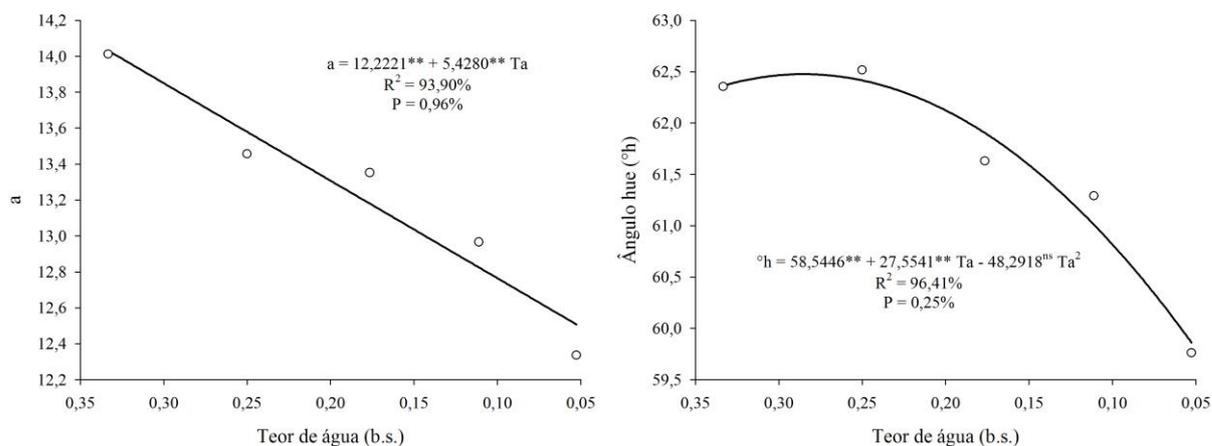
Na Figura 3 são apresentados os valores da coordenada “b” e do croma dos frutos de baru em função do teor de água e da temperatura de secagem. A coordenada “b” é mensurável em relação às tonalidades amarela, se positivo, e azul, se negativo. O croma pode ser definido como a saturação, intensidade, vivacidade, pureza e profundidade, ou então, como a quantidade da cor pela qual se distingue uma cor forte de uma fraca (MARTINAZZO, 2006).



**Figura 3.** Valores médios da coordenada “b” e do croma (Cr) dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel), em função do teor de água e das temperaturas de secagem.

Verifica-se que as duas variáveis estudadas reduziram na medida em que diminuiu o teor de água para todas as temperaturas estudadas. Não houve uma tendência clara entre as temperaturas de secagem. As diferenças entre as temperaturas de secagem para a coordenada “b” e para o croma foram menores no início da secagem e aumentaram com a redução do teor de água. Para a coordenada “b”, os valores variaram de 26,93 a 24,64, de 26,65 a 19,12 e de 26,84 a 21,11 para as temperaturas 60, 80 e 100 °C, respectivamente. Já para o croma, os valores variaram de 30,43 a 27,77, de 30,10 a 22,58 e de 30,24 a 24,58 para as temperaturas 60, 80 e 100 °C, respectivamente.

Na Figura 4 estão apresentados os valores médios da coordenada “a” e do ângulo hue, em função dos teores de água. A coordenada “a” refere-se à tonalidade vermelha, se positivo, ou verde, se negativo (GONELI, 2008). O ângulo hue é definido como iniciando no eixo +a e é expresso em graus, sendo que 0° corresponde a +a (vermelho), 90° corresponde a +b (amarelo), 180° corresponde a – a (verde) e 270° corresponde a – b (azul) (TIBOLA et al., 2005).

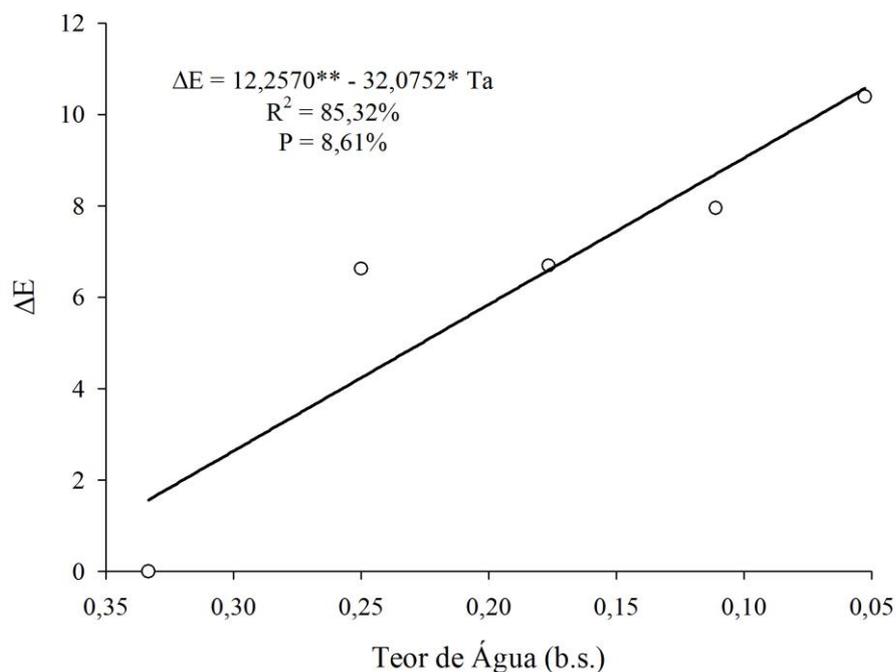


\*\*Significativo a 1% pelo teste de t. <sup>ns</sup>Não Significativo pelo teste de t.

**Figura 4.** Valores médios da coordenada “a” e do ângulo hue (°h) dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel), em função do teor de água.

Os valores da coordena “a” diminuíram de forma linear com redução do teor de água, e os valores ângulo hue aumentaram até atingir o valor máximo (62,48) quando os frutos de baru atingiram o teor de água de 0,29 b.s., tendo diminuído após este ponto com o decréscimo do teor de água. As equações utilizadas para estimar os valores da coordenadas “a” e do ângulo hue apresentaram elevados coeficiente de determinação ( $R^2$ ), baixos erros médios relativos (P), e apenas um parâmetro das equações não foi significativo pelo teste de t, indicando que as equações podem ser utilizadas para determinar estas variáveis analisadas.

Na Figura 5 estão ilustrados os valores da diferença total de cor dos frutos em função do teor de água. Observa-se que ocorreram variações na cor dos frutos de baru ao longo da secagem, o que resultou no aumento da diferença de cor. Com a redução de 0,01 (decimal b.s.) no teor de água dos frutos de baru, ocorre aumento de 0,32 na diferença de cor.



\*\*Significativo a 1% pelo teste de t. \*Significativo a 5% pelo teste de t.

**Figura 5.** Valores médios da diferença total de cor ( $\Delta E$ ) dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel), em função do teor de água.

Segundo diversos pesquisadores, a variação na coloração de grãos e frutos pode estar associada à redução da qualidade dos produtos (AFONSO JÚNIOR & CORRÊA, 2003; ALENCAR et al., 2009).

Na Tabela 4 estão apresentados os valores médios do ângulo hue e da diferença total de cor em função da temperatura de secagem. Os valores médios do ângulo hue decresceram com o aumento da temperatura de secagem, sendo que a temperatura de 60 °C diferiu da temperatura de 80 °C.

Já para a diferença total de cor, o aumento da temperatura de secagem proporcionou elevação dos valores, sendo que a temperatura de 100 °C obteve a maior diferença total de cor. A temperatura de 60 °C diferiu da temperatura de 80 e 100 °C, isso significa que, com o aumento da temperatura do ar de secagem, os frutos de baru perderam sua cor característica inicial, reduzindo seu aspecto qualitativo.

**Tabela 4.** Valores médios do ângulo hue ( $^{\circ}h$ ) e da diferença total de cor ( $\Delta E$ ) dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel), em função da temperatura de secagem

Temperatura ( $^{\circ}C$ )	$^{\circ}h$	$\Delta E$
100	61,83 ab	7,09 b
80	60,54 b	6,85 b
60	62,16 c	5,06 a

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si, conforme teste de médias Tukey, a 5% de significância.

## CONCLUSÕES

A coordenada “L” e a diferença total de cor ( $\Delta E$ ) aumentaram com a redução do teor de água.

Os valores do croma (Cr), ângulo hue ( $^{\circ}h$ ) e as coordenadas “a” e “b” se reduziram, provocando alteração na coloração dos frutos de baru.

O aumento da temperatura de secagem proporciona maior diferença total de cor, indicando perda no aspecto qualitativo. Assim, 60  $^{\circ}C$  é a temperatura indicada para a secagem dos frutos de baru.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C. Influência do tempo de armazenagem na cor dos grãos de café pré-processados por “via seca” e “via úmida”. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 27, n. 6, p. 1268-1276, 2003.

ALENCAR, E. R.; FARONI, L. R. A.; LACERDA FILHO, A. F.; PETERNELLI, L. A.; COSTA, A. R. Qualidade dos grãos de soja armazenados em diferentes condições. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 5, p. 606-613, 2009.

BOTELHO, F. M.; GRANELLA, S. J.; BOTELHO, S. C. C.; GARCIA, T. R. B. Influência da temperatura de secagem sobre as propriedades físicas dos grãos de soja. **Engenharia na Agricultura**, v. 23, n. 3, p. 212-219, 2015.

BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de defesa Agropecuária. **Regras para Análise de Sementes**. Brasília, 2009. 395p.

- DOYMAZ, I. Effect of dipping treatment on air drying of plums. **Journal of Food Engineering**, v. 64, n. 4, p. 465-470, 2004.
- FARONI, L. R. A.; CORDEIRO, I. C.; ALENCAR, E. R.; ROZADO, A. F.; ALVES, W. M. Influência do conteúdo de umidade de colheita e temperatura de secagem na qualidade do feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 148-154, 2006.
- FERNANDES, D. C.; FREITAS, J. B.; CZEDER, L. P.; NAVES, M. M. V. Nutritional composition and protein value of the baru (*Dipteryx alata* Vog.) almond from the Brazilian Savanna. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 90, n. 10, p. 1650–1655, 2010.
- FERREIRA, D.F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v.35, n.6, p.1039-1042, 2011.
- FREITAS, J. B.; NAVES, M. M. V. Composição química de nozes e sementes comestíveis e sua relação com a nutrição e saúde. **Revista de Nutrição**, v. 23, n. 2, p. 269-279, 2010.
- GONELI, A.L.D. **Varição das propriedades físico-mecânicas e da qualidade da mamona (*Ricinus communis* L.) durante a secagem e o armazenamento**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2008. 186p. Tese Doutorado.
- ISQUIERDO, E. P.; BORÉM, F. M.; CIRILLO, M. A.; OLIVEIRA, P. D.; CARDOSO, R. A.; FORTUNATO, V. A. Qualidade do café cereja desmucilado submetido ao parcelamento da secagem. **Coffee Science**, v. 6, n. 1, p. 83-90, 2011.
- LORENZI, H. **Árvores Brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 5.ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, v.1, 2008. 368p.
- MARQUES, E. R.; BORÉM, F. M.; PEREIRA, R. G. F. A.; BIAGGIONI, M. A. M. Eficácia do teste de acidez graxa na avaliação da qualidade do café arábica (*Coffea arabica* L.) submetido a diferente períodos e temperaturas de secagem. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 5, p. 1557-1562, 2008.
- MARTINAZZO, A. P. **Secagem, armazenamento e qualidade de folhas de *Cymbopogon citratus* (D.C.) Stapf**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2006. 140p. Tese Doutorado.
- REGAZZI, A. J. Teste para verificar a igualdade de parâmetros e a identidade de modelos de regressão não linear. **Revista Ceres**, v. 50, n. 287, p. 9-26, 2003.
- RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades

de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 10, n. 1, p. 17-26, 2008.

REIS, F. R.; MASSON, M. L.; WASZCZYNSKYJ, N. Efeitos da secagem convectiva e a vácuo sobre parâmetros de qualidade de fatias de berinjela. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 8, n. 2, p. 163-169, 2006.

SILVA, A. K.; EGITO, M. Rede de comercialização solidária de agricultores familiares e extrativistas do cerrado: um novo protagonismo social. **Agriculturas**, v. 2, n. 2, p. 14-16, 2005.

TIBOLA, C. S.; LUCCHETTA, L.; ZANUZO, M. R.; SILVA, P. R.; FERRI, V. C.; ROMBALDI, C. V. Inibição da ação do etileno na conservação de caquis (*Diospyros kaki* L.) 'Fuyu'. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 27, n. 1, p. 36-39, 2005.

## CONCLUSÃO GERAL

Tendo como referência os resultados obtidos, pode-se concluir que:

- As isotermas de dessecção dos frutos de baru na faixa de temperatura de 20 a 35 °C apresentam-se no formato sigmoideal, típico de produtos agrícolas.
- Os modelos Copace, Oswin, GAB, Halsey Modificado e Sigma Copace foram recomendados para determinar a higroscopicidade dos frutos de baru.
- O tempo de secagem se reduz com o aumento da temperatura, sendo de 266,3 horas para a temperatura de 40 °C e de 22,8 horas para a temperatura de 100 °C.
- Os modelos de Thompson, Midilli, Logarítmico, Dois Termos e Aproximação da Difusão são adequados para representar a secagem dos frutos de baru.
- O coeficiente de difusão efetivo aumenta com a elevação da temperatura do ar de secagem, sendo descrito pela equação de Arrhenius, com energia de ativação de 37,64 kJ mol<sup>-1</sup>.
- As propriedades termodinâmicas são influenciadas pelo teor de água dos frutos de baru, ocorrendo aumento da energia necessária para a retirada de água do produto com redução do teor de água.
- A força de compressão necessária para deformar os frutos de baru diminui com o aumento do teor de água, independentemente da temperatura de secagem.
- A redução do teor de água eleva a força necessária à ruptura dos frutos de baru, independentemente da temperatura de secagem.
- A coordenada “L” e a diferença total de cor ( $\Delta E$ ) aumentaram com a redução do teor de água.

- Os valores do croma (Cr), ângulo hue ( $^{\circ}h$ ) e as coordenadas “a” e “b” se reduziram, provocando alteração na coloração dos frutos de baru.
- O aumento da temperatura de secagem proporcionou maior diferença total de cor da temperatura de secagem, indicando perda no seu aspecto qualitativo.
- Contudo, ainda são necessárias novas pesquisas para aperfeiçoar o conhecimento da influência das etapas pós-colheita na qualidade dos frutos de baru e nos produtos gerados pela amêndoa e pela polpa.