

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

**PROPRIEDADES FÍSICAS E SECAGEM DOS GRÃOS DE  
PINHÃO-MANSO (*Jatropha curcas* L.)**

Autor: Valdiney Cambuy Siqueira  
Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Resende

RIO VERDE – GO  
Julho - 2011

# **PROPRIEDADES FÍSICAS E SECAGEM DOS GRÃOS DE PINHÃO-MANSO (*Jatropha curcas* L.)**

Autor: Valdiney Cambuy Siqueira  
Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Resende

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – *campus* Rio Verde - Área de concentração Ciências Agrárias.

RIO VERDE – GO  
Julho – 2011

## Catálogo na Biblioteca Maria Carlinda – FESURV

Gilmar José Terra CRB12524

S62p

Siqueira, Valdiney Cambuy

Propriedades físicas e secagem de grãos de Pinhão-mansô (*Jatropha curcas* L.) / Valdiney Cambuy Siqueira. – Rio Verde-GO. – 2011.

85 f.: il.;

Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, IFGoiano - *Campus* Rio Verde – 2011.

1. Pinhão-mansô – cultivo. 2. Pinhão-mansô – colheita. 3. Pinhão-mansô – secagem.

CDU 633.85

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

PROPRIEDADES FÍSICAS E SECAGEM DOS GRÃOS  
DE PINHÃO MANSO (*Jatropha Curcas L.*)

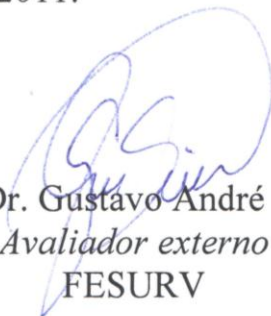
Autor: Valdiney Cambuy Siqueira  
Orientador: Dr. Osvaldo Resende

*TITULAÇÃO*: Mestre em Ciências Agrárias – Área de concentração  
Ciências Agrárias – Ciências Agrárias

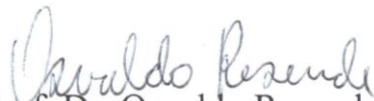
APROVADA em 28 de julho de 2011.



Prof. Dr. Ivano Alessandro Devilla  
*Avaliador externo*  
UnB



Prof. Dr. Gustavo André Simon  
*Avaliador externo*  
FESURV



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

*Ao meu orientador Osvaldo Resende, que me mostrou o caminho da pesquisa, sendo o principal responsável pela conquista do mestrado e do ingresso no doutorado.*

**DEDICO**

*Aos meus pais que me ajudaram na construção desse ideal.*

**OFEREÇO**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado vida, saúde e coragem para que eu pudesse batalhar, conquistar minhas vitórias e superar barreiras.

Aos meus pais José Siqueira Neto e Dulce Cambuy Siqueira, as minhas irmãs, Josiane Cambuy Siqueira e Aline Cambuy Siqueira, pela confiança, carinho, dedicação e apoio ao longo de toda minha vida acadêmica. Sou e serei eternamente grato, pois sei que não mediram esforços para minha formação.

Ao Professor e Amigo Osvaldo Resende pela orientação, confiança, paciência, empenho e dedicação na condução e realização deste trabalho, pelos seus ensinamentos e incentivos contribuindo para o meu crescimento pessoal e profissional.

A minha esposa Patrícia Lopes de Freitas Siqueira, pela ajuda, paciência, compreensão, carinho e amor.

A toda equipe do Laboratório de Pós-Colheita de Produtos Vegetais: Anderson, Daniel, Dieimisson, Hebert, Jéssica, Juliana, Kaique, Kelly, Lílian, Mariana, Nayara, Renan, Udenys e Thaís, pela contribuição direta ou indireta na realização deste trabalho. Ao Douglas e Tarcísio um agradecimento especial por contribuírem diretamente nesta pesquisa e por terem sido verdadeiros irmãos ao longo de todo esse tempo, serei eternamente grato a vocês.

As minhas co-orientadoras Juliana Rodrigues Donadon e Juliana de Fátima Sales, pelas contribuições e sugestões nesta pesquisa.

À banca de avaliação da defesa de Dissertação: Prof. Dr. Osvaldo Resende (Orientador), Prof. Dr. Ivano Alessandro Devilla e Prof. Dr. Gustavo André Simon.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – *Campus* Rio Verde, por tornar possível essa conquista.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudos.

**Obrigado!!!**

## BIOGRAFIA DO AUTOR

**VALDINEY CAMBUY SIQUEIRA** - filho de José Siqueira Neto e Dulce Cambuy Siqueira, nasceu em Rolim de Moura, Estado de Rondônia, em 16 de setembro de 1985.

Em agosto de 2005, iniciou o Curso de Agronomia na Universidade Federal de Rondônia (UNIR), em Rolim de Moura, RO, graduando-se em dezembro de 2009. Nesse mesmo mês e ano, ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado, em Ciências Agrárias do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – *Campus* Rio Verde, atuando na área de secagem e armazenamento de produtos agrícolas, defendendo a dissertação intitulada: Propriedades físicas e secagem dos grãos de pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.), em julho de 2011.



## ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE TABELAS .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	x
LISTA DE SÍMBOLOS .....	xiii
RESUMO .....	xvi
ABSTRACT .....	xviii
INTRODUÇÃO GERAL .....	01
1. Pinhão-manso .....	01
2. Secagem .....	02
3. Propriedades físicas .....	04
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	07
OBJETIVO GERAL .....	11
Capítulo 1. Propriedades físicas dos grãos de pinhão-manso ao longo da secagem em diferentes condições .....	12
Resumo .....	12
Abstract .....	12
Introdução .....	13
Material e métodos .....	14
Resultados e discussão .....	17
Conclusões .....	23
Referências .....	23

Capítulo 2. Forma e tamanho dos grãos de pinhão-manso ( <i>Jatropha curcas</i> L.) ao longo da secagem em diversas temperatura .....	28
Resumo .....	28
Abstract .....	28
Introdução .....	29
Material e métodos .....	30
Resultados e discussão .....	33
Conclusão .....	40
Referências bibliográficas .....	40
Capítulo 3. Cinética de secagem dos grãos de pinhão-manso .....	44
Resumo .....	44
Abstract .....	44
Introdução .....	45
Material e métodos .....	47
Resultados e discussão .....	52
Conclusão .....	61
Referências bibliográficas .....	61
Capítulo 4. Contração volumétrica dos grãos de pinhão-manso durante a secagem .....	68
Resumo .....	68
Abstract .....	68
Introdução .....	69
Material e métodos .....	70
Resultados e discussão .....	74
Conclusão.. .....	80
Referências bibliográficas .....	80
CONCLUSÃO GERAL .....	85

## ÍNDICE DE TABELAS

	Página
<b>Capítulo 1. Propriedades físicas dos grãos de pinhão-mansão ao longo da secagem em diferentes condições</b>	
<b>Tabela 1.</b> Equações ajustadas aos valores da porosidade, massa de 1000 grãos e massas específicas aparente e unitária dos grãos de pinhão-mansão em função do teor de água .....	22
<b>Capítulo 2. Forma e tamanho dos grãos de pinhão-mansão (<i>Jatropha curcas</i> L.) ao longo da secagem em diversas temperatura</b>	
<b>Tabela 1.</b> Equações ajustadas aos valores da área projetada, área superficial, volume e relação superfície-volume dos grãos de pinhão-mansão em função do teor de água .....	40
<b>Capítulo 3. Cinética de secagem dos grãos de pinhão-mansão</b>	
<b>Tabela 1.</b> Modelos matemáticos utilizados para prever a secagem de produtos agrícolas .....	49
<b>Tabela 2.</b> Razão de teor de água dos grãos de pinhão-mansão ao longo do tempo (h) de secagem em cinco condições de temperatura .....	52
<b>Tabela 3.</b> Coeficientes de determinação ( $R^2$ , %), erros médio relativo (P, %) e estimado (SE, decimal) para os modelos analisados, durante a secagem dos grãos de pinhão-mansão nas diversas condições de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) .....	53
<b>Tabela 4.</b> Distribuição dos resíduos (A = aleatória; T = tendenciosa) para os onze modelos analisados, durante a secagem dos grãos de pinhão-mansão nas diversas condições de temperatura .....	54

<b>Tabela 5.</b> Valores de qui-quadrado calculado para os onze modelos utilizados na representação da cinética de secagem dos grãos de pinhão-manso .....	56
<b>Tabela 6.</b> Parâmetros dos modelos de Midilli ajustados para as diferentes condições de secagem dos grãos de pinhão-manso .....	56
<b>Tabela 7.</b> Valores do raio equivalente ( $r$ , x $10^{-3}$ m) e do teor de água ( $X^*$ , kg de água/kg de matéria seca) dos grãos de pinhão-manso, obtidos durante a secagem nas temperaturas de 45, 60, 75, 90 e 105 °C .....	58
<b>Capítulo 4. Contração volumétrica dos grãos de pinhão-manso durante a secagem</b>	
<b>Tabela 1.</b> Modelos utilizados para simular o índice de contração volumétrica de produtos agrícolas .....	73
<b>Tabela 2.</b> Coeficientes de determinação ( $R^2$ , %), erros médio relativo (P, %) e estimado (SE, decimal) para os cinco modelos analisados, durante a contração volumétrica dos grãos de pinhão-manso nas diversas condições de temperatura (°C) .....	75
<b>Tabela 3.</b> Distribuição dos resíduos (A = aleatória; T = tendenciosa) para os modelos analisados, durante a contração volumétrica dos grãos de pinhão-manso nas diversas condições de temperatura .....	76
<b>Tabela 4.</b> Valores de qui-quadrado calculado para os modelos utilizados na representação da contração volumétrica dos grãos de pinhão-manso .....	77
<b>Tabela 5.</b> Coeficientes do modelo de polinomial ajustados para a contração volumétrica dos grãos de pinhão-manso nas diferentes condições de secagem .....	78
<b>Tabela 6.</b> Equações ajustadas aos valores do diâmetro geométrico dos grãos de pinhão-manso em função do teor de água.....	80

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
<b>Capítulo 1. Propriedades físicas dos grãos de pinhão-manso ao longo da secagem em diferentes condições</b>	
<b>Figura 1.</b> Ilustração da determinação das dimensões características do grão de pinhão-manso, considerado esferóide, (A) comprimento; (B) largura e (C) espessura .....	15
<b>Figura 2.</b> Teores de água (kg de água/kg de matéria seca) dos grãos de pinhão-manso ao longo do tempo de secagem (h) para diversas temperaturas.....	17
<b>Figura 3.</b> Massa específica aparente ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) dos grãos de pinhão-manso submetidos à secagem em cinco condições de ar .....	18
<b>Figura 4.</b> Massa específica unitária ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) dos grãos de pinhão-manso ao longo da secagem em diversas temperaturas .....	19
<b>Figura 5.</b> Valores médios da porosidade dos grãos de pinhão-manso submetidos à secagem em cinco condições de temperatura .....	20
<b>Figura 6.</b> Massa de 1000 grãos de pinhão-manso submetidos à secagem em cinco condições de ar .....	21
<b>Capítulo 2. Forma e tamanho dos grãos de pinhão-manso (<i>Jatropha curcas</i> L.) ao longo da secagem em diversas temperaturas</b>	
<b>Figura 1.</b> Desenho esquemático do grão de pinhão-manso, considerado esferóide, com suas dimensões características .....	31
<b>Figura 2.</b> Teores de água (kg de água/kg de matéria seca) dos grãos de pinhão-manso ao longo do tempo de secagem (h) para diversas temperaturas .....	33

<b>Figura 3.</b> Esfericidade dos grãos de pinhão-manso em função do teor de água para diversas condições de secagem .....	34
<b>Figura 4.</b> Circularidade dos grãos de pinhão-manso submetidos a seis condições de secagem .....	35
<b>Figura 5.</b> Relação comprimento-largura dos grãos de pinhão manso durante a secagem em diferentes temperaturas .....	35
<b>Figura 6.</b> Volume ( $\text{mm}^3$ ) dos grãos de pinhão-manso submetidos a diversas condições de secagem .....	36
<b>Figura 7.</b> Área superficial ( $\text{mm}^2$ ) dos grãos de pinhão-manso submetidos a seis condições de secagem .....	37
<b>Figura 8.</b> Área projetada ( $\text{mm}^2$ ) dos grãos de pinhão-manso submetidos a seis condições de secagem .....	38
<b>Figura 9.</b> Relação superfície-volume dos grãos de pinhão-manso submetidos a diversas condições de secagem .....	39
<b>Capítulo 3. Cinética de secagem dos grãos de pinhão-manso</b>	
<b>Figura 1.</b> Desenho esquemático dos grãos de pinhão-manso, considerados esferoides, com suas dimensões características .....	51
<b>Figura 2.</b> Ilustração da distribuição dos resíduos: A) Aleatória para o modelo de Midilli; B) Tendenciosa para o modelo de Wang e Singh; para os grãos de pinhão-manso submetidos à secagem na temperatura de 105 °C .....	55
<b>Figura 3.</b> Valores da razão de teor de água experimentais e estimados pelo modelo de Midilli para a secagem dos grãos de pinhão-manso nas diversas condições de temperatura .....	57
<b>Figura 4.</b> Coeficiente de difusão efetivo ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ ) obtidos para a secagem dos grãos de pinhão-manso nas temperaturas de 45, 60, 75, 90 e 105 °C .....	58
<b>Figura 5.</b> Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo em função da temperatura do ar de secagem, obtido durante a secagem dos grãos de pinhão-manso .....	60
<b>Capítulo 4. Contração volumétrica dos grãos de pinhão-manso durante a secagem</b>	
<b>Figura 1.</b> Desenho esquemático do grão de pinhão-manso, considerado esferóide, com suas dimensões características .....	72
<b>Figura 2.</b> Taxa de redução de redução de água ( $\text{kg}.\text{kg}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ) dos grãos de pinhão-manso submetidas à secagem em seis condições de ar .....	74

<b>Figura 3.</b> Ilustração da distribuição dos resíduos: A) Aleatória para o modelo Polinomial; B) Tendenciosa para o modelo de Corrêa et al. (2004); durante a modelagem da contração volumétrica dos grãos de pinhão-manso .....	77
<b>Figura 4.</b> Valores da contração volumétrica unitária ( $\psi_g$ ) dos grãos de pinhão-manso, experimentais e estimados pelo modelo Polinomial, em função da redução do teor de água .....	79
<b>Figura 5.</b> Diâmetro geométrico (mm) dos grãos de pinhão-manso submetidos a diversas condições de secagem .....	79

## LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

Ta .....	teor de água .....	kg de água/kg de matéria seca
b.u. ....	teor de água (base úmida) .....	kg de água/kg de massa total
X .....	teor de água do produto .....	kg de água/kg de matéria seca
X <sub>i</sub> .....	teor de água inicial do produto .....	kg de água/kg de matéria seca
X <sub>e</sub> .....	teor de água de equilíbrio .....	kg de água/kg de matéria seca
RX .....	razão de teor de água do produto .....	adimensional
V <sub>g</sub> .....	volume do grão .....	mm <sup>3</sup>
V .....	volume em cada teor de água .....	mm <sup>3</sup>
V <sub>o</sub> .....	volume inicial .....	mm <sup>3</sup>
ψ .....	índice de contração volumétrica .....	decimal
TRA .....	taxa de redução de água .....	kg.kg <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup>
Ma <sub>0</sub> .....	massa de água total anterior .....	kg
Ma <sub>i</sub> .....	massa de água total atual .....	kg
Ms .....	matéria seca .....	kg
t <sub>0</sub> .....	tempo total de secagem anterior .....	h
t <sub>i</sub> .....	tempo total de secagem atual .....	h
ε .....	Porosidade .....	%
ρ <sub>u</sub> .....	massa específica unitária .....	kg.m <sup>-3</sup>
ρ <sub>a</sub> .....	massa específica aparente .....	kg.m <sup>-3</sup>
S .....	área superficial .....	mm <sup>2</sup>
A <sub>p</sub> .....	área projetada .....	mm <sup>2</sup>
SV .....	relação superfície-volume .....	mm <sup>2</sup> .m <sup>-3</sup>
C <sub>c</sub> .....	circularidade .....	%
E <sub>s</sub> .....	esfericidade .....	%



$D_g$ .....	diâmetro geométrico médio .....	mm
$m_{1000g}$ .....	massa de 1000 grãos .....	-
$h$ .....	horas .....	-
$A$ .....	comprimento .....	mm
$B$ .....	largura .....	mm
$C$ .....	espessura .....	mm
$r$ .....	raio de esfera equivalente .....	m
$Y$ .....	valor observado experimentalmente .....	-
$\hat{Y}$ .....	valor calculado pelo modelo .....	-
GLR .....	graus de liberdade do modelo .....	-
$D$ .....	coeficiente de difusão efetivo .....	$m^2 \cdot s^{-1}$
$\alpha$ .....	número de termos .....	-
$\lambda_\alpha$ .....	raízes da equação de Bessel de ordem zero .....	-
$D_0$ .....	fator pré-exponencial .....	-
$E_a$ .....	energia de ativação .....	$kJ \cdot mol^{-1}$
$R$ .....	constante universal dos gases .....	$8,134 kJ \cdot kmol^{-1} \cdot K^{-1}$
$T_{ab}$ .....	temperatura absoluta .....	K
$k, k_0, k_1$ ..	constantes de secagem .....	$h^{-1}$
$R^2$ .....	coeficiente de determinação .....	%
$A_L$ .....	aleatório .....	-
$T_D$ .....	tendencioso .....	-
$\chi^2$ .....	qui-quadrado .....	adimensional
$P$ .....	erro médio relativo .....	%
SE .....	desvio-padrão da estimativa .....	adimensional
$a_1, a_2, a_3$ ..	coeficientes do modelo .....	-
$a, b, c, n$	coeficientes dos modelos .....	-
$\pi$ .....	pi .....	3,1416
$t$ .....	tempo de secagem .....	h
kg .....	quilograma .....	-
g .....	gramas .....	-
$^{\circ}C$ .....	graus Celsius .....	-
h .....	horas .....	-
K .....	Kelvin .....	$^{\circ}C + 273,15$
T .....	temperatura .....	$^{\circ}C$

$m^{-3}$ .....	metros cúbicos .....	-
L .....	litros .....	-
mm .....	milímetros .....	-
% .....	percentual .....	-

## RESUMO GERAL

SIQUEIRA, Valdiney Cambuy. M.e, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Julho de 2011. **Propriedades físicas e secagem dos grãos de pinhão-manso** (*Jatropha curcas* L.). Orientador: Dr. Osvaldo Resende. Co-orientadoras: Dra. Juliana Rodrigues Donadon, Dra. Juliana de Fátima Sales.

Para o desenvolvimento de maquinários utilizados nas etapas de colheita e pós-colheita, são de fundamental importância a determinação e o conhecimento do comportamento das propriedades físicas dos grãos de pinhão-manso, bem como do seu desempenho durante a secagem, visto que a redução do teor de água é um importante processo para manutenção da qualidade dos produtos agrícolas. O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de determinar as propriedades físicas e estudar o processo de secagem dos grãos de pinhão-manso em diferentes condições de temperatura. O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Pós-colheita de Produtos Vegetais do IF Goiano. Para o experimento de propriedades físicas e cinética de secagem, os grãos de pinhão-manso com o teor de água de 0,50 (kg de água/kg de matéria seca), foram submetidos à secagem em estufa com ventilação de ar forçada em cinco condições de temperatura de 45, 60, 75, 90 e 105 °C e umidades relativas de 15,6; 7,4; 4,0; 1,8 e 1,2%, respectivamente, até atingirem o teor de água de  $0,10 \pm 0,005$  (kg de água/kg de matéria seca). Para o experimento de forma e tamanho e contração volumétrica, os grãos com o teor de água de 0,61 (kg de água/kg de matéria seca) foram submetidos à secagem em estufa com circulação de ar forçada nas temperaturas de 36, 45, 60, 75, 90 e 105 °C e umidades relativas de 31,7; 19,6; 9,4; 4,8; 2,6 e 1,5 %, respectivamente, até atingirem o teor de água de  $0,11 \pm 0,006$  (kg de água/kg de matéria seca). O fenômeno da contração volumétrica e da secagem dos grãos de pinhão-manso foi representado por meio de modelos matemáticos citados na literatura específica. Os modelos foram

selecionados, considerando-se a magnitude do coeficiente de determinação, do valor de qui-quadrado, do erro médio relativo, do erro padrão da estimativa e verificação do comportamento da distribuição dos resíduos. A difusividade efetiva e a energia de ativação foram calculadas por meio do modelo da difusão líquida para a forma geométrica cilíndrica, com aproximação de oito termos, e pela equação de Arrhenius, respectivamente. As propriedades físicas dos grãos de pinhão-manso ao longo da secagem foram estudadas de acordo com a circularidade, esfericidade, volume, área superficial, área projetada, relação superfície-volume, massa de mil sementes, massas específicas aparente e unitária e porosidade. O experimento foi montado em esquema fatorial, tendo como fatores as diferentes temperaturas e os teores de água. A variação das propriedades físicas do pinhão-manso durante a secagem foi analisada por meio de análise de variância e regressão. Com base nos resultados obtidos, pôde-se concluir que: a) com a redução do teor de água, há um decréscimo na porosidade, na massa de 1000 grãos e nas massas específicas aparente e unitária dos grãos de pinhão-manso, não sendo possível identificar um comportamento diferenciado com o aumento das temperaturas utilizadas; b) a redução do teor de água e as condições de secagem promovem alterações na forma e diminuem o tamanho dos grãos de pinhão-manso; c) os modelos de Midilli e Dois Termos são adequados para a representação do fenômeno da secagem dos grãos de pinhão-manso, recomendando-se o modelo de Midilli para a descrição do fenômeno pela sua maior simplicidade; o coeficiente de difusão efetivo dos grãos de pinhão-manso aumenta com a elevação da temperatura do ar; a inclusão da contração volumétrica promove um melhor ajuste do modelo da difusão líquida para a secagem dos grãos de pinhão-manso; d) o teor de água e a temperatura de secagem influenciam na contração volumétrica dos grãos de pinhão-manso, sendo este fenômeno satisfatoriamente descrito pela equação Polinomial, e o diâmetro geométrico se reduz linearmente com a redução do teor de água, independentemente da condição de secagem.

Palavras-chave: Pós-colheita, temperatura, forma, tamanho, modelagem.

## ABSTRACT

SIQUEIRA, Valdiney Cambuy. M.e, Instituto Federal de Educação. Ciência e Tecnologia Goiano, (“Goiano” Federal Institute of Education, Science and Technology) July, 2011. **Physical properties and drying process of Jatropha grains** (*Jatropha curcas* L.). Adviser: Dr. Osvaldo Resende. Co-adviser: Dra. Juliana Rodrigues Donadon, Dra. Juliana de Fátima Sales

Determining the behavior and knowledge from physical properties of Jatropha grains are fundamentally important for machinery development used in harvesting and post-harvest stages, as well as their performance during the drying process, since the reduction in content water is an important process for maintaining agricultural products quality. This work was carried out to determine the physical properties and study the drying process of Jatropha grains under different temperature conditions. The experiment was carried out at Laboratório de Pós-colheita de Produtos Vegetais do IF – Instituto Federal Goiano (Post-harvest Laboratory of Vegetable Products of Goiano Federal Institute). For the experiment of physical properties and drying kinetics, Jatropha grains with moisture content of 0.50 (water kg/dry matter kg) were subjected to drying in an oven with forced air ventilation in five temperature conditions of 45, 60, 75, 90, and 105°C and relative humidities of 15.6, 7.4, 4.0, 1.8, and 1.2%, respectively, until they reach the moisture content of  $0.10 \pm 0.005$  (water kg/dry matter kg). For the experiment with shape, size, and shrinkage, the grains with moisture content of 0.61 (water kg/dry matter kg) were subjected to drying in an oven with forced air circulation at temperatures of 36, 45, 60, 75, 90, and 105°C and relative humidities of 31.7, 19.6, 9.4, 4.8, 2.6, and 1.5%, respectively, until they reach the moisture content of  $0.11 \pm 0.006$  (water kg/dry matter kg). The shrinkage and drying phenomenon of Jatropha grains was represented by mathematical models cited in specific literature. The models were selected considering the magnitude of determination coefficient, chi-square value,

relative average error, estimation standard error, and behavior verification of residuals distribution. The effective diffusivity and activation energy were calculated using the liquid diffusion model for cylindrical geometry, nearly eight terms, and Arrhenius' equation, respectively. The physical properties of *Jatropha* grains along the drying process were studied according to the roundness, sphericity, volume, surface area, projected area, surface-volume ratio, weight of thousand seeds, apparent and unitary specific mass and porosity. The experiment was arranged in a factorial design, with factors such as different temperatures and moisture contents. The variation in *Jatropha* physical properties during the drying process was analyzed by variance and regression analysis. Based on these results, the conclusions are: “a) by reducing the moisture content, there is a decrease in porosity, in mass of 1.000 grains, and in apparent and unitary specific mass of *Jatropha* grains. It was not possible to identify a different behavior with increasing of used temperatures; b) the reduction of moisture content and drying conditions promote changes in shape and decrease *Jatropha* grains size; c) Midilli and Two Terms models are suitable to represent the drying phenomenon of *Jatropha* grains, recommending Midilli model to describe the phenomenon due its simplicity; the effective diffusion coefficient of *Jatropha* grains increases with increasing air temperature; the shrinkage inclusion promotes a better adjustment of the liquid diffusion model for drying *Jatropha* grains; d) moisture content and drying temperature influence *Jatropha* grains shrinkage, being this phenomenon satisfactorily described by polynomial equation, and the geometric diameter decreases linearly with the reduction of water content, regardless of drying condition”.

Keyword: Postharvest, temperature, form, size, modeling.

## INTRODUÇÃO GERAL

### 1. Pinhão-mansô

Segundo Abreu et al. (2009), entre as plantas oleaginosas que vêm sendo apresentadas como alternativa na diversificação e que podem ser cultivadas para aumentar a produção de biodiesel, destaca-se o pinhão-mansô (*Jatropha curcas* L.). O pinhão-mansô é uma espécie oleaginosa viável para a obtenção do biocombustível, pois produz, no mínimo, 2 toneladas de óleo por hectare (Saturnino et al. 2005).

Segundo Beltrão & Cartaxo (2006), devido à dimensão continental do Brasil e à sua diversidade de clima e solo, estima-se que existam aqui mais de 200 espécies de oleaginosas com potencial para produzir óleo como fonte de matéria-prima para a produção de biodiesel (energia), porém um dos destaques do setor é uma planta que até então passava quase despercebida, o pinhão-mansô.

O pinhão-mansô, planta pertencente à família Euphorbiaceae, é uma espécie nativa da América tropical, naturalizada em partes tropicais e subtropicais da Ásia e África (Augustus et al. 2002; Arruda et al. 2004). Por ser pouco exigente em relação ao clima e solo, adapta-se facilmente a variadas condições. Contudo, não tolera geadas fortes, mas pode sobreviver a geadas fracas, com queda de folhas e redução na produção de sementes (Saturnino et al. 2005).

Segundo Nunes et al. (2009), a semente é endospermica e apresenta forma ovalada, dorso convexo, envoltório liso, coloração preta, marcada por suaves estrias. Apresenta rafe pouco evidente e presença de carúncula, situada próxima à micrópila, presa na parte ventral. Quando a semente está seca, a carúncula tem a extremidade cônica, com dois lóculos pouco visíveis. De acordo com Nunes (2007), sementes de

pinhão-manso quando secas apresentam cerca de 1,5 a 2,0 cm de comprimento e 1,0 a 1,5 cm de largura.

Dentro da semente, encontra-se o albúmen ou endosperma, de coloração branca, tenro e rico em óleo (Nunes et al. 2009). De acordo com Barroso et al. (1999), todas as euforbiáceas têm endospermas fartos, carnosos e ricos em reservas oleaginosas.

Segundo Nunes (2007), o teor de óleo das sementes de pinhão-manso varia entre 30 e 40%, podendo alcançar uma produção anual de 1.100 a 1.700 L/ha. Outros atributos estão relacionados ao óleo, pois não é comestível, portanto, não seria desviado para a alimentação humana (Saturnino et al. 2005), ao contrário do óleo de soja, considerado referência para a produção de biodiesel em escala industrial por ser derivado de uma matéria-prima abundante no Brasil e pela disponibilidade de tecnologia para a sua produção (Santos et al. 2009).

De acordo com Sirisomboon et al. (2007), as sementes de pinhão-manso têm sido utilizadas como inseticidas, alimentos/forragens (variedades não-tóxicas ou quando desintoxicado), o óleo pode ser utilizado para a produção de sabão, lubrificantes, inseticidas, remédios e, quando misturado com óxido de ferro, pode ser usado em verniz.

O Brasil é um país que apresenta grande potencial para se destacar mundialmente na produção de biodiesel por dispor de uma grande extensão de áreas cultiváveis e clima adequado à produção de uma diversidade de culturas oleaginosas e, desta forma, disponibilizar matéria-prima (Santos et al. 2009). Dadas as características do pinhão-manso citadas anteriormente, esta cultura se destaca no cenário mundial como uma das plantas com maior viabilidade para produção de biodiesel.

O pinhão-manso ainda hoje é cultivado em pequenas lavouras, em que os processos de colheita, secagem e armazenagem são feitos sem recursos tecnológicos. Segundo Santos et al. (2009), com o advento do biodiesel, novas tecnologias deverão ser adotadas para atender as necessidades de uma produção em grande escala.

## 2. Secagem

A produção de grãos sadios e de qualidade superior requer que o produto seja colhido antecipadamente, ou seja, quando ainda apresenta elevado teor de água, visando a minimizar as perdas ocasionadas no campo pelo ataque de insetos e microrganismos



(Corrêa et al. 2006). Com isso, as etapas pós-colheita são essenciais para a garantia da manutenção da qualidade do material colhido, entre elas a secagem se destaca como a mais importante.

Tendo em vista que a secagem prolonga o período germinativo das sementes, é de fundamental importância o conhecimento das condições deste processo, essencialmente a temperatura e a umidade relativa do ar, pois esses dois fatores regulam a velocidade de saída de água do interior dos grãos. Caso essa etapa pós-colheita seja realizada de forma errônea, poderão ocorrer modificações na estrutura e nos teores dos componentes das sementes, comprometendo a germinação e o estabelecimento da plântula no local de cultivo.

A remoção do teor de água deve ser realizada em um nível tal que o produto fique em equilíbrio com o ar do ambiente onde será armazenado e deve ser realizada de modo a preservar a aparência, a qualidade nutritiva e, no caso de sementes, a viabilidade e o vigor (Silva 2008).

A secagem envolve um processo simultâneo de transferência de calor e massa (Brooker et al. 1992). E para que ocorra a remoção de água dos grãos, a pressão de vapor do grão deve ser maior que a pressão de vapor d'água do ar de secagem. A modelagem matemática é essencial para simular o comportamento dos materiais submetidos a determinado processo. Assim, durante a secagem, a utilização de modelos matemáticos auxilia na execução de projetos e no dimensionamento de equipamentos, contribuindo para a melhor compreensão dos mecanismos envolvidos (Resende 2006). Para a simulação, cujo princípio se fundamenta na secagem de sucessivas camadas delgadas do produto, utiliza-se um modelo matemático que representa, satisfatoriamente, sua perda de água durante o período de secagem (Berbert et al. 1995; Giner & Mascheroni 2002).

Segundo Resende et al. (2009), os modelos matemáticos, geralmente, baseiam-se em variáveis externas ao produto, como a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem. Entretanto, não fornecem indicações detalhadas sobre os fenômenos de transporte de energia e de água no interior dos grãos e consideram que todo o processo de secagem ocorre somente no período de taxa decrescente.

Uma das mais importantes mudanças físicas que ocorrem nos produtos agrícolas durante a secagem é a redução do seu volume externo. A perda de água causa danos à estrutura celular do produto, levando à mudança na forma e no decréscimo em suas dimensões (Mayor & Sereno 2004). Segundo Ramos et al. (2003), a redução do

teor de água durante o processo de secagem origina uma redução no tamanho do tecido celular, fenômeno usualmente chamado de contração volumétrica. A contração volumétrica pode ser muito intensiva, dependendo do método de secagem aplicado (Krokida & Maroulis 1997) e das condições de secagem, afetando os parâmetros da transferência de calor e massa, devendo ser considerada no estabelecimento de modelos de secagem (Ramos et al. 2003).

Os modelos empregados para representar a secagem dos produtos agrícolas, na sua grande maioria, foram desenvolvidos negligenciando-se a contração volumétrica do produto durante o processo de desidratação (Brooker et al. 1992). Segundo Ramos et al. (2005), as modificações no produto referentes à sua contração volumétrica também devem ser incluídas nos modelos para completa descrição, precisão e análise do fenômeno de secagem. Estas equações vêm sendo revisadas para incorporar esse parâmetro, melhor simular o processo, garantindo a precisão dos resultados (Lang & Sokhansanj 1993).

Existem várias teorias para descrever o processo de remoção de água dos produtos agrícolas, entre elas, está a teoria da difusão líquida, que diz que o movimento de água do interior para a periferia dos grãos ocorre de acordo com a segunda lei de Fick, em que a água se movimenta em função do gradiente de concentração.

A difusão ocorre nos sólidos de estrutura fina, nos capilares, poros e nos pequenos orifícios cheios de vapor. Contudo, a teoria de difusão não considera o encolhimento, o endurecimento da casca e as isotermas de sorção (Barbosa-Cánovas & Veja-Mercado 2000). Como a difusividade varia conforme mudam as condições de secagem, ela não é intrínseca ao material, assim, convencionou-se chamá-la de difusividade efetiva (Oliveira et al. 2006).

### 3. Propriedades físicas

Os materiais biológicos têm algumas características físicas que são empregadas no desenvolvimento de projetos de máquinas e equipamentos. Contudo, torna-se necessário considerar que um material biológico não tem a uniformidade de produtos confeccionados e moldados pela indústria química, mecânica e ou elétrica, pois, até o momento, para a Ciência Biológica, não foi possível originar produtos com forma e tamanho precisos (Mata & Duarte 2002). Estes pesquisadores destacam que essa

imprecisão é causada por inúmeros fatores que interferem no processo produtivo de um material biológico, entre eles a variedade dos produtos (sementes), sua posição e forma de crescimento na planta mãe, a variabilidade do clima, a fertilidade do solo e as práticas agrícolas empregadas.

De acordo com Bala & Woods (1984), Ratti (1994) e Sokhansanj & Lang (1996), mudanças das características dimensionais dos produtos devidas à sua desidratação são relatadas como as primeiras causas das alterações de forma e tamanho, massa específica real e aparente e velocidade terminal de produtos agrícolas.

As propriedades físicas dos grãos são características relevantes na otimização dos processos industriais e no desenvolvimento de novos projetos e equipamentos utilizados nas operações pós-colheita. Variações dessas propriedades em função do teor de água e de outros fatores durante a secagem de vários produtos têm sido investigadas por diversos autores (Mcminn & Magee 1997; Ruffato et al. 1999).

Os grãos e frutos, de modo geral, não apresentam um formato geométrico perfeitamente definido, tornando necessário para a solução de problemas relacionados à sua geometria assumir para o produto uma forma regular conhecida, o que acarreta em aproximações e possíveis erros (Corrêa et al. 2002).

O tamanho e a forma são características específicas de cada produto, definidas geneticamente, que podem ser influenciadas pelo ambiente durante e após o período de sua formação e que influenciam as demais propriedades físicas do produto (Dias 2007).

Projetos de máquinas para processamento, classificação e dimensionamento de equipamentos destinados à pós-colheita de produtos agrícolas requerem dados relativos às propriedades físicas, especialmente relativos às propriedades geométricas. Nesse sentido, informações a respeito de tamanho, volume, porosidade e massa específica, entre outras características físicas dos produtos agrícolas, são consideradas de grande importância para estudos que envolvem transferência de calor e massa e movimentação de ar em massas granulares (Goneli et al. 2011).

A circularidade e a esfericidade são os principais parâmetros a serem definidos, ou seja, quanto mais próximos da unidade estiverem estes valores, mais próximos de um círculo ou de uma esfera estará o grão em estudo. A circularidade é a razão entre a maior área projetada do grão em repouso natural e a área do menor círculo circunscrito. Já a esfericidade é a razão entre o diâmetro do maior círculo inscrito e do menor círculo circunscrito (Silva 2008).

Porosidade é a relação entre o volume ocupado pelo ar intergranular de determinado produto e o volume total ocupado por esta massa granular. O teor de água dos produtos agrícolas é um importante fator que determina a variação da porosidade dos grãos, pois grãos com maiores teores de água apresentam uma tensão superficial maior que grãos mais secos.

O conhecimento da porosidade intergranular de um produto é de suma importância pois ela está inserida no dimensionamento de várias estruturas como silos, contêineres, caixas, embalagens, unidades transportadoras, além de estar contida dentro dos estudos da transferência de calor e massa, nos processos hidrodinâmicos, aerodinâmicos e termoelétricos, entre outros (Mata & Duarte 2002).

Segundo Couto et al. (1999), os processos relacionados à limpeza dos produtos baseiam-se em possíveis diferenças nos valores entre as massas específicas dos grãos, nos diferentes estádios de maturação, e dos materiais estranhos, e se as diferenças forem significativas, haverá possibilidade real de se executar tal separação.

Corrêa et al. (2006) destacam que a massa específica aparente ou peso hectolitro (PH) do trigo é uma propriedade que assume elevada importância para efeito de comercialização do produto, uma vez que os preços praticados consideram esta característica como um indicativo de qualidade e rendimento.

Para Ratti (1994) e Zogzas et al. (1994), a contração volumétrica de produtos vegetais durante a secagem não é função exclusiva do teor de água, mas também é dependente das condições do processo e da geometria do produto. Khraisheh et al. (2004) observaram que a contração volumétrica dos produtos agrícolas durante a secagem ocorre de maneira heterogênea. No início da secagem, aparentemente, o produto permanece com a estrutura intacta e mantém sua forma original. Entretanto, com a retirada de água, acontece o seu encolhimento, acompanhado de deformação das partículas, formação de poros e demais mudanças microestruturais (Koç et al. 2008).

Pesquisadores têm realizado estudos para a avaliação das principais propriedades físicas dos produtos agrícolas, demonstrando a sua aplicação prática em projetos de máquinas e estruturas. Recentes descobertas científicas têm melhorado a manipulação e o processamento dos materiais biológicos com a utilização de processos mecânicos, térmicos, elétricos, ópticos, entre outros, entretanto ainda se conhece pouco sobre as características físicas dos produtos (Amin et al. 2004).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, F.B.; RESENDE, M.D.V.; ANSELMO, J.L.; SATURNINO, H.M.; BRENHA, J.A.M.; FREITAS, F.B. Variabilidade genética entre acessos de pinhão-manso na fase juvenil. *Magistra*, v.21, n.1, p.036-040, 2009.

AMIN, M. N.; OSSAIN, M. A.; ROY, K. C. Effects of moisture content on some physical properties of lentil seeds. *Journal of Food Engineering*, v.65, n.1, p.83-87, 2004.

ARRUDA, F. P. DE.; BELTRÃO, N. E. DE M.; ANDRADE, A. P. DE A.; PEREIRA, W. E.; SEVERINO, L. S. Cultivo de pinhão manso (*Jatropha curcas* L.) como alternativa para o semiárido nordestino. *Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas*, v.8, n.1, p.789-799, 2004.

AUGUSTUS, G.D.P.S.; JAYABALAN, M.; SEILER, G.J. Evaluation and bioinduction of energy components of *Jatropha curcas*. *Biomass e Bioenergy*, v.23, p.161-164, 2002.

BALA, B.K.; WOODS, J.L. Simulation of deep bed malt drying. *Journal Agricultural Engineering Research*, v.30, n.3, p.235-244, 1984.

BARBOSA-CÁNOVAS, G.V.; VEJAMERCADO, H. *Deshidratación de alimentos*. Ed. ACRIBIA S.A. 2000, 297p.

BARROSO, M.B.; MORIN, N.P.; PEIXOTO, A.L.; ICHASO, C.L.F. *Frutos e sementes: morfologia aplicada à sistemática de dicotiledôneas*. Viçosa: UFV, 1999. 443p.

BELTRÃO, N.E.M.; CARTAXO, W.V., *Considerações gerais sobre o pinhão-manso (Jatropha curcas L.) e a necessidade urgente de pesquisas, desenvolvimento e inovações tecnológicas para esta planta nas condições brasileiras*. 3º CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANTAS OLEAGINOSAS, ÓLEOS, GORDURAS E BIODIESEL, 3., 2006, Varginha. *Anais...* Varginha, 2006.

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.167-173, 1995.

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.

CORRÊA, P.C.; AFONSO JÚNIOR, P.C.; QUEIROZ, D.M.; SAMPAIO, C.P.; CARDOSO, J.B. Variação das dimensões características e da forma dos frutos de café durante o processo de secagem. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, n.3, p.466-470, 2002.

CORRÊA, P.C.; RIBEIRO, D.M.; RESENDE, O.; BOTELHO, F. M. Determinação e modelagem das propriedades físicas e da contração volumétrica do trigo durante a secagem. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, n.3, p.665-670, 2006.

COUTO, S.M.; MAGALHÃES, A.C.; QUEIROZ, D.M.; BASTOS, I.T. Massa específica aparente e real e porosidade de grãos de café em função do teor de umidade. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.3, n.1, p.61-68, 1999.

DIAS, L.F.L., *Avaliação de algumas propriedades físicas de grãos de café (Coffea arabica) orgânico e convencional*. 2007. 44f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon-PR.

GINER, S.A.; MASCHERONI, R.H. Diffusive drying kinetics in wheat, Part 2: applying the simplified analytical solution to experimental data. *Postharvest Technology*, v.81, n.1, p.85-97, 2002.

GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; MAGALHÃES, F.E.A.; BAPTESTINI, F.M. Contração volumétrica e forma dos frutos de mamona durante a secagem. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v.33, n.1, p.1-8, 2011.

KHRAISHEH, M. A. M.; MCMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Quality and structural changes in starchy foods during microwave and convective drying. *Food Research International*, v.34, n.5, p.497-503, 2004.

KOÇ, B.; EREN, I.; ERTEKIN F. K. Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method. *Journal of Food Engineering*, v.85, n.3, 340-349, 2008.

KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B. Effect of drying method on shrinkage and porosity. *Drying Technology*, v.15, n.10, p.2441-2458, 1997.

LANG, W.; SOKHANSANJ, S. Bulk volume shrinkage during drying of wheat and canola. *Journal of Food Process Engineering*, Trumbull, v.16, n.4, p.305-314, 1993.

MATA, M.E.R.M.C.; DUARTE, M.E.M. Porosidade intergranular de produtos agrícolas. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v.4, n.1, p.79-93, 2002.

MAYOR, L.; SERENO, A. M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, v.61, n.3, p.373-386, 2004.

MCMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Physical characteristics of dehydrated potatoes – part I. *Journal of Food Engineering*, v.33, n.1-2, p.37-48, 1997.

NUNES, L. F. *Caracterização de frutos, sementes e plântulas e cultivo de embriões de pinhão-mansão (Jatropha curcas L.)*. 2007, 78f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG.

NUNES, C. F.; SANTOS, D. N.; PASQUAL, M.; VALENTE, T. C. T., Morfologia externa de frutos, sementes e plântulas de pinhão-mansão. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.44, n.2, p.207-210, 2009.

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

RAMOS, I. N.; BRANDÃO, T. R. S.; SILVA, C. L. M. Structural changes during air drying of fruits and vegetables. *Food Science and Technology International*, v.9, n.3, p.201-206, 2003.

RAMOS, I. N.; BRANDÃO, T. R. S.; SILVA, C. L. M. Integrated approach on solar drying, pilot convective drying and microstructural changes. *Journal of Food Engineering*, v.67, n.1, p.195-203, 2005.

RATTI, C., Shrinkage during drying of foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, v.23, n.1, p.91-105, 1994.

RESENDE, O. *Variação das propriedades físicas e mecânicas e da qualidade do feijão (phaseolus vulgaris L.) durante a secagem e o armazenamento*. 2006. 186f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.

RESENDE, O.; ARCANJO, R. V.; SIQUEIRA, V. C.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática para a secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de concreto. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v.31, n.2, p.189-196, 2009.

RUFFATO, S.; CORRÊA, P. C.; MARTINS, J. H.; MANTOVANI, B. H. M.; SILVA, J. N. Influência do processo de secagem sobre a massa específica aparente, massa específica unitária e porosidade de milho-pipoca. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.3, n.1, p.45-48, 1999.

SANTOS, S.B.; MARTINS, M.A.; CARVALHO, F.M.; CARNEIRO, A.C.O. *Determinação de algumas propriedades físicas dos grãos de pinhão manso (Jatropha curcas L.)* In: DI LEO, N.; MONTICO, S.; NARDÓN, G. *Avances en Ingeniería Rural: 2007 - 2009*. Rosario: UNR Editora, 2009, p.1067-1072.

SATURNINO, H.M.; PACHECO, D.D.; KAKIDA, J.; TOMINAGA, N.; GONÇALVES, N.P. Cultura do pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.). *Informe Agropecuário*, v.26, n.229, p.44-78, 2005.

SILVA, J. S. *Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas*, Viçosa: Aprenda Fácil, 2008. 559p.

SIRISOMBOON, P.; KITCHAIYA, P.; PHOLPHO, T.; MAHUTTANYAVANITCH, W. Physical and mechanical properties of *Jatropha curcas* L. fruits, nuts and kernels. *Biosystems engineering*, v. 97, n.2, p. 201-207, 2007.

ZOGZAS, N.P.; MAROULIS, Z.B.; KOURIS, D.M., Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air drying. *Drying Technology*, v.12, n.7, p.1653-1666, 1994.



## OBJETIVOS GERAIS

Considerando as vantagens da produção de biodiesel, a importância do processo de secagem, bem como o reflexo dessa etapa pós-colheita nas propriedades físicas dos grãos de pinhão-mansão, o presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de determinar as propriedades físicas e estudar o processo de secagem dos grãos de pinhão-mansão em diferentes condições de temperatura.

## PROPRIEDADES FÍSICAS DOS GRÃOS DE PINHÃO-MANSO AO LONGO DA SECAGEM EM DIFERENTES CONDIÇÕES

### RESUMO

Diante do destaque do pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) na produção de óleo no cenário nacional e internacional e da necessidade do desenvolvimento de maquinários que auxiliem no processamento pós-colheita dos grãos, determinar a porosidade intergranular e a massa de 1000 grãos, massas específicas aparente e unitária dos grãos de pinhão-manso submetidos à secagem em cinco condições de ar foi o principal objetivo deste trabalho. O experimento foi desenvolvido no Instituto Federal Goiano-*campus* Rio Verde, utilizando grãos de pinhão-manso, com teor de água de 0,50 (kg de água/kg de matéria seca), submetidos à secagem em estufa com circulação de ar forçada nas temperaturas de 45, 60, 75, 90 e 105 °C até atingirem o teor de água de  $0,10 \pm 0,005$  (kg de água/kg de matéria seca). Conclui-se que com a redução do teor de água há um decréscimo na porosidade, massa de 1000 grãos, massas específicas aparente e unitária dos grãos de pinhão-manso, não tendo sido possível identificar comportamento diferenciado com o aumento das temperaturas utilizadas.

Palavras chave: pós-colheita; *Jatropha curcas* L.; teor de água.

## PHYSICAL PROPERTIES OF JATROPHA GRAINS ALONG THE DRYING PROCESS UNDER DIFFERENT CONDITIONS

### ABSTRACT

Due to prominence of *Jatropha* (*Jatropha curcas* L.) in oil production nationally and internationally and the need for machinery development to assist in grains post-harvest processing, this work has a main goal to determine the intergranular porosity and the mass of 1.000 grains, apparent and unitary specific mass of *Jatropha* grains submitted to drying process under five air conditions. The experiment was carried out at Instituto Federal Goiano (Goiano Federal Institute), Rio Verde *Campus*, Goiás State, Brazil, using *Jatropha* grains with moisture content of 0.50 (water kg/dry matter kg) subjected to drying process in an oven with forced air circulation in temperatures of 45, 60, 75, 90, and 105°C until they reach the moisture content of  $0.10 \pm 0.005$  (water kg/dry matter kg). We conclude that with decreasing moisture content there is a decrease in

porosity, mass of 1.000 grains, and apparent and unitary specific mass of *Jatropha* grains. It was not possible to identify different behavior with the increase of used temperatures.

Key-words: post-harvest; *Jatropha curcas* L.; moisture content.

## INTRODUÇÃO

A crescente preocupação mundial com o meio ambiente, juntamente com a busca por fontes de energia renováveis, coloca o biodiesel no centro das atenções e interesses. Diversos países, entre eles o Brasil, procuram o domínio tecnológico desse biocombustível, tanto em nível agrônomo como industrial o que deverá provocar fortes impactos na economia brasileira e na política de inclusão social do país (Abdalla et al. 2008).

Entre as plantas que apresentam potencial para a produção de biodiesel, está o pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.). Segundo Arruda et al. (2004), o pinhão-manso é uma espécie oleaginosa que, por suas potencialidades, vem sendo considerada economicamente importante e tem como característica principal a resistência à seca, além da produção de óleo com todas as qualidades necessárias para ser transformado em biodiesel. Souza et al. (2009) observaram uma concentração média de  $40,33 \pm 1,91$  % de lipídeos na matéria seca de sementes de pinhão-manso. Outros atributos estão relacionados ao óleo, pois não é comestível, portanto, não concorre com a alimentação humana (Saturnino et al. 2005).

A maior parte do cultivo do pinhão-manso ainda é realizada em pequenas lavouras, em que os processos de colheita, secagem e armazenagem são feitos com reduzidos recursos tecnológicos. No entanto, com o advento do biodiesel, novas tecnologias deverão ser adotadas para atender as necessidades de uma produção em larga escala (Santos et al. 2009). Segundo Goneli et al. (2011), informações a respeito do tamanho, volume, porosidade e massa específica, entre outras características físicas dos produtos agrícolas, são consideradas de grande importância para estudos que envolvem transferência de calor e massa e movimentação de ar em massas granulares. Sendo assim, para o desenvolvimento dos maquinários utilizados nas etapas de colheita e pós-colheita, são de fundamental importância a determinação e o conhecimento do comportamento das propriedades físicas dos grãos de pinhão-manso.

Segundo Resende et al. (2005), a redução do teor de água dos grãos, além de provocar seu encolhimento, influencia diretamente nas suas propriedades físicas durante o processo de secagem. Cada produto apresenta características particulares de geometria e composição química, fazendo com que se comporte de forma diferente durante o processo de secagem. Logo, informações teóricas a respeito desta singularidade são de suma importância para auxiliar no desenvolvimento de equipamentos e adaptações daqueles já existentes, visando a obter maior rendimento nesta etapa fundamental durante o período pós-colheita.

A necessidade de se conhecer o volume de ar no interior de um silo contendo grãos pode ser relacionada aos cálculos da concentração de fumigantes ou da quantidade de ar necessária para completa troca de ar dentro do silo. Aliada a isso, a porosidade está associada à resistência que a camada de grãos oferece à movimentação do ar, sendo largamente utilizada nos projetos de equipamentos para secagem e armazenamento de grãos (Silva 2008).

A massa de mil sementes é utilizada para calcular a densidade de semeadura, o número de sementes por embalagem e a massa da amostra de trabalho para análise de pureza, quando não especificado nas Regras para Análises de Sementes - RAS (Brasil, 2009).

Segundo Silva (2008), a aplicação do conceito de massa específica aparente é importante para a comercialização, dimensionamento de silos, secadores, depósitos e sistemas de transportes, podendo também ser utilizado para determinar teores de água e danos causados por insetos nos produtos armazenados.

Considerando as vantagens da produção de biodiesel, a importância do processo de secagem, bem como o reflexo dessa etapa pós-colheita nas propriedades físicas dos produtos agrícolas, realizou-se o presente trabalho com o objetivo de avaliar a porosidade intergranular, a massa de 1000 grãos e as massas específicas aparente e unitária dos grãos de pinhão-mansão, submetidos à secagem em cinco condições de temperatura.

## 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* (IF Goiano – *Campus Rio Verde*).

Os frutos de pinhão-mansó foram colhidos manualmente no município de Porangatu, GO. Posteriormente, procedeu-se ao beneficiamento manual dos grãos. Os grãos de pinhão-mansó, com teor de água inicial de 0,50 (kg de água/kg de matéria seca), foram submetidos à secagem em estufa com ventilação de ar forçada em cinco condições de temperatura: 45, 60, 75, 90 e 105 °C, que promoveram as umidades relativas de 15,6; 7,4; 4,0; 1,8 e 1,2%, respectivamente. Os grãos foram mantidos na estufa até atingirem o teor de água (Ta) de  $0,10 \pm 0,005$  (kg de água/kg de matéria seca) determinado em estufa a  $105 \pm 1^\circ\text{C}$ , durante 24 horas, em três repetições (Brasil 2009).

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

A massa específica aparente dos grãos de pinhão-mansó, expressa em  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , foi obtida utilizando-se uma balança eletrônica com resolução de 0,001 g e um recipiente com capacidade de 0,252 L, em três repetições para cada teor de água.

A massa específica unitária dos grãos, expressa em  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , foi determinada por meio da relação entre a massa de um grão e o volume ocupado por ele. A obtenção do volume de um grão foi feita por meio da Equação 1, proposta por Mohsenin (1986). A determinação do comprimento, largura e espessura dos grãos foi feita com o auxílio de um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm, quando eles se encontravam com os teores de água de 0,50; 0,40; 0,34; 0,27; 0,21; 0,15 e 0,10, aproximadamente.

$$V_g = \frac{\pi \cdot A \cdot B \cdot C}{6} \quad (1)$$

em que:

A: comprimento do grão em mm;

B: largura do grão em mm; e

C: espessura do grão em mm.

As dimensões características dos eixos ortogonais dos grãos de pinhão-mansó, foram determinadas conforme ilustrado na Figura 1.

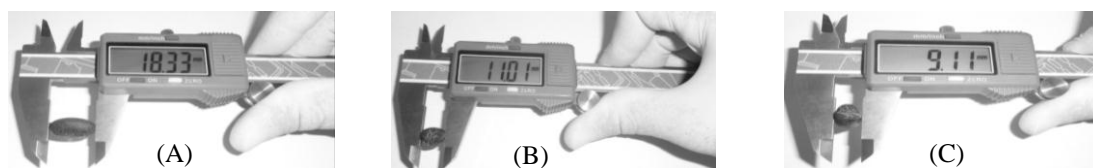


Figura 1. Ilustração da determinação das dimensões características do grão de pinhão-mansó, considerado esferoide. (A) comprimento, (B) largura e (C) espessura.

A porosidade intergranular do pinhão-mansô foi estimada indiretamente por meio da expressão descrita por Mohsenin (1986):

$$\varepsilon = \left[ 1 - \left( \frac{\rho_a}{\rho_u} \right) \right] \cdot 100 \quad (2)$$

em que:

$\varepsilon$  = porosidade em %;

$\rho_a$  = massa específica aparente em  $\text{kg.m}^{-3}$ ; e

$\rho_u$  = massa específica unitária em  $\text{kg.m}^{-3}$ .

A massa de 1000 grãos ( $m_{1000g}$ ) foi determinada de acordo com a pesagem de 8 repetições de 100 grãos, sendo posteriormente ajustadas para 1000 (Brasil, 2009). Estas determinações foram realizadas para cada teor de água ao longo da secagem, utilizando-se uma balança eletrônica com resolução de 0,001 g, sendo os resultados expressos em kg.

O experimento foi montado em esquema fatorial, tendo como fatores as diferentes temperaturas e os teores de água, em delineamento inteiramente casualizado. Os dados foram analisados por meio de análise de variância e regressão, sendo os modelos selecionados de acordo com o coeficiente de determinação e pela significância da equação pelo teste F, com o auxílio do programa aplicativo SISVAR 5.3, segundo Ferreira (2008). Aliado a essas análises estatísticas, empregou-se o teste do erro médio relativo (P) para validar o modelo empregado.

O erro médio relativo foi calculado conforme a seguinte expressão:

$$P = \frac{100}{N} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (3)$$

em que:

Y : valor observado experimentalmente;

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

N: número de observações experimentais;

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 estão apresentados os valores do teor de água dos grãos de pinhão-manso submetidos a diferentes condições de secagem.

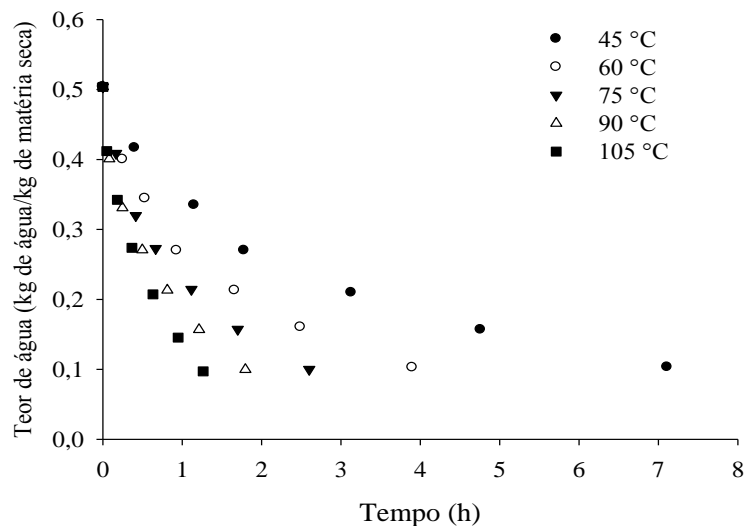


Figura 2. Teores de água dos grãos de pinhão-manso ao longo do tempo de secagem para diversas temperaturas.

Verifica-se, na Figura 2, que o tempo necessário para que os grãos de pinhão-manso atingissem o teor de água de  $0,10 \pm 0,005$  (kg de água/kg de matéria seca) foi de 1,26; 1,79; 2,60; 3,90 e 7,11 h para as temperaturas de secagem de 105, 90, 75, 60 e 45 °C, respectivamente. Logo, o aumento da temperatura promove a redução no tempo de secagem dos grãos de pinhão-manso, evidenciando o aumento da taxa de secagem, fato observado por diversos pesquisadores para inúmeros produtos agrícolas (Lahsasni et al. 2004; Mohapatra & Rao 2005; Resende et al. 2008a; Sirisomboon & Kitchaiya 2009; Ullmann et al. 2010).

Ainda na Figura 2 observa-se que com o passar do tempo a redução do teor de água ocorre mais lentamente. Com o decorrer do processo de secagem, a taxa de redução de água diminui, pois a água se encontra fortemente ligada, necessitando de maior energia para sua evaporação.

A massa específica aparente dos grãos de pinhão-manso submetidos à secagem em diferentes condições de ar é apresentada na Figura 3. Verifica-se que a redução do teor de água diminui a massa específica aparente dos grãos, sendo uma redução de 80,6; 73,0; 67,0; 70,1 e 78,8  $\text{kg.m}^{-3}$  para as temperaturas de 45, 60, 75, 90 e 105 °C, respectivamente. Logo, a massa específica aparente sofre maior influência do teor de

água, uma vez que não é possível identificar um comportamento diferenciado com o aumento das temperaturas utilizadas.

Garnayak et al. (2008), trabalhando com o método de reumedecimento de sementes, encontraram valores de massa específica aparente variando de 492 a 419  $\text{kg.m}^{-3}$  para grãos de pinhão-manso com teor de água entre 4,75 e 19,57 (% b.u.). Comportamento inverso ao observado no presente trabalho, em que a massa específica diminui com a redução do teor de água. Logo, é possível afirmar que, além do teor de água, o processo ao qual os grãos são submetidos exerce grande influência na massa específica aparente. Neste caso, observa-se que o comportamento foi diferente devido à contração dos poros capilares dos grãos durante a secagem e, quando estes são submetidos ao processo de reumedecimento, não alcançam a sua forma e o seu volume original, mesmo apresentando teores de água equivalentes.

A redução da massa específica com o processo de secagem vem sendo observada para a maioria dos produtos agrícolas pesquisados por Couto et al. (1999), Afonso Júnior et al. (2000), Ribeiro et al. (2005), Razavi et al. (2007) e Resende et al. (2008b), entre outros autores.

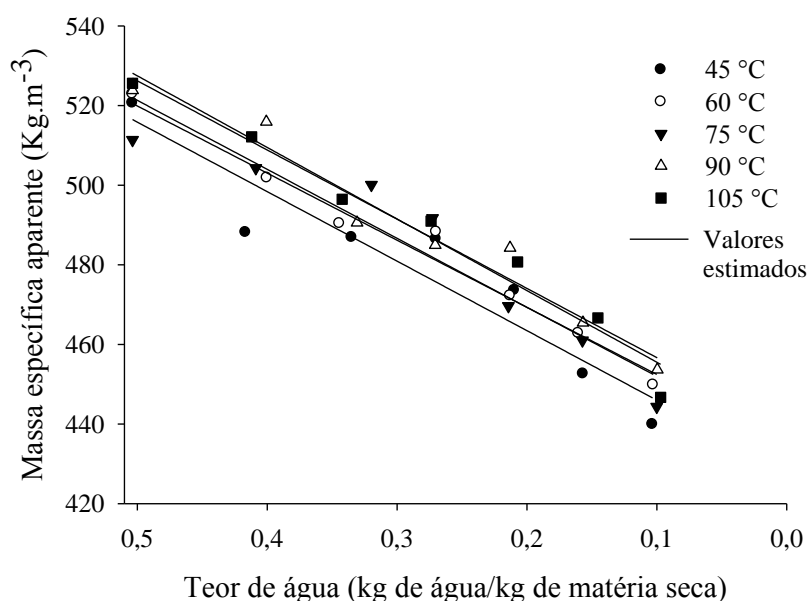


Figura 3. Massa específica aparente dos grãos de pinhão-manso submetidos à secagem em cinco condições de ar.

Na Figura 4 estão apresentados os valores de massa específica unitária dos grãos de pinhão-manso submetidos à secagem em cinco condições de temperatura. Observa-se que a massa específica unitária se reduziu de 1001,7; 1011,3; 995,9; 1004,5 e 993,7 para 792,5; 817,0; 808,0; 814,6 e 794,9  $\text{kg.m}^{-3}$  nas temperaturas de 45, 60, 75,



90 e 105 °C, respectivamente. Comportamento semelhante ao observado na massa específica aparente (Figura 3).

Goneli (2008), trabalhando com grãos de mamona, espécie da mesma família do pinhão-mansinho, também observou redução da massa específica unitária ao longo do processo de secagem. O pesquisador destaca que, pelo efeito combinado entre a presença de espaços vazios no interior do grão e a reduzida contração de suas dimensões, o volume dos grãos permanece praticamente constante, enquanto ocorre redução de sua massa durante a secagem. Esses resultados evidenciam que o encolhimento dos grãos de mamona e pinhão-mansinho não acompanha a redução de suas massas com a secagem. Resultados semelhantes foram observados para grãos de feijão (Resende et al. 2008b), castanhas e grãos de pistachio (Razavi et al. 2007), grãos de soja (Ribeiro et al. 2005), arroz em casca (Reddy & Chakraverty 2004), sementes de abóbora (Paksoy & Aydin 2004), café com pergaminho (Pérez-Alegría et al. 2001; Chandrasekar & Viswanathan 1999) e frutos de café (Couto et al. 1999), entre outros produtos.

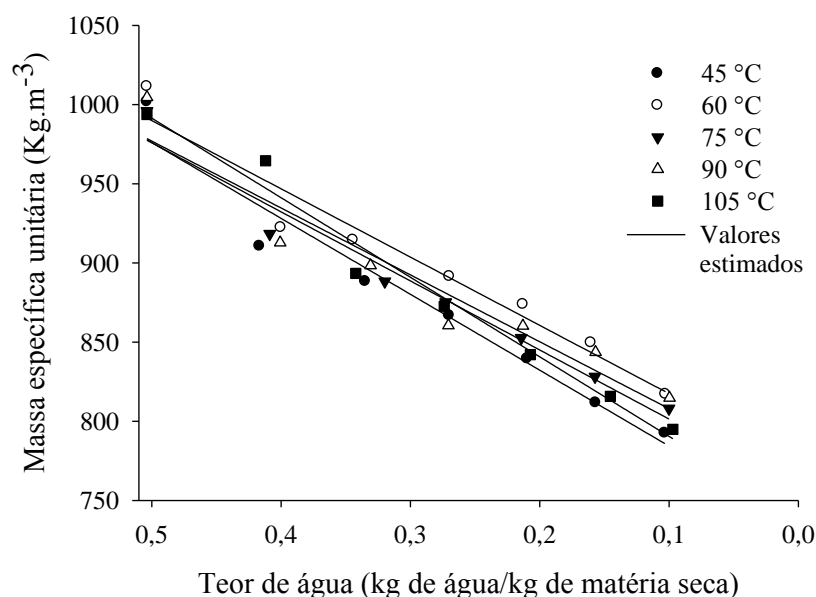


Figura 4. Massa específica unitária dos grãos de pinhão-mansinho ao longo da secagem em diversas temperaturas.

A porosidade dos grãos de pinhão-mansinho submetidos à secagem em diferentes condições de ar é apresentada na Figura 5. Optou-se pela utilização dos valores médios, uma vez que não houve interação entre os fatores temperatura e teor de água e por não ser possível a representação da porosidade em cada condição de secagem por meio de regressão.

Verifica-se na Figura 5 que a porosidade variou de 48,38 a 44,48% para a faixa de teor de água estudada. Estes valores estão próximos aos observados para outros produtos agrícolas como milho-pipoca (Rufatto et al. 1999), café (Couto et al. 1999), soja (Ribeiro et al. 2005) e mamona (Goneli 2008). Os valores médios estão abaixo dos obtidos por Sirisomboon et al. (2007), que, trabalhando com grãos de pinhão-manso, encontraram uma porosidade de 56,73% para o teor de água de 25,42% b.u. As divergências nos valores de porosidade podem estar relacionadas com a diversidade genética das variedades dos grãos e o manejo adotado durante o cultivo da planta e/ou o processo de secagem.

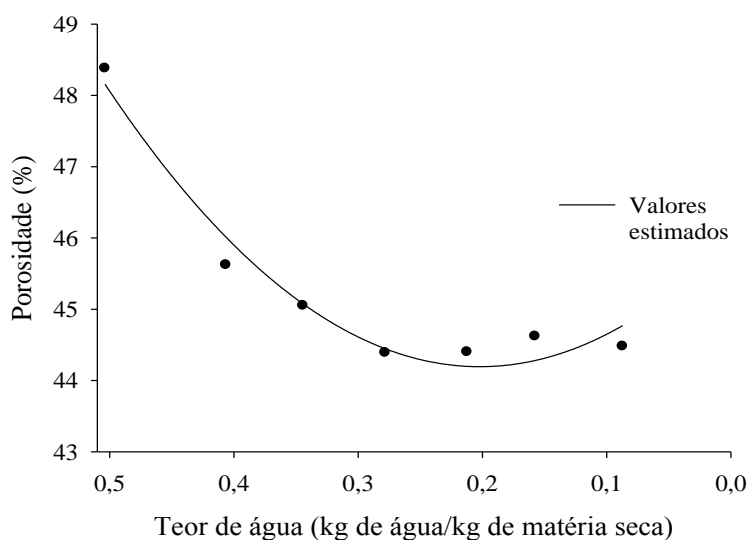


Figura 5. Valores médios da porosidade dos grãos de pinhão-manso submetidos à secagem em cinco condições de temperatura.

Garnayak et al. (2008) encontraram valores de porosidade dos grãos de pinhão-manso variando de 27,54 a 45,37% à medida que o teor de água variava de 4,75 para 19,37% b.u. Sirisomboon & Kitchaiya (2009) verificaram que a porosidade dos grãos de pinhão-manso foi 46; 59,31 e 57,93%, quando submetidos à secagem nas temperaturas de 80, 60 e 40 °C, respectivamente. Logo, fica explícita a influência do teor de água sobre a porosidade intergranular de pinhão-manso, pois com o processo de secagem há uma redução na porosidade dos grãos. No entanto, assim como os resultados obtidos por Sirisomboon & Kitchaiya (2009), não foi possível observar uma tendência de comportamento da porosidade com o aumento da temperatura de secagem.

A relação entre a porosidade e o teor de água dos grãos de pinhão-manso (Equação 3), determinada por meio de análise de regressão, pode ser descrita pela seguinte expressão:

$$\varepsilon = 43,55Ta^2 - 17,60Ta + 45,97 \quad (3)$$

O modelo quadrático utilizado para a representação da porosidade em função do teor de água foi satisfatório, apresentando valor de  $R^2$  igual a 96,4% e regressão significativa ao nível de 1%, pelo teste F. O valor do erro médio relativo (P) obtido para avaliação da porosidade dos grãos de pinhão-manso foi de 0,45%, representando satisfatoriamente o fenômeno, uma vez que valores de erro médio relativo inferiores a 10% são recomendados para a seleção de modelos (Mohapatra & Rao 2005).

Corrêa et al. (2003), trabalhando com grãos de milho, alpiste e painço, também observaram comportamento quadrático para a porosidade destes produtos ao longo do processo de secagem.

Na Figura 6, estão apresentados os valores da massa de 1000 grãos para o pinhão-manso ao longo da secagem em diferentes condições de ar.

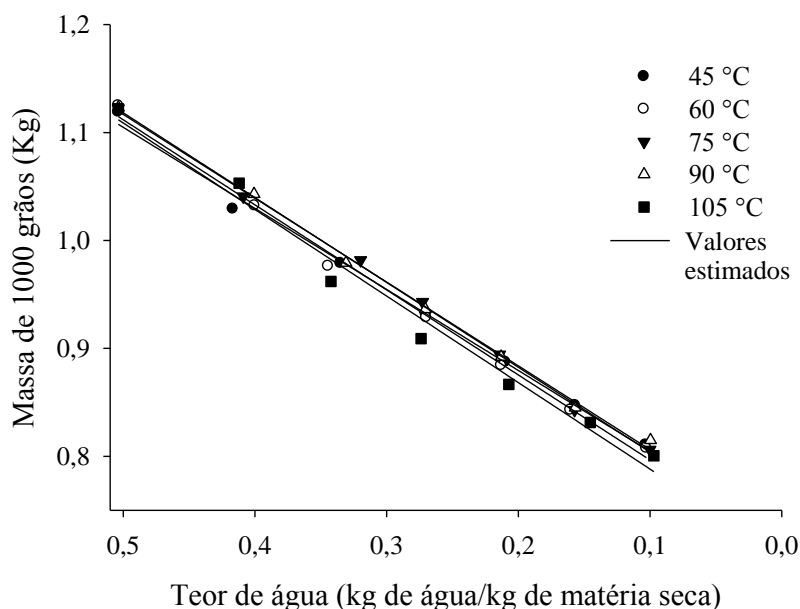


Figura 6. Massa de 1000 grãos de pinhão-manso submetidos à secagem em cinco condições de ar.

Nota-se, na Figura 6, redução da massa de 1000 grãos com a redução do teor de água, independentemente da condição de secagem. Analisando os resultados, verifica-se que, com a redução do teor de água de 0,50 para  $0,10 \pm 0,005$  (kg de água/kg de matéria seca), a massa de 1000 grãos de pinhão-manso variou de 1,119 para 1,124; de 1,122 para 1,123; de 1,122 para 0,810; de 1,123 para 0,814 e de 1,122 para 0,800g, para as temperaturas de 45, 60, 75, 90 e 105 °C, respectivamente. Logo, não é possível identificar a influência da temperatura do ar de secagem na massa de mil grãos de pinhão-manso, indicando que a perda de massa não teve outra fonte além da redução do

teor de água durante a secagem do produto. A redução da massa de mil sementes com o processo de secagem foi observada para lentilha (Amin et al. 2004), milho pipoca (Karababa 2006) e colza (Çalişir et al. 2005).

Na Tabela 1, são apresentados os modelos ajustados aos dados experimentais da massa de 1000 grãos e massas específicas aparente e unitária dos grãos de pinhão-manso ao longo da redução do teor de água em diversas condições de secagem. Verifica-se que os modelos apresentaram alto grau de significância de acordo com o teste F e coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superiores a 89,6%, e que todos os modelos ajustados apresentaram valores de erro médio relativo inferiores a 10%. Assim, descrevem de forma satisfatória o comportamento das variáveis analisadas em função do teor de água.

Tabela 1. Equações ajustadas aos valores da massa de 1000 grãos e massas específicas aparente e unitária dos grãos de pinhão-manso em função do teor de água.

T (°C)	Massa específica aparente		
	Modelo	$R^2$	P (%)
45	$\rho_a = 174,6Ta + 428,5$	89,6**	1,39
60	$\rho_a = 173,2Ta + 434,6$	97,9**	0,52
75	$\rho_a = 168,6Ta + 435,5$	90,2**	1,22
90	$\rho_a = 173,8Ta + 439,3$	95,4**	0,86
105	$\rho_a = 179,8Ta + 437,5$	96,6**	0,81
T (°C)	Massa específica unitária		
	Modelo	$R^2$	P (%)
45	$\rho_u = 479,2Ta + 736,4$	95,4**	1,06
60	$\rho_u = 431,0Ta + 774,3$	95,0**	1,06
75	$\rho_u = 436,1Ta + 757,8$	96,6**	0,88
90	$\rho_u = 422,3Ta + 765,7$	92,1**	1,55
105	$\rho_u = 502,3Ta + 740,2$	97,8**	0,84
T (°C)	Massa de 1000 grãos		
	Modelo	$R^2$	P (%)
45	$m_{1000g} = 0,751Ta + 0,729$	99,5**	0,43
60	$m_{1000g} = 0,788Ta + 0,717$	99,5**	0,56
75	$m_{1000g} = 0,786Ta + 0,725$	99,8**	0,36
90	$m_{1000g} = 0,776Ta + 0,728$	99,7**	0,49
105	$m_{1000g} = 0,801Ta + 0,708$	98,3**	1,43

\*\* Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste F.

O ajuste dos modelos linear e quadrático às propriedades físicas dos produtos agrícolas vem sendo utilizado por diversos pesquisadores como Demir et al. (2002), Baryeh & Mangope (2002), Abalone et al. (2004), Çalişir et al. (2005), Nimkar et al. (2005) e Pradhan et al. (2009), entre outros.

## CONCLUSÕES

Diante do exposto, conclui-se que, com a redução do teor de água, há um decréscimo na porosidade, na massa de 1000 grãos e nas massas específicas aparente e unitária dos grãos de pinhão-manso e que não é possível identificar um comportamento diferenciado com o aumento das temperaturas estudadas.

## REFERÊNCIAS

ABALONE, R.; CASSINERA, A.; GASTÓN, A.; LARA, M.A. Some Physical Properties of Amaranth Seeds. *Biosystems Engineering*, v.89, n.1, p.109-117, 2004.

ABDALLA, A.L.; SILVA FILHO, J.C.; GODOI, A.R.; CARMO, C.A.; EDUARDO, J.L.P. Utilização de subprodutos da indústria de biodiesel na alimentação de ruminantes. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v.37, n. Especial, p.260-258, 2008.

AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C.; ANDRADE, E. T. Análise da variação das propriedades físicas e contração volumétrica dos grãos de milho (*Pennisetum glaucum*) durante o processo de dessecamento. *Revista Brasileira de Armazenamento*, v. 25, n. 1, p. 15-21, 2000.

AMIN, M.N.; HOSSAIN, M.A.; ROY, K.C. Effects of moisture content on some physical properties of lentil seeds. *Journal of Food Engineering*, v.65, n.1, p.83-87, 2004.

ARRUDA, F. P. DE.; BELTRÃO, N. E. DE M.; ANDRADE, A. P. DE A.; PEREIRA, W. E.; SEVERINO, L. S. Cultivo de pinhão manso (*Jatropha curcas* L.) como alternativa para o semiárido nordestino. *Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas*, v.8, n.1, p.789-799, 2004.

BARYEH, E.A.; MANGOPE, B.K. Some physical properties of QP-38 variety pigeon pea. *Journal of Food Engineering*, v.56, n1, p.59-65, 2002.

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

ÇALIŞIR, S.; MARAKOĞLU, T.; ÖĞÜT, H.; ÖZTÜRK, O. Physical properties of rapeseed (*Brassica napus oleifera* L.). *Journal of Food Engineering*, v.69, n.1, p.61-66, 2005.

CHANDRASEKAR, V.; VISWANATHAN, R. Physical and thermal properties of coffee. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v.73, p.227-234, 1999.

CORRÊA, P.C.; AFONSO JÚNIOR, P.C.; ANDRADE, E.T.; SILVA, F.S. Determinação das propriedades físicas da massa granular de milho, alpiste e painço. *Revista Brasileira de Armazenamento*, v.28, n.2 p.46-50, 2003.

COUTO, S. M.; MAGALHÃES, A. C.; QUEIROZ, D. M.; BASTOS, I. T. Massa específica aparente e real e porosidade de grãos de café em função do teor de umidade. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.3, n.1, p.61-68, 1999.

DEMIR, F.; DOĞAN, H.; ÖZCAN M.; HACISEFEROĞULLARI, H. Nutritional and physical properties of hackberry (*Celtis australis* L.). *Journal of Food Engineering*, v.54, n.3, p.241-247, 2002.

FERREIRA, D.F. SISVAR: Um programa para análises estatísticas e ensino de estatística. *Revista Symposium*, v.6, n.2, p.36-41, 2008.

GARNAYAK, D.K.; PRADHAN, R.C.; NAIK, S.N.; BHATNAGAR N. Moisture-dependent physical properties of Jatropha seed (*Jatropha curcas* L.). *Industrial crops and products*, v.27, n.1, p.123-129, 2008.

GONELI, A.L.D. *Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade de mamona (Ricinus communis L.) durante a secagem e o armazenamento*. 2008. 186 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.

GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; MAGALHÃES, F.E.A.; BAPTESTINI, F.M. Contração volumétrica e forma dos frutos de mamona durante a secagem. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v.33, n.1, p.1-8, 2011.

KARABABA, E. Physical properties of popcorn kernels. *Journal of Food Engineering*, v.72, n.1, p.100-107, 2006.

LAHSASNI, S.; KOUHILA, M.; MAHROUZ, M.; JAOUHARI, J.T. Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). *Journal of Food Engineering*, v.2, n.61, p.173-179, 2004.

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.

MOHSENIN, N.N. *Physical properties of plant and animal materials*. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841p.

NIMKAR, P.M.; MANDWE, D.S.; DUDHE, R.M. Physical Properties of Moth Gram. *Biosystems Engineering*, v.91, n.2, p.183-189, 2005.

PAKSOY, M.; AYDIN, C. Some physical properties of edible squash (*Cucurbita pepo* L.) seeds. *Journal of Food Engineering*, v.65, n.2, p.225-231, 2004.

PÉREZ-ALEGRÍA, L.R.; CIRO V., H.J.; ABUD, L.C. Physical and thermal properties of parchment coffee bean. *Transactions of the ASAE*, v.44, n.6, p.1721-1726, 2001.

PRADHAN, R.C.; NAIK, S.N.; BHATNAGAR, N.; VIJAY V.K. Moisture-dependent physical properties of jatropha fruit. *Industrial crops and products*, v.29, n.3, p.341-347. 2009.

RAZAVI, S.M.A.; RAFE, A.; MOGHADDAM, T.M.; AMINI, A.M. The physical properties of pistachio nut and kernel as a function of moisture content and variety: Part II. Gravimetric properties. *Journal of Food Engineering*, v.81, n.1, p.218-225, 2007.

REDDY, B.S.; CHAKRAVERTY, A. Physical properties of raw and parboiled paddy. *Biosystems Engineering*, v.88, n.4, p.461-466, 2004.

RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; CECON, P.R. Forma, tamanho e contração volumétrica do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) Durante a secagem. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v.7, n.1, p.15-24, 2005.

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, 2008a.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; RIBEIRO, D. M. Propriedades físicas do feijão durante a secagem: determinação e modelagem. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 32, n. 1, p. 225-230, 2008b.

RESENDE, O.; ARCANJO, R. V.; SIQUEIRA, V. C.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática para a secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de concreto. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v.31, n.2, p.189-196, 2009.

RIBEIRO, D. M.; CORRÊA, P. C.; RODRIGUES, D. H.; GONELI, A. L. D. Análise da variação das propriedades físicas dos grãos de soja durante o processo de secagem. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, n. 25, v.3, p.611-617, 2005.

RUFFATO, S.; CORRÊA, P. C.; MARTINS, J. H.; MANTOVANI, B. H. M.; SILVA, J. N. Influência do processo de secagem sobre a massa específica aparente, massa específica unitária e porosidade de milho-pipoca. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.3, n.1, p.45-48, 1999.

SANTOS, S.B.; MARTINS, M.A.; CARVALHO, F.M.; CARNEIRO, A.C.O. *Determinação de algumas propriedades físicas dos grãos de pinhão manso (Jatropha curcas L.)* In: DI LEO, N.; MONTICO, S.; NARDÓN, G. *Avances en Ingeniería Rural: 2007 - 2009*. Rosario: UNR Editora, 2009, p.1067-1072.

SATURNINO, H.M; KAKIDA, D.D.P.J.; TOMINAGA, N.; GONÇALVES, N.P. Cultura do pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.). *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v.26, n.229, p.44-78, 2005.

SILVA, J. S. *Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas*, Viçosa: Aprenda Fácil, 2008. 559p.

SIRISOMBOON, P.; KITCHAIYA, P.; PHOLPHO, T.; MAHUTTANYAVANITCH, W. Physical and mechanical properties of *Jatropha curcas* L. fruits, nuts and kernels. *Biosystems engineering*, v. 97, n.2, p. 201-207, 2007.

SIRISOMBOON, P.; KITCHAIYA, P. Physical properties of *Jatropha curcas* L. kernels after heat treatments. *Biosystems engineering*, v. 102, n.2, p. 244-250, 2009.



SOUZA, A.D.V.; FÁVARO, S.P.; ÍTAVO, L.C.V.; ROSCOE, R. Caracterização química de sementes e tortas de pinhão-manso, nabo-forrageiro e crambe. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.44, n.10, p.1328-1335, 2009.

ULLMANN, R.; RESENDE, O.; SALES, J.F.; CHAVES, T.H. Qualidade das sementes de pinhão manso submetidas à secagem artificial. *Revista Ciência Agronômica*, v.41, n.3, p.442-447, 2010.

FORMA E TAMANHO DOS GRÃOS DE PINHÃO-MANSO (*Jatropha curcas* L.)  
DURANTE A SECAGEM EM DIVERSAS TEMPERATURAS

Resumo: Objetivou-se com o presente trabalho estudar as propriedades físicas dos grãos de pinhão-manso ao longo da secagem em cinco condições de ar, por meio da circularidade, esfericidade, volume, área superficial, área projetada e relação superfície-volume. 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 grãos de pinhão-manso, colhidos manualmente, com teor de água de 0,61 (kg de água/kg de matéria seca), aproximadamente. Os grãos foram submetidos à secagem em camada fina, em estufa com circulação de ar forçada nas seis condições de temperatura de 36, 45, 60, 75, 90 e 105 °C e umidades relativas de 31,7; 19,6; 9,4; 4,8; 2,6 e 1,5 %, respectivamente, até atingirem o teor de água de  $0,11 \pm 0,006$  (kg de água/kg de matéria seca). Conclui-se que a redução do teor de água e as condições de secagem promovem alterações na forma e diminuem o tamanho dos grãos de pinhão-manso.

Termos para indexação: propriedades físicas, teor de água, circularidade, esfericidade.

FORM AND SIZE OF THE JATROPHA (*Jatropha curcas* L.) BEANS DURING  
DRYING AT SEVERAL TEMPERATURES

This research was carried out in order to study the physical properties of the jatropha beans over the drying under five air conditions, through roundness, sphericity, volume, superficial area, projected area and surface-volume relationship. The experiment was conducted in Laboratório de Pós-Colheita de Produtos Vegetais pertaining to the Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Rio Verde *Campus*. The jatropha beans with moisture content around 0.61 (kg water / kg dry matter) were manually harvested. The beans were subjected to thin-layer drying in oven with forced-air circulation under five temperature conditions (36, 45, 60, 75, 90 and 105°C) and relative humidity of 31.7; 19.6; 9.4; 4.8; 2.6 and 1.5% respectively, until reaching the moisture content of  $0.11 \pm 0.006$  (kg water / kg dry matter). According to the results, it follows that the reduction of the moisture content as well as the drying conditions rather promote alterations in the form besides reducing the size of the jatropha grains.

Index terms: physical properties, moisture content, roundness, esfericity.

## INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a sociedade, de forma geral, tem buscado a utilização de combustíveis alternativos ao petróleo, como o biodiesel, por ser uma fonte renovável e promover menor impacto ao meio ambiente. Aliado a isso, sabe-se que as fontes de petróleo são limitadas e têm previsão de esgotamento no futuro.

Entre as plantas que apresentam potencial para a produção de biodiesel, está o pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.). Segundo Santos et al. (2009), o óleo produzido dos grãos de pinhão-manso apresenta todas as qualidades necessárias para ser transformado em óleo diesel. O autor também destaca a ampla distribuição geográfica da planta, pois o pinhão-manso se adapta a condições edafoclimáticas muito variáveis, devido à sua rusticidade, resistência a longas estiagens e a pragas e doenças. No entanto, assim como qualquer outra espécie vegetal, o material genético e o nível tecnológico adotado na condução da lavoura são extremamente importantes para uma boa produção.

A maior parte do cultivo do pinhão-manso ainda é realizada em pequenas lavouras, na quais os processos de colheita, secagem e armazenagem são feitos com reduzidos recursos tecnológicos. No entanto, com o advento do biodiesel, novas tecnologias deverão ser adotadas para atender as necessidades de uma produção em larga escala (Santos et al. 2009). Sendo assim, para o desenvolvimento dos maquinários utilizados nas etapas de colheita e pós-colheita, são de fundamental importância a determinação e o conhecimento do comportamento das propriedades físicas dos grãos de pinhão-manso.

Entre as etapas pós-colheita, a secagem assume uma enorme importância pois está relacionada diretamente com a qualidade final do produto, uma vez que visa à redução do teor de água até níveis seguros, dificultando e/ou inibindo o crescimento de microrganismos, reduzindo a proliferação dos insetos e a atividade metabólica do grão. Com a secagem, além de os produtos agrícolas sofrerem alterações na sua massa, eles sofrem mudanças também quanto à sua forma e tamanho. Levando em consideração que a extração do óleo dos grãos de pinhão-manso ocorre após a secagem, é imprescindível o conhecimento do comportamento físico dos grãos ao longo do processo de secagem.

Segundo Resende et al. (2005), a redução do teor de água dos grãos, além de provocar seu encolhimento, influencia diretamente nas suas propriedades físicas durante o processo de secagem. As propriedades físicas do fruto do pinhão-manso são essenciais para o desenho de equipamentos para colheita, secagem, limpeza, classificação,

descasque e armazenamento (Pradhan et al. 2009). Segundo Silva (2008), o conhecimento das propriedades físicas dos produtos agrícolas também é de extrema importância para a adaptação de equipamentos já existentes, visando a obter maior rendimento nas operações de processamento.

Os grãos e frutos, de modo geral, não apresentam um formato geométrico perfeitamente definido, tornando necessário, para a solução de problemas relacionados à sua geometria, assumir para o produto uma forma conhecida, o que acarreta em aproximações e possíveis erros (Corrêa et al. 2002).

O tamanho e a forma são características específicas de cada produto, definidas geneticamente, que podem ser influenciadas pelo ambiente durante e após o período de sua formação e que influencia as demais propriedades físicas do produto (Dias 2007). Esses dados são utilizados para o dimensionamento do tamanho e da forma dos crivos das peneiras em equipamentos destinados à separação e classificação (Silva 2008).

Segundo Sirisomboon et al. (2007), o tamanho (área superficial, área projetada e volume) e a forma (circularidade, esfericidade) dos frutos, nozes e sementes são importantes para o processo de descasque destes produtos. Esses dados podem ser usados para determinar o limite inferior de tamanho dos transportadores, como esteira, elevador de canecas e transportador helicoidal. A área superficial e a relação superfície-volume afetam a resistência à passagem do fluxo de ar através da camada de material, sendo relevante a geração de informações sobre estes produtos para a melhor descrição do processo de secagem.

Considerando as vantagens da produção de biodiesel, a importância do processo de secagem, bem como o reflexo dessa etapa pós-colheita nas propriedades físicas dos grãos, objetivou-se com o presente trabalho avaliar a forma e o tamanho dos grãos de pinhão-manso por meio da circularidade, esfericidade, volume, área superficial, área projetada e relação superfície-volume, ao longo da 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 (IFGoiano – *Campus* Rio Verde).

Os frutos de pinhão-mansó foram colhidos manualmente no município de Porangatu, GO. Posteriormente, procedeu-se ao beneficiamento manual dos grãos. Os grãos de pinhão-mansó, com teor de água inicial de 0,61 (kg de água/kg de matéria seca), foram submetidos à secagem em estufa com ventilação de ar forçada em seis condições de temperatura: 36, 45, 60, 75, 90 e 105 °C, as quais promoveram as umidades relativas de 31,7; 19,6; 9,4; 4,8; 2,6 e 1,5 %, respectivamente. Os grãos foram mantidos na estufa até atingirem o teor de água (Ta) de  $0,11 \pm 0,006$  (kg de água/kg de matéria seca) determinado em estufa a  $105 \pm 1^\circ\text{C}$ , durante 24 horas, em três repetições (Brasil 2009).

Foram utilizados 20 grãos de pinhão-mansó, individualizados em cápsulas de alumínio com dimensões de 60,12 mm de diâmetro e 41,0 mm de altura, e periodicamente os grãos foram medidos nas três posições (comprimento, largura e espessura) com o auxílio de um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm. A redução do teor de água foi acompanhada por meio da pesagem de três bandejas com 300 g de produto mantido nas mesmas condições de secagem, às quais os 20 grãos foram submetidos.

A forma dos grãos de pinhão-mansó, considerados esferóides, foi obtida por meio da esfericidade e circularidade de acordo com as dimensões características expressas pelos eixos ortogonais (Figura 1).

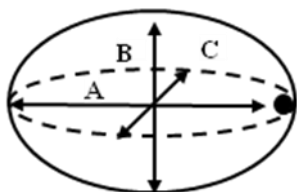


Figura 1. Desenho esquemático do grão de pinhão-mansó, considerado esferóide, com suas dimensões características.

A esfericidade ( $E_s$ ) foi determinada de acordo com a seguinte expressão (Moshenin, 1986):

$$E_s = \left[ \frac{(A \cdot B \cdot C)^{1/3}}{A} \right] \cdot 100 \quad (1)$$

em que:

A: maior eixo do grão em mm;

B: eixo médio do grão em mm; e

C: menor eixo do grão em mm.

A circularidade ( $C_c$ ) dos grãos de pinhão-manso na posição natural de repouso foi obtida utilizando-se a expressão proposta por Moshenin (1986):

$$C_c = \frac{B}{A} \cdot 100 \quad (2)$$

A área superficial ( $S$ ), em  $\text{mm}^2$ , foi calculada pela analogia a uma esfera de mesmo diâmetro geométrico médio, usando a seguinte expressão (Tunde-Akinntunde & Akintunde 2004):

$$S = \pi \cdot D_g \quad (3)$$

Sendo de acordo com Moshenin (1986):

$$D_g = (A \cdot B \cdot C)^{1/3} \quad (4)$$

em que:

$D_g$ : diâmetro geométrico médio em mm.

A área projetada ( $A_p$ ), em  $\text{mm}^2$ , dos grãos de pinhão-manso foi determinada pela seguinte expressão (Goneli 2008):

$$A_p = \frac{\pi AB}{4} \quad (5)$$

O volume de cada grão ( $V_g$ ) em  $\text{mm}^3$  foi obtido ao longo do processo de secagem de acordo com a expressão proposta por Moshenin (1986):

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

A relação superfície-volume ( $SV$ ) foi calculada por meio da expressão a seguir:

$$SV = \frac{S}{V_g} \quad (7)$$

O experimento foi montado em esquema fatorial, tendo como fatores as diferentes temperaturas e os teores de água. Os dados foram analisados por meio de análise de variância e regressão, sendo os modelos selecionados de acordo com o coeficiente de determinação e pela significância da equação pelo teste F, com o auxílio do programa aplicativo SISVAR 5.3, segundo Ferreira (2008). Aliado a essas análises estatísticas, empregou-se o teste do erro médio relativo (P) para validar o modelo empregado.

O erro médio relativo foi calculado conforme a seguinte expressão:

$$P = \frac{100}{N} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (8)$$

em que:

Y : valor observado experimentalmente;

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

N: número de observações experimentais.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 estão apresentados os valores do teor de água dos grãos de pinhão-manso submetidos a seis condições de temperatura de secagem.

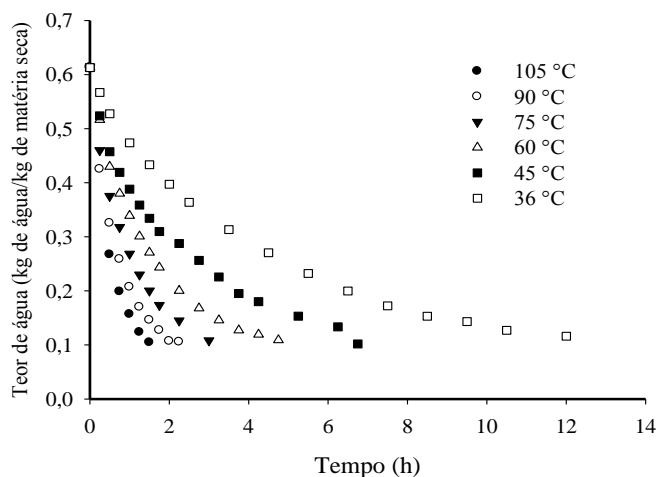


Figura 2. Teores de água dos grãos de pinhão-manso ao longo do tempo de secagem para diversas temperaturas.

Verifica-se na Figura 2 que o tempo necessário para que os grãos de pinhão-manso atingissem o teor de água de  $0,11 \pm 0,006$  (kg de água/kg de matéria seca) foi de 1,5; 2,25; 3,0; 4,75; 6,75 e 12,0 h para as temperaturas de secagem de 105, 90, 75, 60, 45 e 36 °C, respectivamente. Logo, o aumento da temperatura promove redução no tempo de secagem dos grãos de pinhão-manso, evidenciando o aumento da taxa de secagem, fato observado por diversos pesquisadores para inúmeros produtos agrícolas (Akpinar et al. 2003; Lahsasni et al. 2004; Mohapatra & Rao 2005; Resende et al. 2008; Sirisomboon & Kitchaiya 2009; Ullmann et al. 2010).

Na Figura 3 estão apresentados os valores da esfericidade dos grãos de pinhão-manso submetidos a seis condições de secagem.

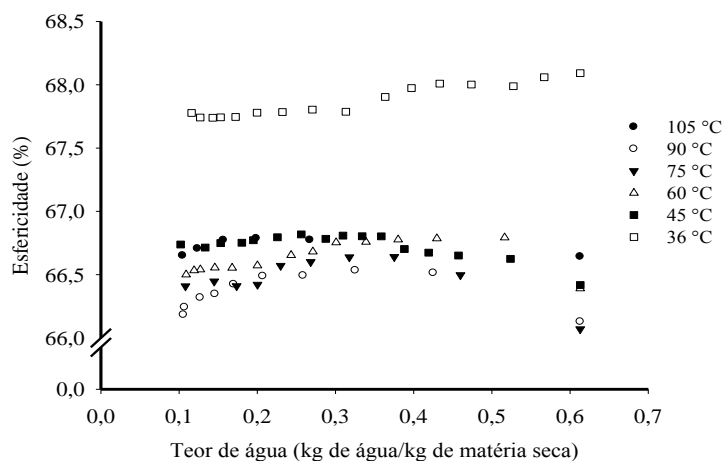


Figura 3. Esfericidade dos grãos de pinhão-manso em função do teor de água para diversas condições de secagem.

Verifica-se na Figura 3 que, no decorrer do processo de secagem, a esfericidade aumenta sensivelmente, seguida de uma leve redução para as temperaturas de 105, 90, 75, 60 e 45 °C. Corrêa et al. (2006), avaliando a esfericidade de grãos de trigo ao longo da secagem, observaram comportamento similar. No entanto, os grãos submetidos à secagem na temperatura de 36 °C apresentaram redução da esfericidade, possivelmente devido à baixa taxa de remoção de água nesta condição de secagem.

Ainda na Figura 3, nota-se que a esfericidade dos grãos de pinhão-manso está entre 66 e 68%. Resultados semelhantes foram relatados por Santos et al. (2009), uma vez que os grãos de pinhão-manso com teor de água de  $8,73 \pm 0,099$  % (b.u.) apresentaram uma esfericidade de 65%, e por Garnayak et al. (2008), em que a esfericidade dos grãos de pinhão-manso foi de 66 a 67 % para a faixa de teor de água de 4,75 a 19,57 % (b.u.).

Na Figura 4 estão apresentados os valores da circularidade (%) dos grãos de pinhão-manso ao longo da secagem em diversas temperaturas. Nota-se que, a contração do eixo médio em relação ao maior eixo não foi diretamente proporcional ao longo da redução do teor de água dos grãos, com exceção da temperatura de 36 °C, em que houve um leve decréscimo da circularidade. Assim, nas temperaturas de secagem de 105, 90, 75, 60 e 45 °C, a contração do maior eixo é menor em relação ao eixo médio. Resultados semelhantes foram observados por Resende et al. (2005), estudando a circularidade do feijão vermelho ao longo da secagem. Como a secagem dos grãos na temperatura de 36 °C ocorreu lentamente (12 h), isto promoveu uma contração proporcional do eixo médio em relação ao maior eixo, explicando o seu comportamento inverso em relação às demais temperaturas de secagem.



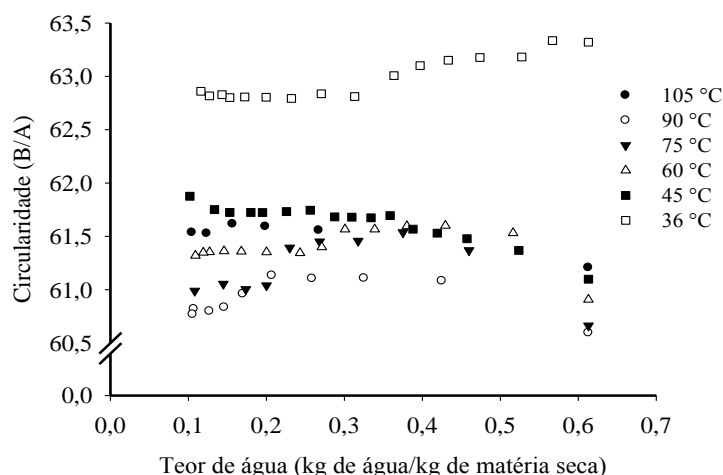


Figura 4. Circularidade dos grãos de pinhão-mansão submetidos a seis condições de secagem.

A relação comprimento-largura dos grãos de pinhão-mansão submetidos a diferentes condições de ar é apresentada na Figura 5. Verifica-se que a contração do maior eixo e do eixo médio ocorre de forma diferenciada dentro da faixa de temperatura e teor de água estudada, confirmando a hipótese de que as diferentes taxas de redução de água causadas pelas temperaturas utilizadas provocam mudanças na contração dos eixos ortogonais dos grãos de pinhão-mansão.

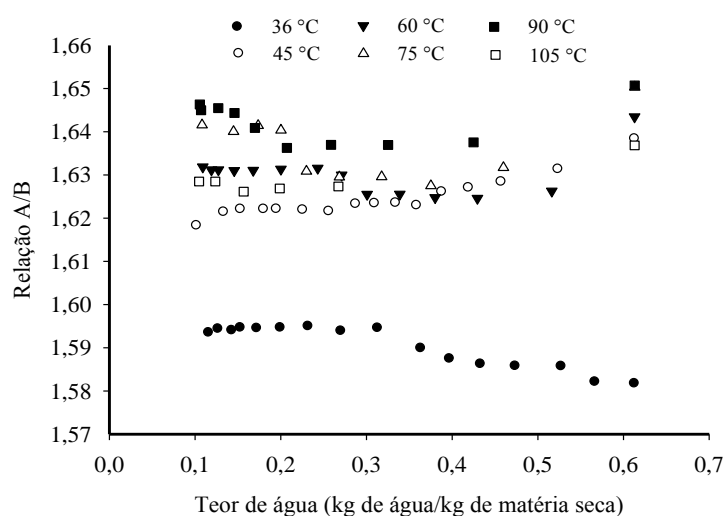


Figura 5. Relação comprimento-largura dos grãos de pinhão-mansão durante a secagem em diferentes temperaturas.

Nóbrega et al. (2001) propuseram uma classificação dos grãos de mamona em relação à sua forma, como função da relação entre o comprimento e a largura. De acordo com esta relação, os grãos podem ser considerados alongados, quando essa relação for maior que 1,2; arredondados, quando esta relação compreender valores entre 0,8 e 1,2; e achatados, quando os valores desta relação forem inferiores a 0,8. Assim, os

grãos de pinhão-mansó podem ser classificados como alongados, uma vez que apresentaram a relação comprimento/largura acima de 1,58 para todas as temperaturas e em todos os teores de água analisados.

Na Figura 6 estão apresentados os valores do volume dos grãos de pinhão-mansó submetidos à secagem em diversas condições de temperatura. Nota-se que na redução do teor de água de 0,61 para  $0,11 \pm 0,006$  (kg de água/kg de matéria seca), houve um decréscimo de 111,54; 139,47; 128,23; 137,68; 148,06 e 139,98  $\text{mm}^3$  em relação ao volume inicial, para as temperaturas de 105, 90, 75, 60, 45 e 36 °C, respectivamente. Nota-se que para as temperaturas mais altas (105, 90 e 75 °C) a redução do volume foi menor, principalmente para os grãos submetidos à secagem a 105 °C. Nesta temperatura, houve uma elevada taxa de remoção de água, ocasionando um enrijecimento do tegumento que pode ter dificultado a contração dos grãos e, conseqüentemente, reduzido com menor intensidade o seu volume. Nas temperaturas mais baixas (60, 45 e 36 °C), a redução do volume inicial foi maior, pois a água foi removida mais lentamente, e os grãos contraíram os eixos ortogonais de acordo com a redução do teor de água.

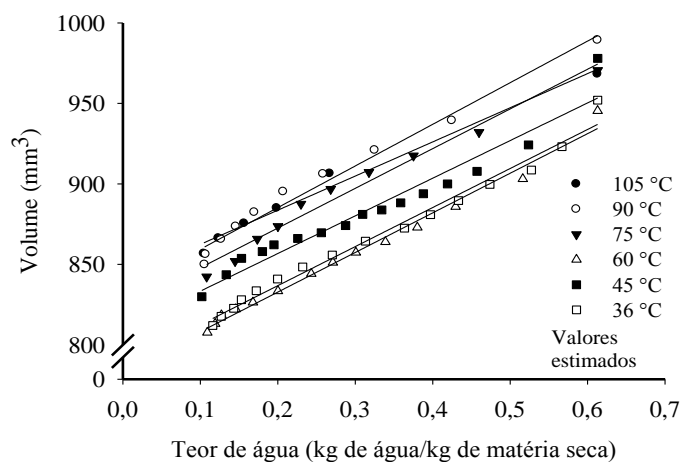


Figura 6. Volume dos grãos de pinhão-mansó submetidos a diversas condições de secagem.

Na Figura 7 estão apresentados os valores da área superficial dos grãos de pinhão-mansó em diferentes teores de água.

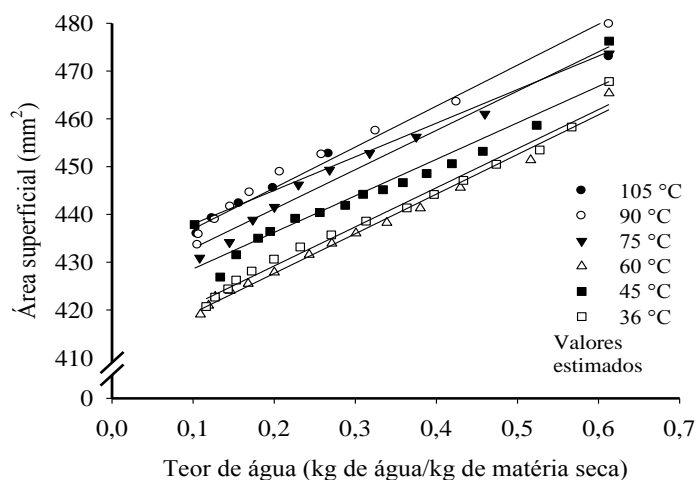


Figura 7. Área superficial dos grãos de pinhão-mansinho submetidos a seis condições de secagem.

Verifica-se na Figura 7 que a área superficial dos grãos de pinhão-mansinho diminuiu com a redução do teor de água. A variação da área superficial dos grãos de pinhão-mansinho em função da temperatura de secagem apresentou o mesmo comportamento do volume. Logo, percebe-se que a área superficial dos grãos de pinhão-mansinho foi influenciada pela temperatura do ar de secagem e que está diretamente relacionada com o volume e o teor de água. Karababa (2006) verificou um decréscimo de 40,16% da área superficial dos grãos de milho pipoca com a redução do teor de água de 17,12 para 8,95 (%b.u.). Goneli et al. (2008) observaram um decréscimo de 23 mm<sup>2</sup>, aproximadamente, com a redução do teor de água de 0,55 para 0,09 (kg de água/kg de matéria seca) em sementes de mamona, espécie pertencente à mesma família do pinhão-mansinho.

Ainda na Figura 7 observa-se que os valores de área superficial dos grãos de pinhão-mansinho estão entre 479,6 e 419,1 mm<sup>2</sup>. Estes resultados foram inferiores aos valores reportados por Santos et al. (2009), em que os grãos de pinhão-mansinho com o teor de água de 8,73 ± 0,099 (%b.u) apresentaram uma área superficial de 538,46 mm<sup>2</sup>. Já Garnayak et al. (2008) encontraram resultados variando de 476,78 a 521,99 mm<sup>2</sup> nos grãos de pinhão-mansinho para a faixa de teor de água de 4,75 a 19,57 % (b.u.). As divergências nos valores da área superficial podem estar relacionadas com a variedade dos grãos e o manejo adotado durante os períodos pré e/ou pós-colheita.

A área projetada dos grãos de pinhão-mansinho submetidos a diferentes condições de ar é apresentada na Figura 8.

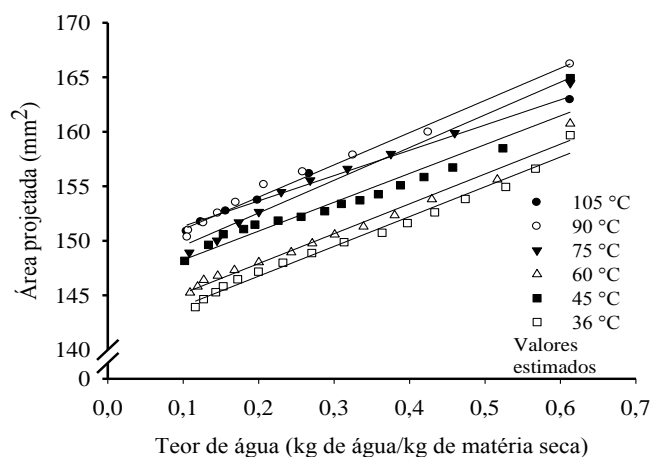


Figura 8. Área projetada dos grãos de pinhão-mansão submetidos a seis condições de secagem.

Observa-se na Figura 8 que a área projetada dos grãos de pinhão-mansão decresce com a redução do teor de água, apresentando valores de 12,07; 15,86; 15,54; 15,50, 16, 75 e 15,77 mm<sup>2</sup> em relação à área projetada inicial para as temperaturas de 105, 90, 75, 60, 45 e 36 °C, respectivamente. Verifica-se que a condição de secagem de 105 °C foi a que promoveu menor redução da área projetada inicial, comportamento similar ao ocorrido com o volume dos grãos de pinhão-mansão. Goneli (2008), avaliando a área projetada das sementes de mamona submetidas à secagem na temperatura de 40 °C, observou uma variação de 116 a 125 mm<sup>2</sup>, aproximadamente, com redução do teor de água de 0,55 para 0,09 (kg de água/kg de matéria seca). A redução da área projetada em função da diminuição do teor de água também vem sendo observada por diversos pesquisadores para vários produtos (Aydin 2007; Dursun et al. 2007; Yalçin et al. 2007).

A relação superfície-volume dos grãos de pinhão-mansão submetidos a diferentes condições de ar em função do teor de água é apresentada na Figura 9. Verifica-se que, para as seis condições de secagem analisadas, a redução do teor de água aumenta a relação superfície-volume. Segundo Farinha (2008), se apenas fatores físicos estiverem envolvidos, a taxa de perda de água é proporcional à relação superfície-volume, e admitindo que a forma do produto seja constante, a relação superfície-volume aumenta com a redução do tamanho.

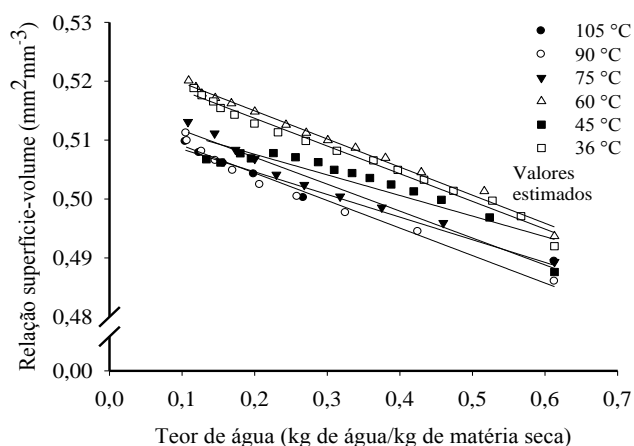


Figura 9. Relação superfície-volume dos grãos de pinhão-manso submetidos a diversas condições de secagem.

Em se tratando de materiais de composição química semelhante, a taxa de redução de água será maior para aquele que apresenta a maior relação superfície-volume, uma vez que a área de contato do material com o ar de secagem é maior em relação ao volume ocupado por ele.

Na Tabela 1, são apresentados os modelos lineares ajustados aos dados experimentais das áreas projetada e superficial, volume e relação superfície-volume dos grãos de pinhão-manso em função do teor de água. Observa-se que os modelos apresentaram alto grau de significância de acordo com o teste F e que, com exceção da relação superfície-volume para a temperatura de 45 °C apresentaram elevado valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), superior a 93 %. Os valores do erro médio relativo (P) obtidos nas avaliações realizadas foram todos inferiores a 10%, indicando, de acordo com Mohapatra & Rao (2005), um bom ajuste do modelo ao fenômeno estudado. Assim, os modelos lineares utilizados descrevem de forma satisfatória o comportamento das variáveis analisadas em função do teor de água.

O ajuste de modelos lineares a essas avaliações vem sendo observado por diversos pesquisadores (Baryeh 2002; Nimkar et al. 2005; Karababa 2006; Garnayak et al. 2008; Pradhan et al. 2009). Para a esfericidade, circularidade e relação comprimento-largura dos grãos de pinhão-manso ao longo da secagem, os modelos não foram significativos.

Tabela 1. Equações ajustadas aos valores da área projetada, área superficial, volume e relação superfície-volume dos grãos de pinhão-manso em função do teor de água.

Área Projetada				Área Superficial			
T (°C)	Modelo	R <sup>2</sup> (%)	P (%)	T (°C)	Modelo	R <sup>2</sup> (%)	P (%)
105	$A_p = 23,19Ta + 149,0$	98,6 <sup>**</sup>	0,23	105	$S = 70,37Ta + 430,9$	98,2 <sup>**</sup>	0,29
90	$A_p = 29,56Ta + 148,0$	98,7 <sup>**</sup>	0,28	90	$S = 85,71Ta + 428,3$	97,9 <sup>**</sup>	0,37
75	$A_p = 30,00Ta + 146,5$	97,9 <sup>**</sup>	0,36	75	$S = 82,24Ta + 424,6$	97,6 <sup>**</sup>	0,37
60	$A_p = 27,39Ta + 142,4$	98,2 <sup>**</sup>	0,27	60	$S = 82,97Ta + 411,0$	98,8 <sup>**</sup>	0,22
45	$A_p = 26,43Ta + 145,6$	93,0 <sup>**</sup>	0,50	45	$S = 76,43Ta + 420,9$	90,1 <sup>**</sup>	0,54
36	$A_p = 27,33Ta + 141,2$	98,3 <sup>**</sup>	0,29	36	$S = 81,84Ta + 412,8$	98,4 <sup>**</sup>	0,30
Volume				Relação Superfície-volume			
T (°C)	Modelo	R <sup>2</sup> (%)	P (%)	T (°C)	Modelo	R <sup>2</sup> (%)	P (%)
105	$V_g = 212,2Ta + 841,2$	98,4 <sup>**</sup>	0,41	105	$SV = -0,038Ta + 0,512$	97,7 <sup>**</sup>	0,16
90	$V_g = 258,6Ta + 833,5$	98,1 <sup>**</sup>	0,54	90	$SV = -0,046Ta + 0,513$	97,3 <sup>**</sup>	0,21
75	$V_g = 246,7Ta + 823,1$	97,8 <sup>**</sup>	0,52	75	$SV = -0,045Ta + 0,516$	96,9 <sup>**</sup>	0,21
60	$V_g = 246,1Ta + 783,5$	98,7 <sup>**</sup>	0,34	60	$SV = -0,047Ta + 0,524$	99,0 <sup>**</sup>	0,11
45	$V_g = 233,9Ta + 809,9$	94,0 <sup>**</sup>	0,70	45	$SV = -0,035Ta + 0,514$	82,2 <sup>**</sup>	0,55
36	$V_g = 242,6Ta + 788,2$	98,3 <sup>**</sup>	0,44	36	$SV = -0,047Ta + 0,523$	98,6 <sup>**</sup>	0,15

<sup>\*\*</sup> Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste F.

## CONCLUSÃO

Diante o exposto, conclui-se que a redução do teor de água e as condições de secagem promovem alterações na forma e diminuem o tamanho dos grãos de pinhão-manso.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKPINAR, E.K.; BICER, Y.; YILDIZ, C. Thin layer drying of red pepper. *Journal of Food Engineering*, v.59, n1, p.99-104, 2003.
- AYDIN, C. Some engineering properties of peanut and kernel. *Journal of Food Engineering*, v.79, n.3, p.810-816, 2007.
- BARYEH, E.A. Physical properties of millet. *Journal of Food Engineering*, v.51, n.1, p.39-46, 2002.
- BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de defesa Agropecuária. *Regras para Análise de Sementes*. Brasília, 2009. 395p.

CORRÊA, P.C.; AFONSO JÚNIOR, P.C.; QUEIROZ, D.M.; SAMPAIO, C.P.; CARDOSO, J.B. Variação das dimensões características e da forma dos frutos de café durante o processo de secagem. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, n.3, p.466-470, 2002.

CORRÊA, P.C.; RIBEIRO, M.D.; RESENDE, O; BOTELHO, F.M., Determinação e modelagem das propriedades físicas e da contração volumétrica do trigo durante a secagem. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, n.3, p.665-670, 2006.

DIAS, L.F.L. *Avaliação de algumas propriedades físicas de grãos de café (Coffea arabica) orgânico e convencional*. 2007. 44f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon-PR.

DURSUN, I.; TUĞRUL, K.M.; DURSUN, E. Some physical properties of sugarbeet seed. *Journal of Stored Products Research*, v.43, n.2, p.149-155, 2007.

FARINHA, L.R.L. *Características físicas na perda da matéria fresca e evolução das propriedades reológicas e cor da cenoura cv. Brasília no armazenamento*. 2008. 111f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.

FERREIRA, D.F. SISVAR: um programa para análises estatísticas e ensino de estatística. *Revista Symposium*, v.6, n.2, p.36-41, 2008.

GARNAYAK, D.K.; PRADHAN, R.C.; NAIK, S.N.; BHATNAGAR N. Moisture-dependent physical properties of Jatropha seed (*Jatropha curcas* L.), *Industrial crops and products*, v.27, n.1, p.123-129, 2008.

GONELI, A.L.D. *Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade de mamona (Ricinus communis L.) durante a secagem e o armazenamento*. 2008. 186 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.

KARABABA, E. Physical properties of popcorn kernels. *Journal of Food Engineering*, v.72, n.1, p.100-107, 2006.

LAHSASNI, S.; KOUHILA, M.; MAHROUZ, M.; JAOUHARI, J.T. Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). *Journal of Food Engineering*, v.2, n.61, p.173-179, 2004.

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.

MOSHENIN, N.N. *Physical properties of plant and animal materials*. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841p.

NIMKAR, P.M.; MANDWE, D.S.; DUDHE, R.M. Physical Properties of Moth Gram, *Biosystems Engineering*, v.91, n.2, p.183-189, 2005.

NÓBREGA, M.B.M.; ANDRADE, F.P.; SANTOS, J.W.; LEITE, E.J. Germoplasma. In: AZEVEDO, D.M.P. de; LIMA, E.F. (eds.). *O agronegócio da mamona no Brasil*. Brasília: Embrapa Serviço de Comunicação Tecnológica, 2001. 350 p.

PRADHAN, R.C.; NAIK, S.N.; BHATNAGAR, N.; VIJAY V.K. Moisture-dependent physical properties of jatropha fruit. *Industrial Crops and Products*, v.29, n.3, p.341-347. 2009.

RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; CECON, P.R. Forma, tamanho e contração volumétrica do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) durante a secagem. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v.7, n.1, p.15-24, 2005.

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.

SANTOS, S.B.; MARTINS, M.A.; CARVALHO, F.M.; CARNEIRO, A.C.O. *Determinação de algumas propriedades físicas dos grãos de pinhão manso (Jatropha curcas L.)* In: DI LEO, N.; MONTICO, S.; NARDÓN, G. *Avances en Ingeniería Rural: 2007 - 2009*. Rosario: UNR Editora, 2009, p.1067-1072.

SILVA, J. S. *Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas*, Viçosa: Aprenda Fácil, 2008. 559p.



SIRISOMBOON, P.; KITCHAIYA, P. Physical properties of *Jatropha curcas* L. kernels after heat treatments. *Biosystems Engineering*, v.102, n.2, p.244-250, 2009.

SIRISOMBOON, P.; KITCHAIYA, P.; PHOLPHO, T.; MAHUTTANYAVANITCH, W. Physical and mechanical properties of *Jatropha curcas* L. fruits, nuts and kernels. *Biosystems Engineering*, v.97, n.2, p.201-207, 2007.

TUNDE-AKINTUNDE, T.Y.; AKINTUNDE, B.O. Some physical properties of sesame seed. *Biosystems Engineering*, v.88, n.1, p.127-129, 2004.

ULLMANN, R.; RESENDE, O.; SALES, J.F.; CHAVES, T.H. Qualidade das sementes de pinhão-mansô submetidas à secagem artificial. *Revista Ciência Agronômica*, v.41, n.3, p.442-447, 2010.

YALÇIN, İ.; ÖZARSLAN, C.; AKBAŞ, T. Physical properties of pea (*Pisum sativum*) seed. *Journal of Food Engineering*, v.79, n.2, p.731-735, 2007.

## CINÉTICA DE SECAGEM DOS GRÃOS DE PINHÃO-MANSO

Resumo: Diante da necessidade de desenvolvimento de equipamentos para a cultura do pinhão-manso, objetivou-se com o presente trabalho ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem dos grãos de pinhão-manso e determinar o coeficiente de difusão efetivo acrescentando o efeito da contração volumétrica, bem como obter a energia de ativação durante a secagem em diversas condições de ar. O experimento foi desenvolvido no Instituto Federal Goiano - *Campus* Rio Verde. Os grãos com teor de água inicial de 0,50 (kg de água/kg de matéria seca), aproximadamente, foram submetidos à secagem em estufa com circulação de ar forçada nas temperaturas de 45, 60, 75, 90 e 105 °C, até atingirem o teor de água de  $0,10 \pm 0,005$  (kg de água/kg de matéria seca). Aos dados experimentais foram ajustados onze modelos matemáticos utilizados para representação da secagem dos produtos agrícolas. Os modelos foram analisados por meio do coeficiente de determinação, do qui-quadrado, do erro médio relativo, do erro médio estimado e da distribuição de resíduos. O coeficiente de difusão efetivo e a energia de ativação foram calculados por meio do modelo da difusão líquida para a forma geométrica cilíndrica, com aproximação de oito termos e da equação de Arrhenius, respectivamente. Conclui-se que os modelos de Midilli e Dois Termos são adequados para a representação do fenômeno da secagem dos grãos de pinhão-manso e que, entre estes dois, recomenda-se o modelo de Midilli para a descrição do fenômeno devido à sua maior simplicidade; o coeficiente de difusão efetivo dos grãos de pinhão-manso aumenta com a elevação da temperatura do ar; a inclusão da contração volumétrica promove um melhor ajuste do modelo da difusão líquida para a secagem dos grãos de pinhão-manso.

Palavras-chave: modelagem matemática, *Jatropha curcas* L., temperatura, teor de água.

## KINETICS OF DRYING PROCESS OF JATROPHA GRAINS

Abstract: Due the need to develop equipment for *Jatropha* cultivation, this study aimed to fit different mathematical models to experimental data for *Jatropha* grains drying and determine the effective diffusion coefficient, adding the shrinkage effect, and to obtain the activation energy during drying process under various air conditions. The experiment was carried out at Instituto Federal Goiano - *Campus* Rio Verde, Goiás State, Brazil (Goiano Federal Institute – Rio Verde *Campus*). Grains with initial

moisture content of 0.50 (water kg/dry matter kg) approximately were subjected to drying process in an oven with forced air circulation at temperatures of 45, 60, 75, 90, and 105°C, until they reach the moisture content of  $0.10 \pm 0.005$  (water kg/dry matter kg). Eleven mathematical models that were used to represent agricultural products drying were fitted to experimental data. The models were analyzed using determination coefficient, chi-square, mean relative error, estimated average error, and residuals distribution. The effective diffusion coefficient and activation energy were calculated using the liquid diffusion model for cylindrical geometry, with approximation of eight terms and the Arrhenius equation, respectively. We conclude that Midilli and Two Terms models are adequate to represent the drying phenomenon of *Jatropha* grains and that Midilli model is recommended to describe the phenomenon due its simplicity; the effective diffusion coefficient of *Jatropha* grains increases with increasing air temperature; shrinkage inclusion promotes a better adjustment of the liquid diffusion model for drying *Jatropha* grains.

Key words: mathematical modeling, *Jatropha curcas* L., temperature, moisture content.

## INTRODUÇÃO

A crescente preocupação mundial com o meio ambiente, juntamente com a busca por fontes de energia renováveis, coloca o biodiesel no centro das atenções e interesses. Diversos países, entre eles o Brasil, procuram o caminho do domínio tecnológico desse biocombustível, tanto em nível agrônomo como industrial, o que deverá provocar fortes impactos na economia brasileira e na política de inclusão social do país (Abdalla et al. 2008).

Entre as plantas que apresentam potencial para a produção de biodiesel, está o pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.). Segundo Santos et al. (2009), o óleo produzido dos grãos de pinhão-manso apresenta todas as qualidades necessárias para ser transformado em óleo diesel. Para atender o aumento de produção dos grãos de pinhão-manso, torna-se necessária a adoção de novas tecnologias visando ao desenvolvimento dos maquinários utilizados nas etapas de colheita e pós-colheita. Entre as etapas pós-colheita, a secagem assume uma enorme importância, pois está diretamente relacionada com a qualidade final do produto. Segundo Resende et al. (2010), a conservação pela secagem baseia-se no fato de que tanto os microrganismos como as enzimas e todo o mecanismo metabólico necessitam de água para suas atividades.

O fenômeno de redução do teor de água de grãos é complexo e envolve simultaneamente a transferência de calor e massa, que podem alterar de forma substancial a sua qualidade e as propriedades físicas do produto, dependendo do método e das condições de secagem (RESENDE et al. 2008). Assim, é de fundamental importância o melhor entendimento deste processo para obter uma secagem eficiente do ponto de vista técnico e econômico.

No desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamentos utilizados para a secagem de grãos, são relevantes 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, utiliza-se um modelo matemático que representa, satisfatoriamente, a perda de água durante o período de secagem (Berbert et al. 1995; Giner & Mascheroni 2002).

O processo de secagem de produtos agrícolas, em camada delgada, tem por finalidade a determinação das taxas de secagem do produto utilizando, para a coleta de dados, o registro das perdas de massa ocorridas em uma amostra durante a remoção de água (Monte et al. 2008). As curvas de secagem, em camada delgada, variam com a espécie, variedade, condições ambientais, métodos de preparo pós-colheita, entre outros fatores. Neste sentido, diversos modelos matemáticos têm sido utilizados para descrever o processo de secagem de produtos agrícolas (Resende et al. 2008).

Segundo Midilli et al. (2002), existem três tipos de modelos de secagem em camada delgada que visam a descrever a cinética de secagem de produtos agrícolas: o teórico, que considera a resistência interna, a transferência de calor e a água entre o produto e o ar quente; os semiteóricos; e os empíricos, que consideram somente a resistência interna, a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem.

Esses modelos, geralmente, baseiam-se em variáveis externas ao produto, como a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem. Entretanto, não fornecem indicações sobre os fenômenos de transporte de energia e de água no interior dos grãos e consideram que todo o processo de secagem ocorra somente no período de taxa decrescente (Resende et al. 2009).

De acordo com Goneli et al. (2007), os modelos de secagem baseados na teoria da difusão líquida têm merecido atenção especial por parte dos pesquisadores. Segundo Goneli et al. (2009), a difusão de água em produtos agrícolas durante a secagem é um processo complexo que pode envolver diferentes mecanismos, como a difusão molecular, difusão capilar, difusão de superfície, fluxo hidrodinâmico, difusão de vapor

e difusão térmica. A teoria da difusão líquida assume que não há influência da capilaridade, despreza os efeitos da transferência de energia e massa de um corpo para outro e também considera que os corpos entram em equilíbrio térmico com o ar instantaneamente.

Pode-se dizer que o coeficiente de difusão efetivo descreve a velocidade de saída de água do grão. Como a difusividade varia conforme mudam as condições de secagem, ela não é intrínseca ao material, assim, convencionou-se chamá-la de difusividade efetiva (Oliveira et al. 2006).

Alguns pesquisadores, ao analisarem o modelo da difusão líquida para a representação do processo de secagem, consideraram em seus trabalhos o efeito da contração volumétrica no melhor ajuste do modelo (Ramos et al. 2005; Resende et al. 2007; Goneli et al. 2007).

Considerando as vantagens da produção de biodiesel, a importância do estudo teórico do processo de secagem dos produtos agrícolas, o destaque da cultura do pinhão-mansinho como oleaginosa e a falta de informações a respeito do comportamento dos grãos desta cultura durante a redução de água do grão, objetivou-se com o presente trabalho ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem dos grãos de pinhão-mansinho, selecionando aquele que melhor representa o fenômeno e determinar e avaliar o coeficiente de difusão efetivo acrescentando o efeito da contração volumétrica, bem como obter a energia de ativação para o processo de secagem dos grãos de pinhão-mansinho, 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* (IF Goiano – *Campus Rio Verde*).

Os frutos de pinhão-mansinho foram colhidos manualmente no município de Porangatu, GO. Posteriormente, procedeu-se ao beneficiamento manual dos grãos. Os grãos de pinhão-mansinho, com teor de água inicial de 0,50 (kg de água/kg de matéria seca), foram submetidos à secagem em estufa com ventilação de ar forçada em cinco condições de temperatura: 45, 60, 75, 90 e 105 °C, que promoveram as umidades relativas de 15,6; 7,4; 4,0; 1,8 e 1,2%, respectivamente. Os grãos foram mantidos na

estufa até atingirem o teor de água de  $0,10 \pm 0,005$  (kg de água/kg de matéria seca), determinado em estufa a  $105 \pm 1^\circ\text{C}$ , durante 24 horas, em três repetições (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 realizado com auxílio de uma balança analítica com resolução de 0,01 g.

A temperatura do ar de secagem foi monitorada por meio de um termômetro instalado no interior do secador. A umidade relativa no interior da estufa foi obtida por meio dos princípios básicos de psicrometria, monitorando-se as condições do ambiente externo e utilizando o programa computacional GRAPSI. Para a determinação das razões de teor de água do pinhão-manso 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 (kg de água/kg de matéria seca);

$X_i$ : teor de água inicial do produto (kg de água/kg de matéria seca); e

$X_e$ : teor de água de equilíbrio do produto (kg de água/kg de matéria seca).

O teor de água de equilíbrio dos grãos de pinhão-manso em cada temperatura foi obtido experimentalmente. As bandejas contendo as amostras permaneceram na estufa até que a massa do produto permanecesse invariável durante três pesagens consecutivas.

Aos dados experimentais da secagem dos grãos de pinhão-manso foram ajustados os modelos matemáticos frequentemente utilizados para representação da secagem de produtos agrícolas, conforme apresentação na Tabela 1.

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

Designação do modelo	Modelo
$RX = 1 + a t + b t^2$	Wang e Sing (Wang & Sing 1978) (2)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k_1 \cdot t)$	Verma (Verma et al. 1985) (3)
$RX = \exp \left( \left( \frac{-a - (a^2 + 4 \cdot b \cdot t)^{0,5}}{2 \cdot b} \right) \right)$	Thompson (Thompson et al. 1968) (4)
$RX = \exp(-k \cdot t^n)$	Page (Page 1949) (5)
$RX = \exp(-k \cdot t)$	Newton (Lewis 1921) (6)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	Midilli (Midilli et al. 2002) (7)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$	Logarítmico (Yagcioglu et al. 1999) (8)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	Henderson e Pabis (Henderson & Pabis 1961) (9)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k_o \cdot t) + c \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$	Henderson e Pabis modificado (Karathanos 1999) (10)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k \cdot a \cdot t)$	Exponencial de Dois Termos (Sharaf-Eldee et al. 1980) (11)
$RX = a \cdot \exp(-k_o \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$	Dois Termos (Henderson 1974) (12)

em que,

t : tempo de secagem, h;

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

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

Os modelos matemáticos foram ajustados por meio de análise de regressão não linear pelo método Gauss-Newton, utilizando um programa estatístico. Os modelos foram selecionados considerando a magnitude do coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), do qui-quadrado (χ<sup>2</sup>), do erro médio relativo (P) e do desvio padrão da estimativa (SE), além da verificação do comportamento da distribuição dos resíduos. Considerou-se o valor do erro médio relativo inferior a 10% como um dos critérios para seleção dos modelos, de acordo com Mohapatra & Rao (2005).

O erro médio relativo, o desvio padrão da estimativa e o qui-quadrado, para cada um dos modelos, foram calculados conforme as seguintes expressões:

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

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

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

em que:

Y : valor observado experimentalmente;

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

N: número de observações experimentais.

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

O modelo da difusão líquida para a forma geométrica cilíndrica, com aproximação de oito termos (Equação 16), foi ajustado aos dados experimentais de secagem dos grãos de pinhão-manso, considerando seu raio equivalente inicial, mantendo-o constante ao longo da secagem, e o raio equivalente considerando a contração volumétrica dos materiais.

$$RU = \frac{U^* - U_e^*}{U_i^* - U_e^*} = \sum_{\alpha=1}^{\infty} \frac{4}{\lambda_{\alpha}^2} \exp \left[ -\frac{\lambda_{\alpha}^2 \cdot D \cdot t}{r} \right] \quad (16)$$

em que:

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

$\alpha$ : número de termos;

$\lambda_{\alpha}$ : raízes da equação de Bessel de ordem zero;

r: raio de esfera equivalente, m; e

t: tempo de secagem, h.

Para o monitoramento da contração volumétrica, foram utilizados 15 grãos de pinhão-manso, individualizados em cápsulas de alumínio, com dimensões de 60,12 mm de diâmetro e 41,0 mm de altura, sendo que a cada intervalo predefinido de teor de água os grãos eram medidos nas três posições (comprimento, largura e espessura) com o auxílio de um paquímetro digital, com resolução de 0,01 mm.

O volume dos grãos de pinhão-manso foi obtido ao longo do processo de secagem, de acordo com a expressão proposta por Mohsenin (1986):



$$V_g = \frac{\pi \cdot A \cdot B \cdot C}{6} \quad (17)$$

em que:

V<sub>g</sub>: volume dos grãos, mm<sup>-3</sup>;

A: comprimento, mm;

B: largura, mm; e

C: espessura, mm .

As dimensões características dos eixos ortogonais dos grãos de pinhão-mansó foram determinadas com eles na sua posição natural de repouso, como ilustrado na Figura 1.

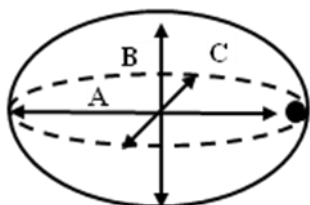


Figura 1. Desenho esquemático dos grãos de pinhão-mansó, considerados esferoides, com suas dimensões características.

O raio da esfera equivalente foi calculado pela seguinte expressão:

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

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

$$D = D_o \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{R \cdot T_{ab}}\right) \quad (19)$$

em que:

D<sub>o</sub>: fator pré-exponencial;

E<sub>a</sub>: energia de ativação, kJ.mol<sup>-1</sup>;

R: constante universal dos gases, 8,134 kJ.kmol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>; e

T<sub>ab</sub>: temperatura absoluta, K.

Os coeficientes da expressão de Arrhenius podem ser facilmente obtidos linearizando a Equação 20 com a aplicação do logaritmo na seguinte forma:

$$\ln D = \ln D_o - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T_{ab}} \quad (20)$$

Após a identificação do modelo para a representação da difusividade efetiva dos grãos de pinhão-manso, promoveu-se o teste da hipótese de igualdade dos modelos, utilizando a técnica de identidade de modelos descrita por Regazzi (2003), que permite analisar a equivalência entre os modelos utilizados, objetivando o ajuste de uma única equação para descrição do fenômeno estudado.

Os parâmetros dos modelos Linear, utilizados para descrever o efeito da contração volumétrica na difusividade efetiva dos grãos de pinhão-manso ( $a_i$  e  $b_i$ ), foram comparados entre si para verificar a sua igualdade. As seguintes hipóteses foram formuladas:

Modelo Linear:

$H_0$ :  $a_1 = a_2$  e  $b_1 = b_2$ .

*versus*

$H_a$ : existe pelo menos uma desigualdade entre os parâmetros.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 estão apresentados os valores médios de razão de teor de água dos grãos de pinhão-manso submetidos à secagem em diferentes condições de ar. Verifica-se na Tabela 2 que o tempo necessário para que os grãos de pinhão-manso atingissem o teor de água de  $0,10 \pm 0,005$  (kg de água/kg de matéria seca), foi de 7,11; 3,90; 2,60; 1,79 e 1,26 horas para as temperaturas de secagem de 45, 60, 75, 90 e 105 °C, respectivamente. Logo, o aumento da temperatura do ar promove redução no tempo de secagem dos grãos.

Tabela 2. Razão de teor de água dos grãos de pinhão-manso ao longo do tempo (h) de secagem em cinco condições de temperatura.

45 °C		60 °C		75 °C		90 °C		105 °C	
RX	Tempo	RX	Tempo	RX	Tempo	RX	Tempo	RX	Tempo
1,000	0,00	1,000	0,00	1,000	0,00	1,000	0,00	1,000	0,00
0,813	0,40	0,784	0,25	0,805	0,16	0,792	0,08	0,817	0,05
0,637	1,15	0,667	0,53	0,623	0,41	0,651	0,24	0,679	0,18
0,498	1,78	0,512	0,93	0,527	0,66	0,530	0,49	0,543	0,36
0,368	3,13	0,393	1,66	0,408	1,11	0,414	0,81	0,410	0,63
0,255	4,76	0,284	2,49	0,291	1,70	0,301	1,21	0,288	0,95
0,140	7,11	0,164	3,90	0,175	2,60	0,185	1,79	0,191	1,26

Com o aumento da temperatura do ar há uma maior diferença entre a pressão de vapor do ar de secagem e do produto, fazendo com que a água seja removida com mais facilidade e rapidez, fato observado por diversos pesquisadores para inúmeros produtos (Lahsasni et al. 2004; Mohapatra & Rao 2005; Gely & Santalla 2007; Sirisomboon & Kitchaiya 2009; Miranda et al. 2009; Vega-Gálvez et al. 2011).

Nota-se ainda na Tabela 2 que a razão de teor de água dos grãos de pinhão-manso foi de 0,14 para a temperatura de 45 °C; 0,16 para a de 60 °C; 0,17 para a de 75 °C; 0,18 para a de 90 °C; e de 0,19 para a de 105 °C. Logo, há um incremento da razão de teor de água com o aumento da temperatura do ar de secagem, devido ao menor teor de água de equilíbrio dos grãos nessas condições de secagem.

Na Tabela 3 encontram-se os parâmetros estatísticos utilizados para a comparação entre os onze modelos utilizados para a descrição da cinética de secagem dos grãos de pinhão-manso submetidos à secagem em diferentes condições de temperatura. Nota-se que apenas os modelos matemáticos de Wang e Singh (2) e Newton (6) não apresentaram coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superiores a 95%, que, segundo Kashaninejad et al. (2007) e Madamba et al. (1996), indicam uma representação satisfatória do processo de secagem.

Tabela 3. Coeficientes de determinação ( $R^2$ , %), erros médio relativo (P, %) e estimado (SE, decimal) para os modelos analisados, durante a secagem dos grãos de pinhão-manso nas diversas condições de temperatura (°C).

Modelo	45 °C			60 °C			75 °C			90 °C			105 °C		
	SE	P	R <sup>2</sup>	SE	P	R <sup>2</sup>	SE	P	R <sup>2</sup>	SE	P	R <sup>2</sup>	SE	P	R <sup>2</sup>
2	0,067	13,8	96,0	0,076	13,7	94,5	0,070	12,2	95,2	0,086	12,9	92,4	0,074	11,4	94,6
3	0,013	1,8	99,8	0,012	1,4	99,9	0,010	0,7	99,9	0,090	13,2	93,3	0,078	10,7	95,2
4	0,015	3,8	99,8	0,014	3,2	99,8	0,010	2,8	99,8	0,028	5,5	99,2	0,033	6,0	98,9
5	0,012	2,4	99,8	0,012	2,0	99,9	0,010	1,8	99,9	0,019	3,6	99,6	0,022	3,9	99,5
6	0,048	12,2	97,6	0,060	14,0	95,8	0,060	12,6	96,1	0,073	13,2	93,3	0,063	10,7	95,2
7	0,015	2,0	99,9	0,015	1,7	99,9	0,010	1,5	99,9	0,004	0,6	99,9	0,006	0,8	99,9
8	0,029	6,1	99,4	0,034	6,6	99,1	0,030	5,8	99,1	0,051	7,3	97,8	0,045	6,0	98,4
9	0,042	9,2	98,4	0,052	10,0	97,4	0,050	9,2	97,5	0,058	8,3	96,6	0,049	6,5	97,6
10	0,025	1,2	99,9	0,024	1,2	99,9	0,010	0,7	99,9	0,003	0,3	99,9	0,011	1,0	99,9
11	0,021	4,2	99,6	0,032	6,6	99,0	0,030	5,6	99,2	0,050	7,34	97,4	0,069	10,7	95,2
12	0,015	1,9	99,9	0,014	1,4	99,9	0,010	0,7	99,9	0,002	0,3	99,9	0,006	1,0	99,9

Os modelos de Wang e Singh (2), Newton (6), Verma (3) e Exponencial de Dois Termos (11) apresentaram valores do erro médio relativo superiores a 10% para pelo menos uma condição analisada. Os valores do erro médio relativo (P) indicam o

desvio dos valores observados em relação à curva estimada pelo modelo (Kashaninejad et al. 2007) e, segundo Mohapatra & Rao (2005), valores inferiores a 10% são recomendados para a seleção de modelos. De acordo com Madamba et al. (1996), o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), utilizado isoladamente, não constitui um bom critério para a seleção de modelos não lineares. Dessa forma, os modelos descritos acima não representam satisfatoriamente o processo de secagem dos grãos de pinhão-manso.

Ainda na Tabela 3, observa-se que os modelos de Thompson (4), Page (5), Midilli (7), Logarítmico (8), Henderson e Pabis (9), Henderson e Pabis Modificado (10) e Dois Termos (12) apresentaram valores do erro médio relativo inferiores a 10% para todas as condições testadas e, entre os modelos analisados, foram os que obtiveram as menores magnitudes do desvio padrão da estimativa ou erro médio estimado (SE). Vale salientar que quanto menor o valor do SE, melhor será a qualidade do ajuste do modelo em relação aos dados experimentais.

Na Tabela 4, são apresentados os dados da distribuição de resíduos para os modelos estudados. Verifica-se que o modelo de Wang e Singh (2) foi o único a apresentar distribuição tendenciosa para as cinco condições de temperatura. Segundo Goneli et al. (2011), um modelo é considerado aleatório se os valores residuais se encontrarem próximos à faixa horizontal em torno de zero e também não formarem figuras definidas, não indicando tendenciosidade dos resultados. Se apresentar distribuição tendenciosa, o modelo é considerado inadequado para representar o fenômeno em questão.

Tabela 4. Distribuição dos resíduos ( $A_L$  = aleatória;  $T_D$  = tendenciosa) para os onze modelos analisados, durante a secagem dos grãos de pinhão-manso nas diversas condições de temperatura.

Modelos	Temperatura (°C)				
	45	60	75	90	105
2	$T_D$	$T_D$	$T_D$	$T_D$	$T_D$
3	$A_L$	$A_L$	$A_L$	$T_D$	$T_D$
4	$A_L$	$A_L$	$A_L$	$T_D$	$T_D$
5	$A_L$	$A_L$	$A_L$	$T_D$	$T_D$
6	$A_L$	$T_D$	$T_D$	$T_D$	$T_D$
7	$A_L$	$A_L$	$A_L$	$A_L$	$A_L$
8	$A_L$	$A_L$	$A_L$	$T_D$	$T_D$
9	$A_L$	$T_D$	$T_D$	$T_D$	$T_D$
10	$A_L$	$A_L$	$A_L$	$A_L$	$A_L$
11	$A_L$	$T_D$	$T_D$	$T_D$	$T_D$
12	$A_L$	$A_L$	$A_L$	$A_L$	$A_L$

Nota-se ainda na Tabela 4 que, nas temperaturas mais altas (90 e 105 °C), apenas três modelos apresentaram distribuição aleatória, provavelmente devido ao menor tempo de secagem, o que ameniza a curva exponencial, característica marcante no processo de secagem dos produtos agrícolas, que serve de parâmetro para todos os modelos utilizados com exceção do modelo de Wang e Singh.

Na Figura 2 estão apresentadas as ilustrações da distribuição dos resíduos: Aleatória para o modelo de Midilli e Tendenciosa para o modelo de Wang e Singh, durante a secagem dos grãos de pinhão-manso na temperatura de 105 °C.

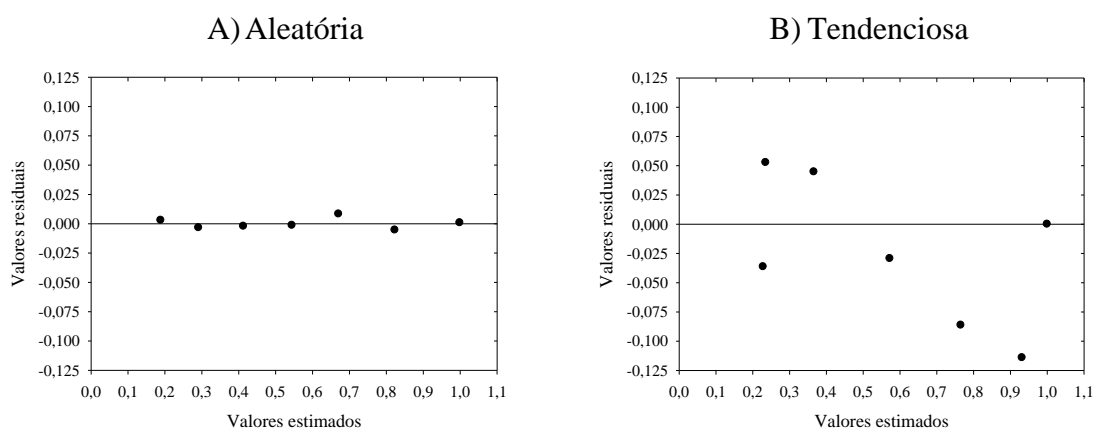


Figura 2. Ilustração da distribuição dos resíduos: A) Aleatória para o modelo de Midilli; B) Tendenciosa para o modelo de Wang e Singh; para os grãos de pinhão-manso submetidos à secagem na temperatura de 105 °C.

Na Tabela 5 estão apresentados os valores de qui-quadrado obtidos para os diferentes modelos ajustados à curva de secagem dos grãos de pinhão-manso. Os onze modelos analisados se encontraram no intervalo de confiança de 99%. No entanto, de uma forma geral, os modelos de Thompson (4), Page (5), Midilli (7), Henderson e Pabis (9) e Dois Termos (12) foram os que apresentam os menores valores de qui-quadrado. Quanto menor o valor do qui-quadrado, melhor o ajuste do modelo (Akpinar et al. 2003; Midilli & Kucuk 2003; Günhan et al. 2005).

Tabela 5. Valores de qui-quadrado calculado para os onze modelos utilizados na representação da cinética de secagem dos grãos de pinhão-mansão.

Modelos	Temperatura				
	45 °C	60 °C	75 °C	90 °C	105 °C
2	0,004487	0,005728	0,004780	0,007382	0,005487
3	0,000175	0,000147	0,000027	0,008152	0,006074
4	0,000239	0,000211	0,000166	0,000800	0,001104
5	0,000146	0,000138	0,000106	0,000379	0,000514
6	0,002288	0,003635	0,003240	0,005435	0,004049
7	0,000238	0,000226	0,000167	0,000019	0,000041
8	0,000852	0,001195	0,001076	0,002640	0,002076
9	0,000646	0,000565	0,000105	0,000010	0,000124
10	0,001820	0,002723	0,002498	0,003340	0,002369
11	0,000424	0,001007	0,000790	0,002510	0,004859
12	0,000232	0,000195	0,000035	0,000003	0,000041

De acordo com a análise dos parâmetros estatísticos, os modelos de Midilli (7) e Dois Termos (12) podem ser utilizados para representar a cinética de secagem dos grãos de pinhão-mansão. No entanto, devido à menor complexidade, o modelo de Midilli é recomendado para representar o processo de secagem dos grãos de pinhão-mansão. Diversos pesquisadores recomendaram o modelo de Midilli para prever o fenômeno de secagem de vários produtos agrícolas: feijão vermelho (Corrêa et al. 2007), folhas de erva-cidreira-brasileira (Barbosa et al. 2007), folhas de capim-limão (Martinazzo et al. 2007), cana-de-açúcar picada (Goyalde et al. 2009), folhas de sálvia (Radünz et al. 2010) e pimenta Cumari do Pará (Reis et al. 2011), entre outros.

Na Tabela 6, estão apresentados os coeficientes do modelo de Midilli ajustados aos dados experimentais da cinética de secagem dos grãos de pinhão-mansão em diferentes temperaturas.

Tabela 6. Parâmetros dos modelos de Midilli ajustados para as diferentes condições de secagem dos grãos de pinhão-mansão.

Coeficientes	Temperatura (°C)				
	45	60	75	90	105
a	1,0013*	1,00113*	1,00238*	0,99971*	0,99914*
b	0,7568	0,70866	0,70867	0,51149*	0,50871*
k	0,4203*	0,65689*	0,83281*	0,80931*	0,84700*
n	-0,0016 <sup>ns</sup>	-0,0029 <sup>ns</sup>	-0,0062 <sup>ns</sup>	-0,08490*	-0,15491*

\* Significativo a 5% pelo teste F

Nota-se na Tabela 6 que a magnitude da constante de secagem “k”, que, de acordo com Goneli et al. (2009), representa o efeito das condições externas de secagem,

tende a aumentar com a elevação da temperatura do ar de secagem, embora tenha sido sensivelmente menor na temperatura de 90 °C em relação à de 75 °C. Segundo Madamba et al. (1996) e Babalis & Belessiotis (2004), a constante de secagem “k” pode ser utilizada como uma aproximação para caracterizar o efeito da temperatura e está relacionada com a difusividade efetiva no processo de secagem para o período decrescente, indicando que a taxa de secagem se eleva com o aumento da temperatura.

Com relação ao coeficiente “n”, que reflete a resistência interna do produto à secagem (Goneli et al. 2009), observa-se redução dos valores com aumento da temperatura do ar de secagem, uma vez que há uma maior diferença entre a pressão parcial de vapor do ar e do grão, fazendo com que a água seja removida com mais facilidade, o que também aumenta a taxa de redução de água ou taxa de secagem.

Verifica-se ainda na Tabela 6 que os coeficientes “a” e “b” se comportam de forma diferente para as faixas de temperatura de 45 a 75 °C e de 90 a 105 °C, principalmente o coeficiente “b”, que foi significativo apenas para as temperaturas de 90 e 105 °C, o que confirma a hipótese de que os grãos de pinhão de pinhão-manso quando submetidos à secagem em temperaturas mais altas promovem uma curva de secagem diferenciada.

A Figura 3 apresenta as curvas de secagem dos grãos de pinhão-manso estimadas pelo modelo de Midilli. Verifica-se o ajuste satisfatório do modelo aos valores experimentais obtidos ao longo da secagem dos grãos de pinhão-manso.

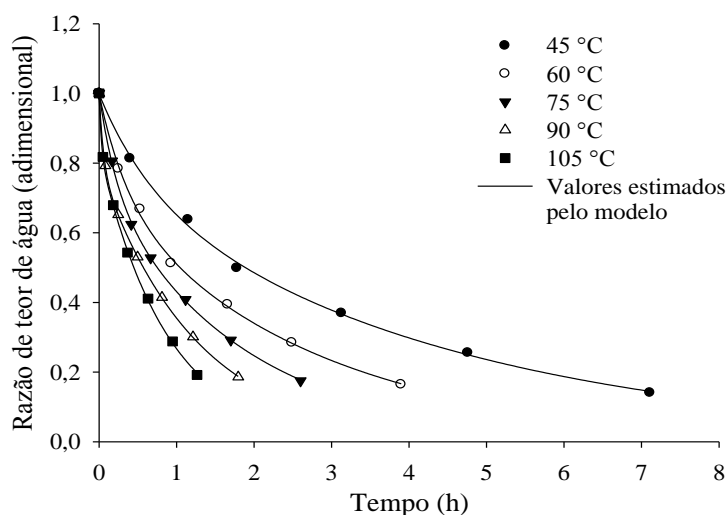


Figura 3. Valores da razão de teor de água experimentais e estimados pelo modelo de Midilli para a secagem dos grãos de pinhão-manso nas diversas condições de temperatura.

Os valores do raio equivalente dos grãos de pinhão-manso, utilizados no modelo da difusão líquida para a determinação do coeficiente de difusão efetivo durante a secagem em diversas condições de ar, são apresentados na Tabela 7. Observa-se que os valores do raio equivalente dos grãos apresentaram uma redução média de 0,57 mm com a redução do teor de água devida, essencialmente à sua contração volumétrica durante a secagem, concordando com os resultados obtidos por Corrêa et al. (2006a), Goneli et al. (2007) e Resende et al. (2007), que pesquisaram com grãos de feijão, trigo e feijão, respectivamente.

Tabela 7. Valores do raio equivalente ( $r$ , mm) e do teor de água ( $X$ , kg de água/kg de matéria seca) dos grãos de pinhão-manso, obtidos durante a secagem nas temperaturas de 45, 60, 75, 90 e 105 °C.

45 °C		60 °C		75 °C		90 °C		105 °C	
X	r	X	r	X	r	X	r	X	r
0,50	13,99	0,50	13,88	0,50	13,96	0,50	13,95	0,50	13,96
0,41	13,83	0,40	13,67	0,40	13,71	0,40	13,68	0,41	13,70
0,33	13,70	0,34	13,57	0,31	13,64	0,33	13,59	0,34	13,61
0,27	13,65	0,26	13,49	0,27	13,56	0,27	13,54	0,27	13,52
0,20	13,59	0,21	13,44	0,21	13,49	0,21	13,46	0,20	13,46
0,15	13,55	0,16	13,38	0,15	13,44	0,15	13,39	0,14	13,40
0,10	13,49	0,10	13,33	0,10	13,38	0,09	13,35	0,09	13,36

Na Figura 4 estão apresentados os valores do coeficiente de difusão efetivo para grãos de pinhão-manso, considerando o raio equivalente constante e variável, após a secagem em diferentes condições de ar.

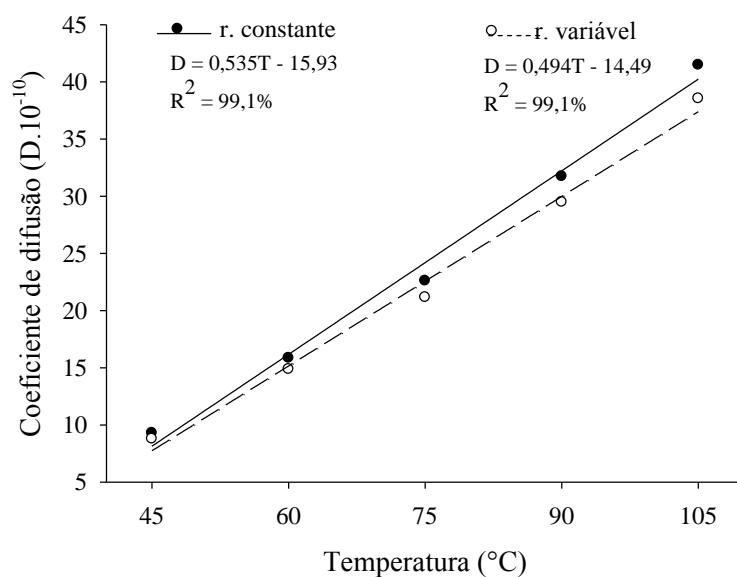


Figura 4. Coeficiente de difusão efetivo ( $m^2 \cdot s^{-1}$ ) obtidos para a secagem dos grãos de pinhão-manso nas temperaturas de 45, 60, 75, 90 e 105 °C.



Verifica-se na Figura 4 que o coeficiente de difusão efetivo dos grãos de pinhão-manso aumenta com o aumento da temperatura do ar de secagem, como já descrito por vários pesquisadores (Vera et al. 2005; Corrêa et al. 2006a; Resende 2007; Goneli et al. 2007; Gely & Santalla 2007; Resende et al. 2009; Almeida et al. 2009). Quanto maior a temperatura do ar de secagem, menor a resistência do grão à remoção de água, logo, a difusividade é maior. Segundo Goneli et al. (2009), com o aumento da temperatura, a viscosidade da água diminui e, sendo a viscosidade uma medida de resistência do fluido ao escoamento, variações dessa propriedade implicam alterações na difusão da água nos capilares do grão de modo a favorecer a movimentação desse fluido no produto.

Os coeficientes de difusão dos grãos apresentaram magnitudes entre  $9,29 \times 10^{-10}$  e  $41,48 \times 10^{-10} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ , utilizando-se o raio equivalente inicial dos grãos, ou seja, desprezando-se a redução de volume do produto ao longo da secagem, e entre  $8,79 \times 10^{-10}$  e  $38,54 \times 10^{-10} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ , considerando a contração volumétrica do grão. Logo, quando se emprega o fenômeno da contração há uma redução da difusividade efetiva dos grãos de pinhão-manso, independentemente da condição de secagem.

Corrêa et al. (2006a), trabalhando com grãos de feijão, observaram magnitudes do coeficiente de difusão efetivo entre  $2,21 \times 10^{-10}$  e  $9,08 \times 10^{-10} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ , considerando a contração volumétrica dos grãos, e entre  $2,77 \times 10^{-10}$  e  $10,89 \times 10^{-10} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ , utilizando o raio equivalente inicial dos grãos. Goneli et al. (2007) observaram magnitudes do coeficiente de difusão efetivo para grãos de trigo entre  $8,3306 \times 10^{-11}$  e  $41,0977 \times 10^{-11} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$  considerando-se a redução do volume do grão, e entre  $9,0244 \times 10^{-11}$  e  $44,6509 \times 10^{-11} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$  quando não foi considerada a contração volumétrica. Logo, a difusividade dos grãos de pinhão-manso é maior que a dos grãos de feijão e de trigo, comportamento esperado, pois a cultura em estudo é uma oleaginosa, e o feijão e trigo são aleuro-amiláceo e amiláceo, respectivamente. Vale salientar que produtos oleaginosos apresentam maior hidrofobicidade que aleuro-amiláceo e amiláceo, facilitando a remoção de água, aliado a isso, a faixa de temperatura do ar de secagem utilizada nos trabalhos com grãos de feijão e de trigo foi de 25 a 55 °C, enquanto a do presente estudo é de 45 a 105 °C.

Os valores do coeficiente de difusão efetivo calculados para os grãos de pinhão-manso estão coerentes com os relatados na literatura para secagem de produtos agrícolas que, de acordo com Madamba et al. (1996), se apresentam na ordem de  $10^{-9}$  a  $10^{-11} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ .

O teste de identidade de modelo para o coeficiente de difusão efetivo dos grãos de pinhão-mansó proporcionou valores de 32,78 para o  $\chi^2_{\text{calculado}}$ , e de 15,50 para o  $\chi^2_{\text{tabelados}}$ , assim, rejeita-se a hipótese formulada  $H_0$ , ou seja, os modelos lineares utilizados para a representação desse fenômeno diferem estatisticamente entre si, não sendo possível utilizar um único modelo para representar a variação do coeficiente de difusão efetivo em função da temperatura. Logo, é possível afirmar que a redução do volume altera significativamente o coeficiente de difusão efetivo dos grãos de pinhão-mansó. Sendo assim, torna-se necessária a inclusão da contração volumétrica para um melhor ajuste do modelo de difusão na secagem de grãos de pinhão-mansó.

A dependência do coeficiente de difusão efetivo dos grãos de pinhão-mansó com relação à temperatura do ar de secagem foi satisfatoriamente representada pela expressão de Arrhenius, conforme ilustrado na Figura 5.

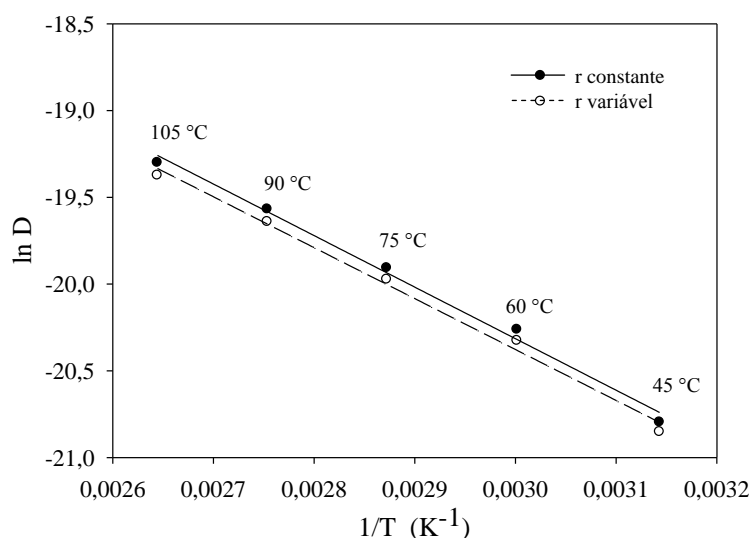


Figura 5. Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo em função da temperatura do ar de secagem, obtido durante a secagem dos grãos de pinhão-mansó.

Termodinamicamente, a energia de ativação representa a energia necessária para o rompimento da barreira que as moléculas de água encontram, durante o processo de secagem, ao migrarem do interior para a superfície do produto, sendo que energia de ativação mais baixa se traduz em maior difusividade de água no produto (Sharma & Prasad 2004). Deste modo, quanto menor a energia de ativação, maior será a velocidade com que a água será removida do material, indicando que os produtos com maiores teores de água apresentarão menor energia de ativação.

O valor da energia de ativação dos grãos de pinhão-manso encontrado no presente trabalho foi de  $24,17 \text{ kJ mol}^{-1}$ , quando se considerou o raio equivalente constante e de  $23,87 \text{ kJ mol}^{-1}$ , considerando a contração volumétrica. Nota-se que, quando desconsiderada a redução do volume dos grãos, a energia de ativação é ligeiramente superior, indicando que o fenômeno da contração volumétrica não exerce grande influência nesta avaliação.

Na literatura pesquisada, foram encontrados valores da energia de ativação para diversos produtos agrícolas: para arroz cozido, foi de  $36,44 \text{ kJ.mol}^{-1}$  (Ramesh 2003); para trigo, de  $37,013 \text{ kJ.mol}^{-1}$  (Mohapatra & Rao 2005); para feijão, de  $40,08 \text{ kJ.mol}^{-1}$  (Corrêa et al. 2006b); para trigo, de  $42,00 \text{ kJ.mol}^{-1}$  (Goneli et al. 2007); e para feijão adzuki, de  $31,16 \text{ kJ.mol}^{-1}$  (Almeida et al. 2009). Nota-se que a energia de ativação dos grãos de pinhão-manso é inferior à dos produtos citados, estando o comportamento relacionado com a ligação mais instável da água com os componentes químicos dos materiais utilizados neste estudo.

## CONCLUSÃO

Diante do exposto, conclui-se que os modelos de Midilli e Dois Termos são adequados para a representação da secagem dos grãos de pinhão-manso e que, entre estes, recomenda-se o modelo de Midilli para a descrição do fenômeno devido à sua maior simplicidade; o coeficiente de difusão efetivo dos grãos de pinhão-manso aumenta com a elevação da temperatura do ar; e a inclusão da contração volumétrica promove um melhor ajuste do modelo da difusão líquida para a secagem dos grãos de pinhão-manso.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLA, A.L.; SILVA FILHO, J.C.; GODOI, A.R.; CARMO, C.A.; EDUARDO, J.L.P. Utilização de subprodutos da indústria de biodiesel na alimentação de ruminantes. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v.37, n. Especial, p.260-258, 2008.

AKPINAR, E. K.; BICER, Y.; MIDILLI, A. Modeling and experimental study on drying of apple slices in a convective cyclone dryer. *Journal of Food Process Engineering*, v.26, n.6, p.515-541, 2003.

ALMEIDA, D.P.; RESENDE, O.; COSTA, L.M.; MENDES, U.C.; SALES, J.F. Cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). *Global Science and Technology*, v.2, n.1, p.72-83, 2009.

BABALIS, S.J.; BELESSIOTIS, V.G. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *Journal of Food Engineering*, v.65, n.3, p.449-458, 2004.

BARBOSA, F.F.; MELO, E.C.; SANTOS, R.H.S.; ROCHA, R.P.; MARTINAZZO, A.P.; RADÜNZ, L.L.; GRACIA, L.M.N. Evaluation of mathematical models for prediction of thinlayer drying of brazilian lemon-scented verbena leaves (*Lippia alba* (Mill) n.e. Brown). *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v.9, n.1, p.73-82, 2007.

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.167-173, 1995.

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

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

CORRÊA, P.C.; RIBEIRO, D.M.; RESENDE, O.; BOTELHO, F. M. Determinação e modelagem das propriedades físicas e da contração volumétrica do trigo durante a secagem. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, n.3, p.665-670, 2006b.

CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A.P.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola*, v.27, n.2, p.501-507, 2007.

GELY, M.C.; SANTALLA, E.M. Moisture diffusivity in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) seeds: Effect of air temperature and initial moisture content of seeds. *Journal of Food Engineering*, v.78, n.3, p. 1029-1033, 2007.

GINER, S.A.; MASCHERONI, R.H. Diffusive drying kinetics in wheat, Part 2: applying the simplified analytical solution to experimental data. *Postharvest Technology*, v.81, n.1, p.85-97, 2002.

GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; REIS NETO, S. A. Estudo da difusão de umidade em grãos de trigo durante a secagem. *Ciência Tecnologia de Alimentos*. v.27, n.1, p.135-140, 2007.

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

GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; MAGALHÃES, F.E.A.; BAPTESTINI, F.M. Contração volumétrica e forma dos frutos de mamona durante a secagem. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v.33, n.1, p.1-8, 2011.

GOYALDE, N.A.; MELO, E.C.; ROCHA, R.P.; GONELI, A.L.D.; FABIANA LANA ARAÚJO, F.L. Mathematical modeling of the drying kinetics of sugarcane slices. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v.11, n.2, p.117-121, 2009.

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.

HENDERSON, S.M. Progress in developing the thin layer drying equation. . *Transactions of the ASAE*, v.17, n.6, p.1167-1168, 1974.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory. Temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*, n.6, n.??, p.169-174, 1961.

KARATHANOS, V.T. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, v.39, n.4, p.337-44, 1999.

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

LAHSASNI, S.; KOUHILA, M.; MAHROUZ, M.; JAOUHARI, J.T. Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). *Journal of Food Engineering*, v.2, n.61, p.173-179, 2004.

LEWIS, W.K. The drying of solid materials. *Journal Industrial Engineering*, v.13, n.5, p.427-33, 1921.

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.

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

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

MIDILLI, A.; KUCUK, H. Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energy Conversion and Management*, v.44, n.7, p.1111-1122, 2003.

MIRANDA, M.; MAUREIRA, H.; RODRIGUEZ, K.; VEGA-GALVEZ, A. Influence of temperature on the drying kinetics, physicochemical properties, and antioxidant capacity of Aloe Vera (*Aloe barbadensis* Miller) gel. *Journal of Food Engineering*, v.91, n.2, p. 297-304, 2009.

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.

MOHSENIN, N.N. *Physical properties of plant and animal materials*. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841p.

MONTE, J. E. C.; MARTINS, J. H.; LOPES, D. C.; MONTEIRO, P. M. B.; PINTO, P. R. Sistema automático para secagem de produtos agrícolas em camada fina. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 30, n. 3, p. 307-312, 2008.

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

PAGE, G.E. *Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers*. Indiana: Purdue University, USA, 1949. Dissertação (Mestrado).

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

RAMESH, M.N. Moisture transfer properties of cooked rice during drying. *Journal of Food Science*, v.36, n2. p.245-255, 2003.

RAMOS, I. N.; BRANDÃO, T. R. S.; SILVA, C. L. M. Integrated approach on solar drying, pilot convective drying and microstructural changes. *Journal of Food Engineering*, v.67, n.1-2, p.195-203, 2005.

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

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

RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; JARÉN, C.; MOURE, A. J. Bean moisture diffusivity and drying kinetics: a comparison of the liquid diffusion model when taking into account and neglecting grain shrinkage. *Spanish Journal of Agricultural Research*, v.5, n.1, p.51-58, 2007.

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.

RESENDE, O.; ARCANJO, R. V.; SIQUEIRA, V. C.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática para a secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de concreto. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v.31, n.2, p.189-196, 2009.

RESENDE, O.; RODRIGUES, S.; SIQUEIRA, V. C.; ARCANJO, R. V. Cinética da secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de chão batido. *Acta Amazônica*, v.40, n.2, p.247-256, 2010.

SANTOS, S.B.; MARTINS, M.A.; CARVALHO, F.M.; CARNEIRO, A.C.O. *Determinação de algumas propriedades físicas dos grãos de pinhão manso (Jatropha curcas L.)* In: DI LEO, N.; MONTICO, S.; NARDÓN, G. *Avances en Ingeniería Rural: 2007 - 2009*. Rosario: UNR Editora, 2009, p.1067-1072.

SHARAF-ELDEEN, Y. I.; BLAISDELL, J. L.; HAMDY, M. Y. A model for ear corn drying. *Transactions of the ASAE*, v.23, n.5, p.1261-1265, 1980.

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

SIRISOMBOON, P.; KITCHAIYA, P. Physical properties of *Jatropha curcas* L. kernels after heat treatments. *Biosystems Engineering*, v.102, n.2, p.244-250, 2009.

THOMPSON, T. L.; PEART, R. M.; FOSTER, G. H. Mathematical simulation of corn drying: A new model. *Transactions of ASAE*, v.11, n.4, p.582-586, 1968.

VEGA-GÁLVEZ, A.; MIRANDA, M.; CLAVERÍA, R.; QUISPE, I.; VERGARA, J.; URIBE, E.; PAEZ, H.; SCALA, K.D. Effect of air temperature on drying kinetics and quality characteristics of osmo-treated jumbo squid (*Dosidicus gigas*). *Food Science and Technology*, v.44, n.1, p.16-23, 2011.

VERA, C.M.; MENDOZA, M.G.V.; ESPINOSA, H.; CABALLERO, F. Moisture Diffusion Coefficient of Amaranth Seeds determined by the Regular Regime Method. *Biosystems Engineering*, v.92, n.4, p.439-443, 2005.



VERMA, L.R.; BUCKLIN, R. A.; J. B.; ENDAN, J.B.; WRATTEN, F.T. Effects of drying air parameters on rice drying models. *Transactions of the ASAE*, v.28, n.1, p.296-301, 1985.

YAGCIOGLU, A.; DEGIRMENCIOGLU, A.; CAGATAY, F. *Drying characteristics of laurel leaves under different conditions*. In: Bas Cetincelik A, editor. Proceedings of the seventh international congress on agricultural mechanization and energy, 26-27 May, Adana, Turkey. Faculty of Agriculture, Cukurova University; 1999. p. 565-9.

WANG, C. Y.; SINGH, R. P. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. *Transaction of ASAE*, St. Joseph, v.11, n.78, p.668-672, 1978.

## CONTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DOS GRÃOS DE PINHÃO-MANSO DURANTE A SECAGEM

Resumo: Objetivou-se com o presente trabalho determinar o diâmetro geométrico e ajustar diferentes modelos matemáticos aos valores experimentais da contração volumétrica dos grãos de pinhão-manso submetidos à secagem em seis condições de ar. O experimento foi desenvolvido no Instituto Federal Goiano (*Campus* Rio Verde). Os grãos com teor de água inicial de 0,61 (kg de água/kg de matéria seca), aproximadamente, foram submetidos à secagem em estufa com circulação de ar forçada nas temperaturas de 36, 45, 60, 75, 90 e 105 °C, até atingirem o teor de água de  $0,11 \pm 0,006$  (kg de água/kg de matéria seca). Aos dados experimentais, foram ajustados cinco modelos matemáticos utilizados para representação da contração volumétrica dos produtos agrícolas. Os modelos foram analisados por meio do coeficiente de determinação, do erro médio relativo, do erro médio estimado e da distribuição de resíduos. Os dados do diâmetro geométrico foram submetidos à análise de regressão, adotando-se o nível de 1% de significância. Conclui-se que o teor de água e a temperatura de secagem influenciam na contração volumétrica dos grãos de pinhão-manso, sendo este fenômeno satisfatoriamente descrito pela equação Polinomial, e que o diâmetro geométrico se reduz linearmente com a redução do teor de água, independentemente da condição de secagem.

Palavras chave: modelos matemáticos, teor de água, modelo Polinomial.

## VOLUMETRIC SHRINKAGE IN JATROPHA SEEDS DURING DRYING

**Abstract:** The objective of this study was to determine the geometric diameter of volumetric shrinkage in *Jatropha* seeds subjected to drying under six air conditions and to fit different mathematical models to the experimental values. The experiment was conducted at the Federal Institute of Goiás (Rio Verde *Campus*). Seeds with an approximate initial moisture content of 0.61 (kg water/kg dry weight) were dried in a convection oven at temperatures of 36, 45, 60, 75, 90, or 105 °C until they reached a moisture content of  $0.11 \pm 0.006$  (kg water / kg dry matter). The experimental data were fitted to five mathematical models used to represent volumetric shrinkage in agricultural products. The models were analyzed using the coefficient of determination, mean relative error, mean estimated error, and residual distribution. Geometric diameter data

were subjected to regression analysis by adopting a 1% level of significance. It was concluded that moisture content and drying temperature influence volumetric shrinkage in *Jatropha* seeds, a phenomenon satisfactorily described by the polynomial equation, where the geometric diameter linearly decreased with a reduction of the moisture content, regardless of the drying conditions.

Keywords: mathematical models, moisture content, polynomial model

## INTRODUÇÃO

Com a crise atual do petróleo, os estudos com combustíveis alternativos intensificaram-se, e o biodiesel reaparece como uma das soluções imediatas, podendo ser produzido por meio de óleos vegetais e óleos de origem animal (Goldfarb et al., 2010). Entre as plantas que apresentam potencial para a produção de biodiesel, está o pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.). Souza et al. (2009) observaram uma concentração média de  $40,33 \pm 1,91$  % de lipídeos na matéria seca de sementes de pinhão-manso.

A distribuição geográfica do pinhão-manso é bastante vasta devido à sua rusticidade, resistência a longas estiagens, a pragas e doenças, sendo adaptável a condições edafoclimáticas muito variáveis, além da produção de óleo com todas as qualidades necessárias para ser transformado em biodiesel (Santos et al. 2009). Embora o pinhão-manso seja uma planta que tenha capacidade de se adaptar às mais diversas condições, práticas de cultivo são essenciais para um bom desenvolvimento da planta e, conseqüentemente, para obter alta produtividade.

Entre as etapas pós-colheita, a secagem assume uma enorme importância pois está diretamente relacionada com a qualidade final do produto, podendo promover danos irreversíveis aos grãos. Segundo Resende et al. (2005), a redução do teor de água dos grãos, além de influenciar diretamente nas suas propriedades físicas, provoca seu encolhimento, sendo este fenômeno conhecido por contração volumétrica. A contração volumétrica pode ser muito intensiva dependendo do método e das condições de secagem (Krokida & Maroulis 1997), afetando os parâmetros da transferência de calor e massa, devendo ser considerada no estabelecimento de modelos de secagem (Ramos et al. 2003; Corrêa et al. 2006).

O índice de contração volumétrica determina a relação entre o volume dos grãos para cada teor de água e o volume inicial. É de fundamental importância durante o processo de secagem em secadores, pois permite prever o comportamento de redução

do volume ocupado pela massa de grãos, conforme ocorre à redução do teor de água da mesma.

No desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamentos utilizados para a secagem de grãos, são de fundamental importância a simulação e a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto durante a remoção da água (Resende et al. 2010). Para a simulação, cujo princípio se fundamenta na secagem de sucessivas camadas delgadas do produto, utiliza-se um modelo matemático que representa, satisfatoriamente, sua perda de água durante o período de secagem (Berbert et al. 1995; Giner & Mascheroni 2002).

Segundo Midilli et al. (2002), existem três tipos de modelos de secagem em camada delgada que visam a descrever a cinética de secagem de produtos agrícolas: o modelo teórico, que considera apenas a resistência interna, a transferência de calor e a água entre o produto e o ar quente; os modelos semiteóricos; e os empíricos, que consideram somente a resistência interna, a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem.

Os modelos empregados para representar a secagem dos produtos agrícolas, na grande maioria, foram desenvolvidos, negligenciando-se a contração volumétrica do produto durante o processo de desidratação (Brooker et al. 1992). Segundo Ramos et al. (2005) e Carmo & Lima (2004), as modificações no produto referentes à sua contração volumétrica também devem ser incluídas nos modelos para uma completa descrição, precisão e análise do fenômeno de secagem.

Diante do destaque da cultura do pinhão-manso como oleaginosa e da falta de informações teóricas a respeito do comportamento dos grãos dessa cultura durante o processo de secagem, objetivou-se com o presente trabalho ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais da contração volumétrica, identificar o que melhor representa o fenômeno e determinar o diâmetro geométrico dos grãos de pinhão-manso submetidos à secagem em seis 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 (IF Goiano – *Campus* Rio Verde).

Os frutos de pinhão-manso foram colhidos manualmente no município de Porangatu, GO. Posteriormente, procedeu-se ao beneficiamento manual dos grãos. Os grãos de pinhão-manso, com teor de água inicial de 0,61 (kg de água/kg de matéria seca), foram submetidos à secagem em estufa com ventilação de ar forçada em cinco condições de temperatura: 36, 45, 60, 75, 90 e 105 °C, que promoveram as respectivas umidades relativas: 31,7; 19,6; 9,4; 4,8; 2,6 e 1,5 %. Os grãos foram mantidos na estufa até atingirem o teor de água de  $0,11 \pm 0,006$  (kg de água/kg de matéria seca), determinado em estufa a  $105 \pm 1^\circ\text{C}$ , durante 24 horas, em três repetições (Brasil, 2009).

Foram utilizados 20 grãos de pinhão-manso, individualizados em cápsulas de alumínio, com dimensões de 60,12 mm de diâmetro e 41,0 mm de altura, e periodicamente os grãos foram medidos nas três posições (comprimento, largura e espessura), com o auxílio de um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm. A redução do teor de água foi acompanhada por meio da pesagem de três bandejas com 300 g de produto mantidas nas mesmas condições de secagem, às quais os 20 grãos foram submetidos.

Para avaliação da secagem dos grãos de pinhão-manso, procedeu-se à determinação da taxa de redução de água do produto de acordo com a expressão descrita por Corrêa et al. (2001):

$$\text{TRA} = \frac{\text{Ma}_0 - \text{Ma}_i}{\text{Ms} \cdot (t_i - t_0)} \quad (1)$$

em que:

TRA : taxa de redução de água ( $\text{kg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ );

$\text{Ma}_0$  : massa de água total anterior (kg);

$\text{Ma}_i$  : massa de água total atual (kg);

$\text{Ms}$  : matéria seca (kg);

$t_0$  : tempo total de secagem anterior (h); e

$t_i$  : tempo total de secagem atual (h).

O índice de contração volumétrica dos grãos de pinhão-manso durante a secagem foi determinado pela relação entre o volume do grão para cada teor de água ( $V$ ) e o volume inicial ( $V_o$ ), como mostrado a seguir:

$$\Psi = \frac{V}{V_o} \quad (2)$$

em que:

$\psi$ : índice de contração volumétrica, decimal;

V: volume em cada teor de água,  $\text{mm}^3$ ; e

$V_0$ : volume inicial,  $\text{mm}^3$ .

O volume de cada grão ( $V_g$ ) em  $\text{mm}^3$  foi obtido ao longo do processo de secagem de acordo com a expressão proposta por Mohsenin (1986):

$$V_g = \frac{\pi \cdot A \cdot B \cdot C}{6} \quad (3)$$

em que:

$V_g$ : Volume do grão em  $\text{mm}^3$ ;

A: maior eixo do grão em mm;

B: eixo médio do grão em mm; e

C: menor eixo do grão em mm.

As dimensões características dos eixos ortogonais dos grãos de pinhão-manso foram determinadas com o grão na posição natural de repouso, como ilustrado na Figura 1.

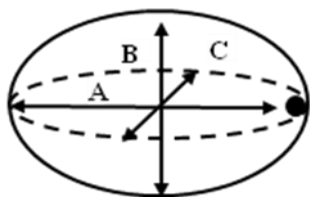


Figura 1. Desenho esquemático do grão de pinhão-manso, considerado esferoide, com suas dimensões características.

O diâmetro geométrico ( $D_g$ ) de cada grão foi obtido ao longo do processo de secagem de acordo com a expressão proposta por Mohsenin (1986):

$$D_g = (A \cdot B \cdot C)^{1/3} \quad (4)$$

Aos dados experimentais do índice de contração volumétrica unitária, foram ajustados os modelos descritos pelas expressões listadas na Tabela 1.

Tabela 1. Modelos utilizados para simular o índice de contração volumétrica de produtos agrícolas.

Referência	Modelo
Corrêa et al. (2004) – (Cor.)	$\psi = 1/(a_1 + b \cdot \exp(X))$ (5)
Exponencial – (Exp.)	$\psi = a_1 \cdot \exp(b \cdot X)$ (6)
Linear – (Lin.)	$\psi = a_1 + a_2 \cdot X$ (7)
Polinomial – (Pol.)	$\psi = a_1 + a_2 \cdot X + a_3 \cdot X^2$ (8)
Bala & Woods (1984) modificado – (B. e W. mod.)	$\psi = 1 - a_1 [1 - \exp[-a_2 (X_1 - X)]]$ (9)

em que:

$\psi$ : índice de contração volumétrica;

$X$ : teor de água do produto, (kg de água/kg de matéria seca);

$X_1$ : teor de água inicial do produto, (kg de água/kg de matéria seca);

$a_1, a_2, a_3$ : coeficientes do modelo.

Os modelos matemáticos foram ajustados por meio de análise de regressão não linear pelo método Gauss-Newton, utilizando um programa estatístico. Os modelos foram selecionados considerando a magnitude do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), do qui-quadrado ( $\chi^2$ ), a magnitude dos erros médios relativo (P) e estimado, além da verificação do comportamento da distribuição dos resíduos. Considerou-se o valor do erro médio relativo inferior a 10% como um dos critérios para seleção dos modelos, de acordo com Mohapatra & Rao (2005).

Os erros médios relativo e estimado, para cada um dos modelos, foram calculados conforme as seguintes expressões:

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (10)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (11)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR} \quad (12)$$

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 experimentais menos o número de coeficientes do modelo).

Para a avaliação do diâmetro geométrico, o experimento foi montado em esquema fatorial, tendo como fatores as diferentes temperaturas e os teores de água. Os dados foram submetidos à análise de variância e regressão, adotando-se o nível de 5% de significância, com o auxílio do programa aplicativo SISVAR 5.3, segundo Ferreira (2008). Aliado a essas análises estatísticas, empregou-se o teste do erro médio relativo para validar o modelo empregado.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 estão apresentados os valores médios da taxa de remoção de água dos grãos de pinhão-manso submetidos ao processo de secagem em seis condições de temperatura, sendo o maior valor observado para a secagem na temperatura de 105 °C, apresentando uma magnitude de  $0,1728 \text{ kg.kg}^{-1}.\text{h}^{-1}$ . Segundo Resende et al. (2009), com o decorrer do processo de secagem, a taxa de redução de água diminui pois a água se encontra fortemente ligada, necessitando de maior energia para sua evaporação. No entanto, verifica-se na Figura 2 que a taxa de redução de água aumenta em alguns momentos, principalmente nas temperaturas de 36 e 45 °C, sendo esse comportamento devido à maior distância entre os intervalos de leitura.

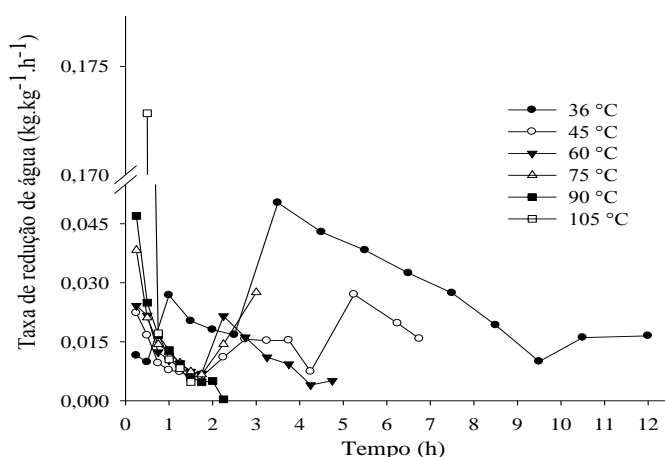


Figura 2. Taxa de redução de redução de água dos grãos de pinhão-manso submetidos à secagem em seis condições de ar.

Ainda na Figura 2, observa-se que o período de taxa de redução de água dos grãos de pinhão-manso foi de 1,5; 2,25; 3,0; 4,75; 6,75 e 12,0 horas para as temperaturas de secagem de 105, 90, 75, 60, 45 e 36 °C, respectivamente, que



correspondeu ao tempo necessário para que os grãos atingissem o teor de água de  $0,11 \pm 0,006$  (kg de água/kg de matéria seca). Logo, o aumento da temperatura promove a redução no tempo de secagem dos grãos de pinhão-manso, uma vez que maiores temperaturas promovem um maior gradiente de umidade entre o grão e o ar de secagem, fato observado por diversos pesquisadores para inúmeros produtos agrícolas (Akpinar et al. 2003; Lahsasni et al. 2004; Mohapatra & Rao 2005; Resende et al. 2008; Sirisomboon & Kitchaiya 2009; Ullmann et al. 2010).

Na Tabela 2 estão apresentados os valores do erro médio relativo estimado (SE), erro médio relativo (P) e do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para os modelos ajustados ao índice de contração volumétrica dos grãos de pinhão-manso submetidos à secagem em diferentes condições de temperatura.

Tabela 2. Coeficientes de determinação ( $R^2$ , %), erros médio relativo (P, %) e estimado (SE, decimal) para os cinco modelos analisados, durante a contração volumétrica dos grãos de pinhão-manso nas diversas condições de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )		Modelos				
		Cor.	Exp.	Lin.	Pol.	B. e W. mod.
36	SE (decimal)	0,005	0,005	0,005	0,005	0,006
	P (%)	0,477	0,448	0,442	0,457	0,516
	$R^2$ (%)	98,4	98,4	98,3	98,5	97,9
45	SE (decimal)	0,006	0,008	0,009	0,007	0,006
	P (%)	0,553	0,675	0,702	0,583	0,535
	$R^2$ (%)	96,7	94,6	94,0	96,5	96,7
60	SE (decimal)	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
	P (%)	0,331	0,331	0,343	0,320	0,313
	$R^2$ (%)	98,9	98,9	98,7	99,1	99,0
75	SE (decimal)	0,010	0,006	0,006	0,004	0,006
	P (%)	0,845	0,584	0,524	0,347	0,528
	$R^2$ (%)	94,3	97,4	97,8	98,9	97,5
90	SE (decimal)	0,010	0,006	0,006	0,005	0,006
	P (%)	0,869	0,592	0,537	0,248	0,531
	$R^2$ (%)	95,1	97,7	98,1	98,7	97,9
105	SE (decimal)	0,009	0,006	0,005	0,002	0,006
	P (%)	0,665	0,455	0,411	0,135	0,391
	$R^2$ (decimal)	95,9	98,0	98,3	99,8	98,2

Em relação aos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) referentes aos modelos matemáticos ajustados, nota-se que apenas os modelos Polinomial e Bala e Woods modificado apresentam valores superiores a 96%, sendo necessário a avaliação de

outros parâmetros como o erro médio estimado e o erro médio relativo e a distribuição dos valores residuais para a escolha do modelo que descreva o fenômeno da contração volumétrica satisfatoriamente.

Verifica-se que, para os modelos analisados, o erro médio estimado (SE), que descreve o valor do desvio padrão da estimativa, se apresenta com uma pequena variação entre os modelos e as respectivas temperaturas em estudo. Contudo, o modelo Polinomial e Bala e Woods modificado são os que apresentam os menores valores do SE para todas as condições de secagem. Vale salientar que, quanto menor for o valor do SE, melhor será a qualidade do ajuste do modelo em relação aos dados experimentais. Ainda na Tabela 2, nota-se que os modelos apresentaram valores de erro médio relativo entre 0,135 e 0,869%. Segundo Mohapatra & Rao (2005), valores do erro médio relativo inferiores a 10% indicam uma representação adequada do fenômeno. Logo, todos os modelos atendem a este critério, no entanto, assim como nas outras avaliações, os que mais se destacaram foram o modelo Polinomial e Bala e Woods modificado.

Na Tabela 3 estão apresentados os dados da distribuição de resíduos para os modelos estudados. Verifica-se que os modelos Exponencial e Linear apresentaram distribuição tendenciosa para todas as condições estudadas e que o modelo Polinomial apresentou mais condições de secagem com distribuição aleatória, comportamento este desejado para descrição do índice de contração volumétrica dos produtos agrícolas.

Tabela 3. Distribuição dos resíduos ( $A_L$  = aleatória;  $T_D$  = tendenciosa) para os modelos analisados, durante a contração volumétrica dos grãos de pinhão-manso nas diversas condições de temperatura.

Modelos	Temperatura (°C)					
	36	45	60	75	90	105
Corrêa et al. (2004)	$T_D$	$T_D$	$A_L$	$T_D$	$T_D$	$T_D$
Exponencial	$T_D$	$T_D$	$T_D$	$T_D$	$T_D$	$T_D$
Linear	$T_D$	$T_D$	$T_D$	$T_D$	$T_D$	$T_D$
Polinomial	$T_D$	$T_D$	$A_L$	$A_L$	$T_D$	$A_L$
Bala & Woods (1984) modificado	$T_D$	$T_D$	$A_L$	$T_D$	$T_D$	$T_D$

Na Figura 3 estão apresentadas as ilustrações da distribuição dos resíduos, aleatória para o modelo polinomial e tendenciosa para o modelo de Corrêa et al. (2004), durante a modelagem da contração volumétrica dos grãos de pinhão-manso submetidos à secagem na temperatura de 105 °C.

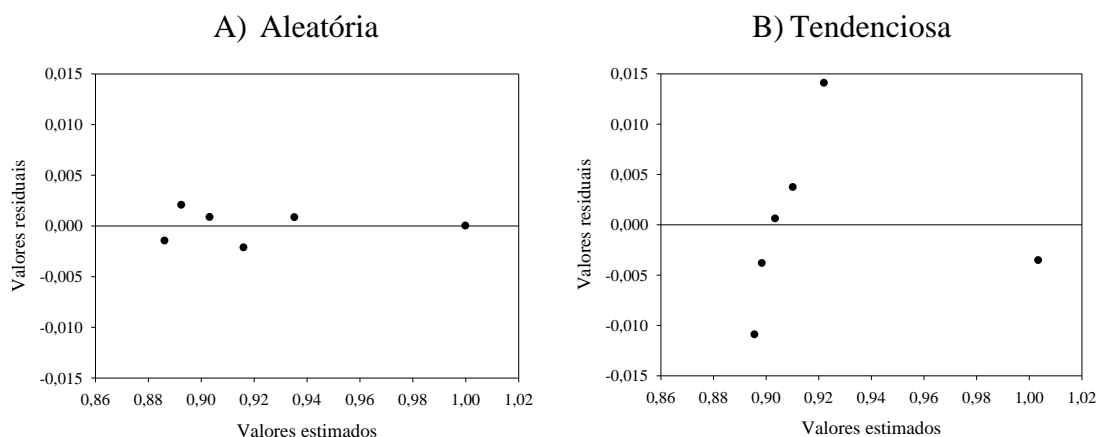


Figura 3. Ilustração da distribuição dos resíduos: A) Aleatória para o modelo Polinomial; B) Tendenciosa para o modelo de Corrêa et al. (2004); durante a modelagem da contração volumétrica dos grãos de pinhão-mansão.

Um modelo é considerado aleatório se os valores residuais se encontrarem próximos à faixa horizontal em torno de zero e também não formarem figuras definidas, não indicando tendenciosidade dos resultados. Se apresentar distribuição tendenciosa, o modelo é considerado inadequado para representar o fenômeno em questão (Goneli 2008).

Na Tabela 4 estão apresentados os valores de qui-quadrado obtidos para os diferentes modelos ajustados aos valores experimentais da contração volumétrica dos grãos de pinhão-mansão. Verifica-se que os cinco modelos analisados se encontraram no intervalo de confiança de 99%. Entretanto, de uma forma geral, o modelo polinomial foi o que apresentou os menores valores de qui-quadrado. Quanto menor o valor do qui-quadrado, melhor o ajuste do modelo (Akpınar et al. 2003; Midilli & Kucuk 2003; Günhan et al. 2005).

Tabela 4. Valores de qui-quadrado calculado para os modelos utilizados na representação da contração volumétrica dos grãos de pinhão-mansão.

Modelos	Temperatura (°C)					
	36	45	60	75	90	105
Cor.	0,000031	0,000046	0,000019	0,000103	0,000103	0,000090
Exp.	0,000031	0,000074	0,000019	0,000047	0,000047	0,000043
Lin.	0,000034	0,000082	0,000023	0,000038	0,000039	0,000035
Pol.	0,000031	0,000052	0,000017	0,000021	0,000030	0,000004
B. W. mod.	0,000041	0,000045	0,000018	0,000044	0,000043	0,000039

A análise dos dados indica que o modelo Polinomial se mostrou adequado para a descrição matemática do fenômeno de contração volumétrica unitária dos grãos de pinhão-mansão, apresentando um alto coeficiente de determinação ajustado e valores

reduzidos dos erros médios relativo e estimado, aliado a isso foi o modelo que apresentou condições de secagem com a distribuição aleatória dos resíduos. Afonso Junior et al. (2003) também observaram que o modelo polinomial descreveu de forma satisfatória a contração volumétrica dos frutos de café ao longo da secagem.

Na Tabela 5 estão apresentados os coeficientes do modelo polinomial ajustados aos dados experimentais da contração volumétrica unitária dos grãos de pinhão-manso submetidos à secagem em diferentes temperaturas. Nota-se que os coeficientes do modelo polinomial não apresentam uma tendência clara em função da temperatura de secagem. Sendo assim, a contração volumétrica unitária dos grãos de pinhão-manso durante a secagem ocorre de forma diferenciada entre as temperaturas avaliadas, como pode ser observado na Figura 4.

Tabela 5. Coeficientes do modelo de Polinomial ajustados para a contração volumétrica dos grãos de pinhão-manso nas diferentes condições de secagem.

Coeficientes	Temperatura (°C)					
	36	45	60	75	90	105
a <sub>1</sub>	0,837 <sup>**</sup>	0,852 <sup>**</sup>	0,838 <sup>**</sup>	0,831 <sup>**</sup>	0,831 <sup>**</sup>	0,848 <sup>**</sup>
a <sub>2</sub>	0,188 <sup>**</sup>	0,066 <sup>ns</sup>	0,185 <sup>**</sup>	0,378 <sup>**</sup>	0,356 <sup>**</sup>	0,386 <sup>**</sup>
a <sub>3</sub>	0,096 <sup>ns</sup>	0,252 <sup>**</sup>	0,110 <sup>*</sup>	-0,175 <sup>*</sup>	-0,138 <sup>ns</sup>	-0,226 <sup>*</sup>

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

Os valores da contração volumétrica unitária, experimentais e estimados pelo modelo polinomial, estão apresentados na Figura 4. Verifica-se que a contração volumétrica foi de 0,147; 0,151; 0,145; 0,132; 0,140 e 0,115 para as temperaturas de 36, 45, 60, 75, 90 e 105°C, respectivamente. Nota-se que para as temperaturas mais altas, 105, 90 e 75 °C, a contração volumétrica foi menor, principalmente para os grãos submetidos à secagem a 105 °C. Nesta temperatura houve uma elevada taxa de redução de água no início da secagem, ocasionando um enrijecimento do tegumento que dificultou a contração dos grãos.

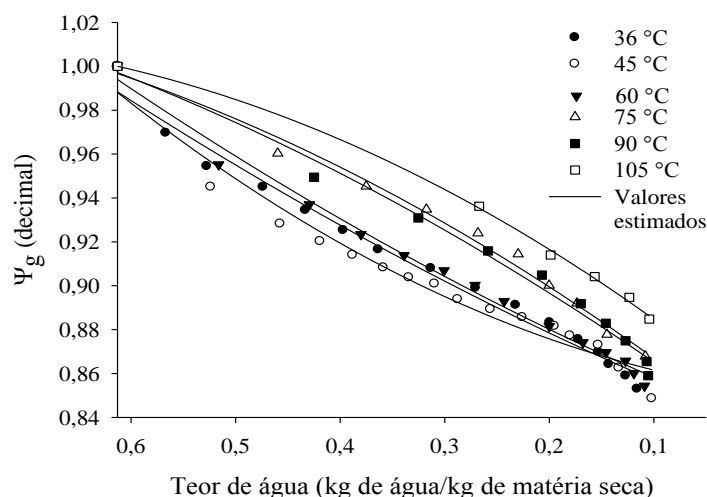


Figura 4. Valores da contração volumétrica unitária ( $\psi_g$ ) dos grãos de pinhão-mansinho, experimentais e estimados pelo modelo Polinomial, em função da redução do teor de água.

Na Figura 5 estão apresentados os valores do diâmetro geométrico dos grãos de pinhão-mansinho submetidos à secagem em diversas condições de temperatura. Observa-se que, com o processo de secagem, o diâmetro geométrico se reduziu de 12,26; 12,35; 12,27; 12,16; 12,31 e 12,20 mm para 11,77; 11,74; 11,70; 11,54; 11,80 e 11,56 mm, para as temperaturas de 105, 90, 75, 60, 45 e 36 °C, respectivamente. Logo, as diferentes condições de secagem praticamente não promoveram alterações na redução do diâmetro geométrico. Sirisomboon & Kitchaiya (2009) verificaram que o diâmetro geométrico dos grãos de pinhão-mansinho foi de 9,92; 9,37 e 9,97 mm, quando submetidos à secagem nas temperaturas de 80, 60 e 40 °C, respectivamente. As divergências nos valores do diâmetro geométrico podem estar relacionadas com a variedade dos grãos e o manejo adotado durante o cultivo da planta e/ou no processo de secagem.

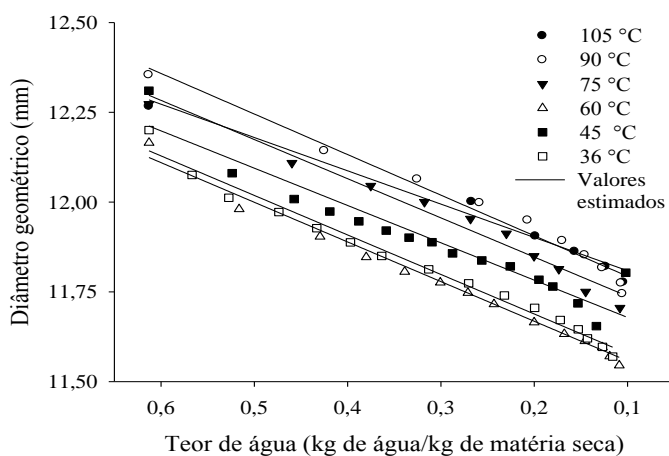


Figura 5. Diâmetro geométrico dos grãos de pinhão-mansinho submetidos a diversas condições de secagem.

Na Tabela 6, são apresentados os modelos lineares ajustados aos dados experimentais do diâmetro geométrico dos grãos de pinhão-manso em função do teor de água. Observa-se que os modelos apresentaram alto grau de significância de acordo com o teste F e baixos valores de erro médio relativo. Assim, descrevem de forma satisfatória o comportamento da variável analisada. Esses resultados concordam com aqueles encontrados por Razavi et al. (2007), trabalhando com castanhas e grãos de pistachio.

Tabela 6. Equações ajustadas aos valores do diâmetro geométrico dos grãos de pinhão-manso em função do teor de água.

Temperatura (°C)	Modelo	R <sup>2</sup> (%)	P (%)
105	$D_g = 0,927Ta + 11,71$	98,0 <sup>**</sup>	0,15
90	$D_g = 1,130Ta + 11,68$	97,7 <sup>**</sup>	0,19
75	$D_g = 1,091Ta + 11,62$	97,4 <sup>**</sup>	0,19
60	$D_g = 1,104Ta + 11,44$	99,1 <sup>**</sup>	0,11
45	$D_g = 1,039Ta + 11,57$	94,6 <sup>**</sup>	0,27
36	$D_g = 1,100Ta + 11,46$	98,4 <sup>**</sup>	0,15

<sup>\*\*</sup> Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste F.

## CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que o teor de água e a temperatura de secagem influenciam na contração volumétrica dos grãos de pinhão-manso, sendo este fenômeno satisfatoriamente descrito pela equação polinomial, e o diâmetro geométrico se reduz linearmente com a redução do teor de água, independentemente da condição de secagem.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFONSO JUNIOR, P.C.; CORRÊA, P.C.; PINTO, F.A.C.; SAMPAIO, C.P. Shrinkage evaluation of five different varieties of coffee berries during the drying process. *Biosystems Engineering*, v.86, n.4, 481-485, 2003.

AKPINAR, E.K.; BICER, Y.; YILDIZ, C. Thin layer drying of red pepper. *Journal of Food Engineering*, v.59, n1, p.99-104, 2003.

- AKPINAR, E. K.; BICER, Y.; MIDILLI, A. Modeling and experimental study on drying of apple slices in a convective cyclone dryer. *Journal of Food Process Engineering*, v.26, n.6, p.515-541, 2003.
- BALA, B.K.; WOODS, J.L. Simulation of deep bed malt drying. *Journal Agricultural Engineering Research*, New York, v.30, n.3, p.235-244, 1984.
- 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.167-173, 1995.
- BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de defesa Agropecuária. *Regras para análise de sementes*. Brasília, 2009. 395p.
- 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.
- CARMO, J. E. F.; LIMA, A. G. B. *Drying of lentils including shrinkage: a numerical simulation*. In: 14th INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM, 2004, São Paulo. Proceeding of the 14th International Drying Symposium, Ourograf, São Paulo, 2004, v. A, p. 510-517.
- CORRÊA, P. C.; MACHADO, P. F.; ANDRADE, E. T. Cinética de secagem e qualidade de grãos de milho-pipoca. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 25, n. 1, p. 134-142, 2001.
- CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; GONELI, A.L; BOTELHO, F.M.; NOGUEIRA, B.L. Determinação do coeficiente de difusão líquida dos grãos de feijão. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v.8, n.2, p.117-126, 2006.
- CORRÊA, P.C.; RIBEIRO, D.M.; RESENDE, O.; AFONSO JÚNIOR, P.C.; GONELI, A.L. *Mathematical modelling for representation of coffee berry volumetric shrinkage*. In: Proceeding of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004). São Paulo. Brazil, v.A, p.742-747, 2004.
- FERREIRA, D.F. SISVAR: um programa para análises estatísticas e ensino de estatística. *Revista Symposium*, v.6, n.2, p.36-41, 2008.

- GINER, S.A.; MASCHERONI, R.H. Diffusive drying kinetics in wheat, Part 2: applying the simplified analytical solution to experimental data. *Postharvest Technology*, v.81, n.1, p.85-97, 2002.
- GOLDFARB, M.; DUARTE, M.E.M.; MATA, M.E.R.M. Armazenamento criogênico de sementes de pinhão manso (*Jatropha curcas* L.) Euphorbiaceae. *Revista Biotemas*, v.23, n.1, p.27-33, 2010.
- GONELI, A.L.D. *Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade de mamona (Ricinus communis L.) durante a secagem e o armazenamento*. 2008. 186 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.
- 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.
- KROKIDA, M.K.; MAROULIS, Z.B. Effect of drying method on shrinkage and porosity. *Drying Technology*, v.15, n.10, p.2441-2458, 1997.
- LAHSASNI, S.; KOUHILA, M.; MAHROUZ, M.; JAOUHARI, J.T. Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). *Journal of Food Engineering*, v.2, n.61, p.173-179, 2004.
- MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z.A. A new model for single-layer drying. *Drying technology*, v.20, n.7, p.1503-1513, 2002.
- MIDILLI, A.; KUCUK, H. Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energy Conversion and Management*, v.44, n.7, p.1111-1122, 2003.
- 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.
- MOHSENIN, N.N. *Physical properties of plant and animal materials*. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841p.
- RAMOS, I. N.; BRANDÃO, T. R. S.; SILVA, C. L. M. Structural changes during air drying of fruits and vegetables. *Food Science and Technology International*, v.9, n.3, p.201-206, 2003.



RAMOS, I.N.; BRANDÃO, T.R.S.; SILVA, C.L.M. Integrated approach on solar drying, pilot convective drying and microstructural changes. *Journal of Food Engineering*, v.67, n.1, p.195-203, 2005.

RAZAVI, S.M.A.; EMADZADEH, B.; RAFE, A.; AMINI, A.M. The physical properties of pistachio nut and kernel as a function of moisture content and variety: Part I. Geometrical properties. *Journal of Food Engineering*, v.81, n.1, p.209-217, 2007.

RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; CECON, P.R. Forma, tamanho e contração volumétrica do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) Durante a secagem. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v.7, n.1, p.15-24, 2005.

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.

RESENDE, O.; ARCANJO, R. V.; SIQUEIRA, V. C.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática para a secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de concreto. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v.31, n.2, p.189-196, 2009.

RESENDE, O.; RODRIGUES, S.; SIQUEIRA, V. C.; ARCANJO, R. V. Cinética da secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de chão batido. *Revista Acta Amazonica*, v.40, n.2, p.247-256, 2010.

SANTOS, S.B.; MARTINS, M.A.; CARVALHO, F.M.; CARNEIRO, A.C.O. *Determinação de algumas propriedades físicas dos grãos de pinhão manso (Jatropha curcas L.)* In: DI LEO, N.; MONTICO, S.; NARDÓN, G. *Avances en Ingeniería Rural: 2007 - 2009*. Rosario: UNR Editora, 2009, p.1067-1072.

SIRISOMBOON, P.; KITCHAIYA, P. Physical properties of *Jatropha curcas* L. kernels after heat treatments. *Biosystems Engineering*, v.102, n.2, p.244-250, 2009.

SOUZA, A.D.V.; FÁVARO, S.P.; ÍTAVO, L.C.V.; ROSCOE, R. Caracterização química de sementes e tortas de pinhão-manso, nabo-forrageiro e crambe. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.44, n.10, p.1328-1335, 2009.

ULLMANN, R.; RESENDE, O.; SALES, J.F.; CHAVES, T.H. Qualidade das sementes de pinhão manso submetidas à secagem artificial. *Revista Ciência Agronômica*, v.41, n.3, p.442-447, 2010.

## CONCLUSÃO GERAL

Com a redução do teor de água, há um decréscimo na porosidade, na massa de 1000 grãos e nas massas específicas aparente e unitária dos grãos de pinhão-mansão, não sendo possível identificar um comportamento diferenciado com o aumento das temperaturas utilizadas.

A redução do teor de água e as condições de secagem promovem alterações na forma e diminuem o tamanho dos grãos de pinhão-mansão.

Os modelos de Midilli e Dois Termos são adequados para a representação do fenômeno da secagem dos grãos de pinhão-mansão e, entre estes, recomenda-se o modelo de Midilli para a descrição do fenômeno devido à sua maior simplicidade.

O coeficiente de difusão efetivo dos grãos de pinhão-mansão aumenta com a elevação da temperatura do ar.

A inclusão da contração volumétrica promove um melhor ajuste do modelo da difusão líquida para a secagem dos grãos de pinhão-mansão.

O teor de água e a temperatura de secagem influenciam na contração volumétrica dos grãos de pinhão-mansão, sendo este fenômeno satisfatoriamente descrito pela equação polinomial, e o diâmetro geométrico se reduz linearmente com a redução do teor de água, independentemente da condição de secagem.