



PIBIC/CNPq/UFPG-2009

## **CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E HIGROSCÓPICAS DOS GRÃOS DE FEIJÃO PRETO E BRANCO**

**Maria Eduarda R. de Rangel Moreira Cavalcanti<sup>1</sup>, Francisco de Assis Santos e Silva<sup>2</sup>,  
Mário Eduardo R. M. Cavalcanti Mata<sup>2</sup>, Maria Elita Martins Duarte<sup>2</sup>, Vanucia Santos Dias<sup>3</sup>,  
Anna Sylvania R. de Rangel Moreira Cavalcanti<sup>3</sup>**

### **RESUMO**

Os objetivos deste trabalho foram: a) determinar as isotermas de equilíbrio higroscópico do feijão branco e do feijão preto, nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C e umidades relativas do ar de 10 a 90%, e testar 6 modelos matemáticos; b) determinar a variação de tamanho (comprimento, largura e espessura) e do raio da esfera equivalente dos grãos de feijão branco e feijão preto em função do teor de água de 10 a 45%, base úmida. Conclui-se neste trabalho que o modelo de Oswin teve o maior coeficiente de determinação (99,2%) e o modelo de Cavalcanti Mata teve o menor percentual de erro; e que a variação de tamanho (comprimento, largura e espessura) dos grãos de feijão, tanto o feijão preto quanto o feijão branco, crescem de forma linear com o aumento do teor de água.

**Palavras-chave:** semente, teor de umidade de equilíbrio, variação de tamanho

### **PHYSICAL AND HYGROSCOPIC CHARACTERISTICS OF BLACK AND WHITE BEAN GRAINS**

### **ABSTRACT**

The objectives of this study were: a) to determine the hygroscopic equilibrium isotherms of the white bean and black bean, at temperatures of 20, 30, 40 and 50 °C and with air relative humidity from 10 to 90%, and to test 6 mathematical models; b) to determine the variation in size (length, width and thickness) and of the radius of the equivalent sphere of white bean and black bean as a function of moisture content from 10 to 45%, wet basis. It is concluded in this work, that the Oswin model had the largest coefficient of determination (99.2%) and the Cavalcanti Mata model had the lowest percentage of error, and that the variation in size (length, width and thickness) of the white bean and black bean, increase in a linear fashion with the increase of the moisture content.

**Keywords:** seed, equilibrium moisture content, size variation

<sup>1</sup> Aluna de Curso de Desenho Industrial, Centro de Ciências e Tecnologia, UFPG, Campina Grande, PB, E-mail: [dudah@hotmail.com](mailto:dudah@hotmail.com)

<sup>2</sup> Engenheiro Agrícola, Prof. Doutor, Depto. de Engenharia Agrícola, UFPG, Campina Grande, PB, Email: [chaty@yahoo.com](mailto:chaty@yahoo.com); [mmata@deag.ufcg.edu.br](mailto:mmata@deag.ufcg.edu.br); [elita@deag.ufcg.edu.br](mailto:elita@deag.ufcg.edu.br)

<sup>3</sup> Desenhista Industrial, Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola – UFPG, [vanuciadias@yahoo.com.br](mailto:vanuciadias@yahoo.com.br); [paramiachar@hotmail.com](mailto:paramiachar@hotmail.com)

## INTRODUÇÃO

Entre as espécies de plantas, os grãos de fabáceas são fontes de energia e nutrientes. Dentre essas espécies, os feijões do gênero *Phaseolus* são os que apresentam maior importância econômica.

De acordo com a (FAO, 2008), nos últimos anos, o Brasil tem ocupado o primeiro lugar na produção e no consumo do feijão, *Phaseolus vulgaris*. Esse grão, além de se constituir em um dos alimentos básicos da população brasileira, é uma das principais fontes de proteína, na dieta alimentar. No Brasil o feijão é amplamente consumido, principalmente pelos estratos sociais economicamente menos favorecidos, apesar do consumo “per capita” ter caído de 19 kg/hab/ano na década de 90 para 16 kg/hab/ano na presente década, possivelmente pelo processo de urbanização e as mudanças nos hábitos alimentares (CONAB, 2006; WANDER, 2007).

Constantes pesquisas são realizadas no Brasil em relação ao desenvolvimento de novas variedades, tentando resolver problemas de ordem tecnológica como variedades resistentes a doenças e com características nutricionais mais efetivas ao desenvolvimento humano. Um dos problemas nutricionais do feijão diz respeito a baixa digestibilidade das proteínas e aos baixos teores de aminoácidos sulfurados (PEREIRA; COSTA, 2002).

GENOVESE (2001) menciona que a qualidade proteica é ainda influenciada pela presença de fatores antinutricionais, que se encontram presentes em diferentes teores de acordo com a variedade do feijão. Contudo, efeitos também são atribuídos para alguns destes compostos no tratamento de enfermidades como diabetes, doenças cardiovasculares e câncer do cólon (MANISHA et al., 2003). Contudo, determinados constituintes do feijão, como fibras, taninos, fitatos e inibidores de amilase, correlacionam-se inversamente com a digestão de carboidratos e resposta glicêmica (ANDERSON, 1999).

O feijão preto é o mais consumido no Brasil para confeccionar a feijoada que é o prato mais tradicional da culinária brasileira, no entanto não é o mais produzido. Recentemente tem-se verificado o consumo do feijão branco que tem apresentado maior digestibilidade. De acordo com LUJÁN et al. (2008) foi observado que o feijão preto (variedade Diamante Negro), apesar de apresentar um teor de tanino maior quando comparado com o feijão branco (Variedade Ouro Branco), apresenta digestibilidade verdadeira semelhante, confirmando o fato de que o tratamento com calor não só reduz o teor de taninos, mas melhora a digestibilidade das proteínas do feijão.

Na medida em que novas variedades de feijão vão surgindo no mercado existe a necessidade de realizar novas pesquisas no sentido de conhecer algumas de suas características físicas como: forma, tamanho, esfericidade, entre outras, que são importantes para o dimensionamento de máquinas, principalmente para as separadoras de impurezas ou mesmo as classificadoras de sementes por tamanho.

Outro conhecimento importante são as isotermas de equilíbrio higroscópico, pois estão diretamente relacionados aos problemas de armazenagem e secagem de grãos (CAVALCANTI MATA, 1997). Segundo o mesmo autor o teor de água de equilíbrio higroscópico é relevante no estudo da secagem de grãos porque determina o teor de água até o qual os grãos podem ser secos sob condições estabelecidas de secagem. Para determinadas condições de secagem, dadas pela temperatura e umidade relativa do ar, existe um teor de água de equilíbrio do produto. O diferencial entre o teor de água inicial do produto a ser seco e a Teor de água de equilíbrio ( $X_i - X_e$ ) é definido como o potencial de secagem.

BROOKER *et alii* (1992) e CAVALCANTI MATA et al. (2006) definem teor de água de equilíbrio como o teor de água (massa de água por unidade de massa total, em base úmida, ou massa de água por unidade de massa seca, em base seca) que um produto atinge quando é submetido, por um tempo suficientemente longo, em condições controladas de temperatura (T) e umidade relativa do ar (UR), ou ainda, o grão está higroscopicamente em equilíbrio com o ar ambiente em que se encontra, quando a tensão de vapor d'água for igual à tensão de vapor d'água do ar ambiente, sendo que, para cada espécie e/ou variedade de grão, a tensão de vapor interna tem um valor característico para cada temperatura.

Quando se quer conservar um produto por determinado tempo o meio mais tradicional até o presente utilizado no mundo é a sua desidratação parcial, ou seja, uma certa quantidade de água é retirada do produto de modo a inibir a sua atividade biológica.

O processo que opera essa retirada de determinada quantidade de água do interior de um produto é denominado “secagem”. Esta operação de ordem física envolve fenômenos de transferência de calor e massa, e para tal fim, algumas propriedades físicas do produto devem ser conhecidas, como o coeficiente de condutividade e difusividade térmica além do coeficiente de transferência externa de calor e massa. No caso de determinação do coeficiente de difusão é necessário conhecer também o tamanho da partícula e sua variação com o teor de umidade, além de sua proximidade com uma forma geométrica regular.

Portanto, diante do acima relatado os objetivos deste trabalho foram:

- Determinar a variação de tamanho (comprimento, largura e espessura), volume e da esfericidade dos grãos de feijão branco e feijão preto em função do teor de água de 10 a 45%, base úmida.
- Determinar as curvas de equilíbrio higroscópico (sorção e dessorção) dos grãos de feijão preto e do feijão branco às temperaturas de 10, 20, 30, 40, e 50 °C e umidades relativas do ar variando de 10 a

90% , além de determinar os coeficientes para as equações de Henderson, Henderson modificada por Thompson, Henderson modificada por Cavalcanti Mata, Oswin, Sigma-Copace e Chung-Pfost.

## MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Processamento e Armazenagem de Produtos Agrícolas da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola, do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande.

Para a realização desta pesquisa foram utilizadas sementes de feijão de preto (variedade Diamante Negro) e feijão branco (Ouro branco), plantado junto a agricultores locais do município de Campina Grande - Estado da Paraíba.

O feijão foi colhido com um teor de umidade em torno de 45% base seca (b.s.) e, ainda na vagem, foi levado ao laboratório sendo seco à temperatura ambiente até atingir um teor de água em torno de 35% (b.s.), quando foi procedida a debulha manual. O material, assim obtido, foi subdividido em 2 lotes: a) 5 kg para cada variedade de feijão para obtenção do teor de água de equilíbrio por dessorção e b) 5 kg para determinação das características físicas das sementes.

### Determinação das características físicas

#### Forma e tamanho das sementes de feijão

Foram selecionadas 2000 semente de feijão com teor de água de 45% base seca, descartando-se impurezas, sementes quebradas, pequenas sementes e outras sementes. O material foi subdividido em etapa sucessivas em um separador ELO até a obtenção de um grupo de 60 sementes subdividida em 3 grupos constituindo as repetições.

Parte do material restante (40 g) foi utilizado para determinação do teor de umidade na estufa a 105 °C por 24 h.

Depois de pesado o material e de posse do conhecimento do teor de água inicial desejado (45% base úmida), as sementes foram projetadas segundo suas áreas frontal, lateral e de repouso com auxílio de um retroprojetor 3M (Figura 1). A projeção foi desenhada e estabelecida sua escala. Neste desenho foi determinado o comprimento, a largura e a espessura das sementes de feijão com auxílio de um paquímetro digital Stanley com precisão de 0,01 mm. Nestas mesmas sementes fez-se o acompanhamento da perda de peso e assim que estas atingissem o outro teor de água desejado foi realizado novo processo de medição. As determinações das variações de comprimento, largura e espessura das sementes de feijão foram feitas para os teores de umidade de 45, 40, 35, 30, 25, 20, 15 e 10 %, base seca.

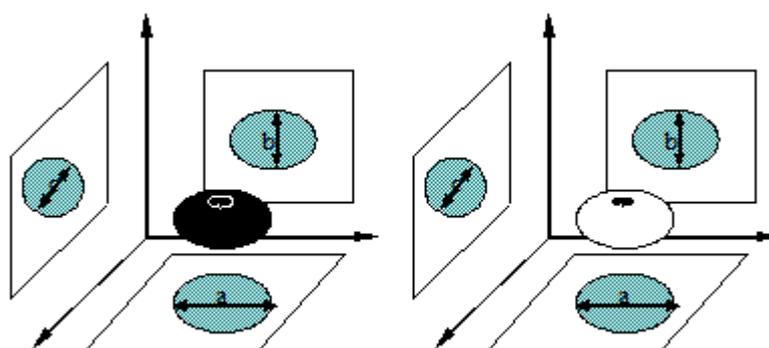


Figura 1. Determinação das dimensões e esfericidade dos grãos de feijão preto e feijão branco

Para determinar a esfericidade foi utilizada a equação 2, proposta MOHSENIN (1978), considerando o objeto como um elipsóide e sendo o seu volume igual a  $V_{elip} = 4/3.\pi.(r_1.r_2.r_3)$  , em que  $r_1$  é o maior raio,  $r_2$  é o raio médio e  $r_3$  o menor raio e ainda levando em consideração que  $a = 2.r_1$ ,  $b = 2.r_2$  e  $c = 2.r_3$  :

$$E = \left[ \frac{\text{Volume do sólido}}{\text{Volume da esfera circunscrita}} \right]^{\frac{1}{3}} = \left[ \frac{4/3.\pi.\left(\frac{a}{2}.\frac{b}{2}.\frac{c}{2}\right)}{4/3.\pi.\left(\frac{a}{2}\right)^3} \right]^{\frac{1}{3}} = \frac{(a.b.c)^{\frac{1}{3}}}{a} \quad (\text{Eq. 2})$$

## Equilíbrio higroscópico

Os 5 kg de grãos de feijão e de feijão branco foram acondicionados em sacos plásticos subdivididos de 100 em 100 gramas. Para o acondicionamento das sementes (teor de água de 45% b.s.) utilizou-se três sacos sobrepostos para evitar troca de umidade com o ambiente e foram armazenados em congelador a uma temperatura de, aproximadamente,  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a fim de manter as características do feijão até a instalação do experimento.

## Determinação dos teores de água de equilíbrio

Os teores de água de equilíbrio das sementes foram determinados por meio do método estático, utilizando-se diferentes concentrações de ácido sulfúrico para uma faixa de umidade relativa de 10 a 90%, Tabela 1, (BROOKER et al., 1992). Os testes foram conduzidos às temperaturas de 10, 20, 30, 40 e  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$   $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Para tanto, serão utilizadas cinco câmaras CETEC tipo B.O.D., com a finalidade de manter as amostras às temperaturas e umidades relativas desejadas.

Amostras de aproximadamente 60 gramas foram colocadas em pequenas cestas de arame e suspensas por um anel de vidro sobre soluções de ácido sulfúrico nas diferentes concentrações. As cestas com as sementes de feijão serão colocadas no interior de recipientes de vidro hermeticamente fechados. A capacidade do recipiente era de 1,6 L, contendo 250 mL de solução de ácido sulfúrico com aproximadamente 96 GL. e densidade  $1,835 \pm 0,001$  (Figura 2).

Tabela 1 - Diferentes concentrações de ácido sulfúrico para estabelecer no interior dos recipientes as umidades relativas do ar para as temperaturas entre 10 e  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Temperatura $^{\circ}\text{C}$	Concentrações de ácido sulfúrico (%)				
	Umidade relativa (%)				
	10	30	50	70	90
10	66,9	52,4	41,4	31,1	19,4
20	66,9	52,4	41,4	31,1	19,4
30	70,0	53,3	41,4	31,1	19,4
40	72,3	54,0	42,1	31,2	19,4
50	73,5	54,7	42,6	31,9	20,1

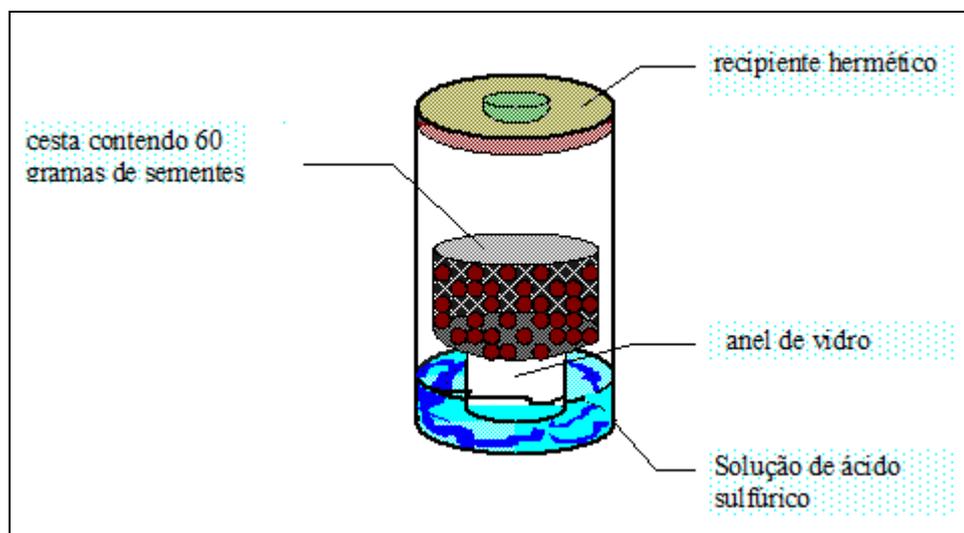


Figura 2 - Recipiente hermético utilizado na determinação da umidade de equilíbrio.

Para se obter dados do teor de água de equilíbrio higroscópico das sementes de feijão branco e feijão preto, foram colocadas amostras (para cada variedade de feijão) de feijão em 5 (cinco) recipientes, contendo 5 (cinco) diferentes concentrações de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) em cada câmara, correspondente a cada temperatura desejada, com duas repetições. Isso implica num total de 10 (dez recipientes no interior de cada câmara, distribuídos aleatoriamente).

As cestas com as amostras foram pesadas de dois em dois dias até o 6<sup>o</sup> (sexto) dia depois de ter sido montado o experimento e depois deste prazo, foram feitas pesagens a cada vinte e quatro horas, até que a

variação da massa da amostra fosse inferior ou igual a 0,001g. Para este propósito foi utilizada uma balança analítica Mettler modelo PC 400, com precisão de 0,001g.

A amostra em equilíbrio foram subdividida em 3 (três) sub-amostras e seus teores de água determinados pelo método de estufa, a  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , durante 24 horas.

As equações utilizadas para modelar os dados experimentais foram:

### Modelo de Henderson

$$(1 - UR) = \exp [-a T (Xe^b)] \quad (\text{Eq. 3})$$

em que,

T - temperatura,  $^{\circ}\text{C}$ ;

Xe - teor de água de equilíbrio, decimal base seca

UR - Umidade relativa do ar

a e b - constantes do modelo de Henderson

### Modelo de Thompson

$$(1 - UR) = \exp [-a_1 (T + c_1) \cdot (Xe^{b_1})] \quad (\text{Eq. 4})$$

em que,

$a_1$ ,  $b_1$  e  $c_1$  - são constantes do modelo de Thompson

### Modelo de Cavalcanti Mata

Esta equação se baseia na equação de Henderson onde o autor diz que a correção da temperatura é de ordem potencial e não linear conforme a equação de Thompson

$$(1 - UR) = \exp [-a_2 \cdot T^{c_2} \cdot (Ue^{b_2})] \quad (\text{Eq. 5})$$

em que,

$a_2$ ,  $b_2$  e  $c_2$  - constantes do modelo de Thompson

### Modelo de Oswin

$$X_e = (a_3 + b_3 T) \left( \frac{UR}{1 - UR} \right)^{c_3} \quad (\text{Eq. 6})$$

em que,

$a_3$ ,  $b_3$  e  $c_3$  - constantes do modelo de Oswin

### Modelo de Sigma Copace

$$X_e = \exp(a_4 + b_4 T + c_4 \exp(UR)) \quad (\text{Eq. 7})$$

em que,

$a_4$ ,  $b_4$  e  $c_4$  - constantes do modelo de Sigma Copace

### Modelo de Chung-Pfost

$$\ln(UR) = -\frac{a_5}{RT} \exp(a_6 X_e) \quad (\text{Eq. 8})$$

em que,

$a_5$ ,  $a_6$  são coeficientes da Chung-Pfost

### Análise Estatística

Os dados obtidos experimentalmente foram submetidos a uma análise de regressão não linear usando o programa computacional STATISTICA 8.0, onde será usado os métodos numéricos de Rosenbrock e quasi-Newton e de Hooke-Jeeves e quasi-Newton.

## Erros experimentais

Para avaliar o ajuste de cada equação, foi determinado o desvio percentual médio (Eq. 1) e os coeficiente de determinação.

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(X_{i\text{exp}} - X_{i\text{teor}})}{X_{i\text{exp}}} \quad (\text{Eq. 9})$$

em que,

$X_{\text{exp}}$  - valores obtidos experimentalmente

$X_{\text{teor}}$  - valores preditos pelo modelo

N - número de dados experimentais

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 e na Figura 3 encontram-se os valores das dimensões (comprimento, largura e espessura) do feijão branco e do feijão preto para os teores de água de 10 a 45 % base seca, onde se observa que existe um comportamento linear de aumento dessas dimensões das sementes dos feijões com o aumento do teor de água. Constata-se também que o maior aumento se dá no comprimento que aumenta na ordem de 31,06% no feijão branco e de 15,07% no feijão preto. Esse comportamento também foi observado por diversos autores como AIMEIDA et al. (1997) CAVALCANTI MATA et al. (1986) e CAVALCANTI MATA (1997).

**Tabela 2.** Dimensões do feijão branco e feijão preto em função do seu teor de água

Teor de água (%, base seca)	Produto					
	Feijão Branco			Feijão Preto		
	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
45	20,55 ± 2,26	9,595 ± 0,806	7,395 ± 0,743	13,026 ± 0,958	8,133 ± 0,512	6,294 ± 0,461
40	19,87 ± 2,09	9,327 ± 0,457	7,189 ± 0,743	12,821 ± 0,879	8,077 ± 0,493	6,192 ± 0,429
35	18,13 ± 2,14	9,012 ± 0,729	7,083 ± 0,743	12,592 ± 0,816	7,995 ± 0,452	6,036 ± 0,412
30	17,98 ± 2,04	8,732 ± 0,608	7,012 ± 0,743	12,269 ± 0,753	7,918 ± 0,406	5,902 ± 0,371
25	17,14 ± 1,57	8,478 ± 0,519	6,953 ± 0,743	11,812 ± 0,667	7,845 ± 0,377	5,719 ± 0,338
20	16,55 ± 1,56	8,126 ± 0,372	6,745 ± 0,743	11,516 ± 0,655	7,731 ± 0,331	5,534 ± 0,291
15	16,03 ± 1,27	7,953 ± 0,519	6,359 ± 0,743	11,371 ± 0,654	7,641 ± 0,291	5,312 ± 0,268
10	15,68 ± 1,05	7,831 ± 0,487	6,252 ± 0,617	11,132 ± 0,644	7,511 ± 0,272	5,102 ± 0,217

ALMEIDA et al. (1980) trabalhando com feijão preto obtiveram valores médios próximos ao desta pesquisa e encontrou os valores de 12,2 mm para o comprimento, 7,7 mm para a largura e 5,2 mm para a espessura, embora os autores não tenham estudado a variação destes parâmetros com o teor de água do produto. CAVALCANTI MATA et al. (1986) estudou esta variação para o feijão mulatinho em função do teor de água de 8,1 a 17 % base úmida e encontrou para este produto, variações para os valores médios de comprimento de 9,9 à 10,76 mm, de 6,28 à 6,88 mm para a largura e de 4,13 à 5,03 mm para a espessura. Isto vem confirmar que a variação das dimensões do produto ao longo de um processo de secagem não deve ser totalmente negligenciado principalmente para secadores de camada estacionária onde não há movimentação de fluxo de grãos ou sementes.

Na Figura 3 constata-se também que os valores dos coeficientes de determinação são superiores no feijão preto quando comparado com os coeficientes obtidos para o feijão branco, indicando uma variabilidade maior das dimensões no feijão branco.

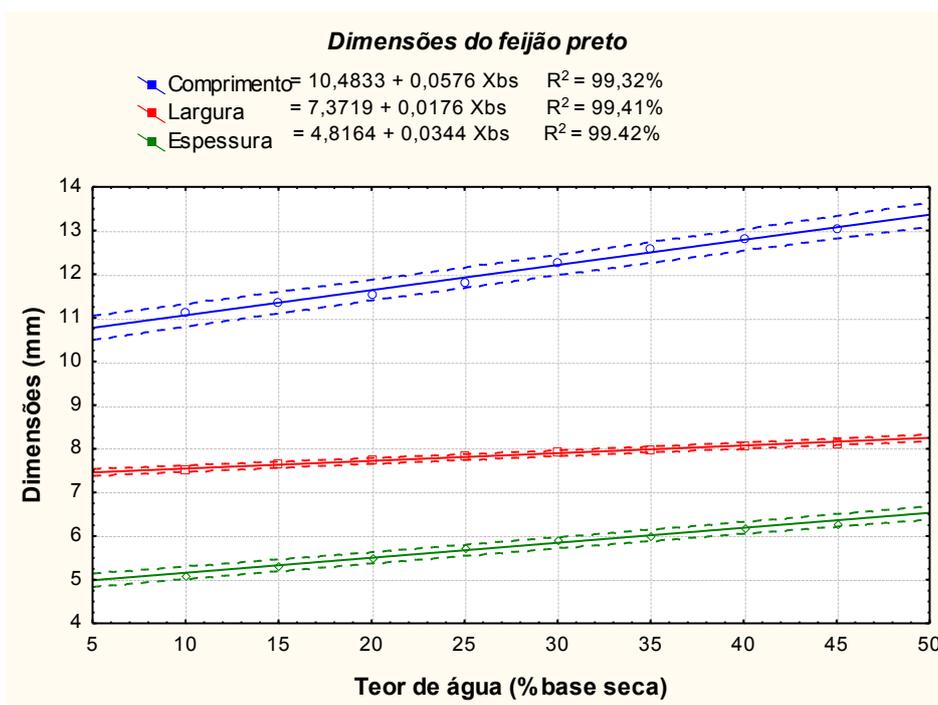
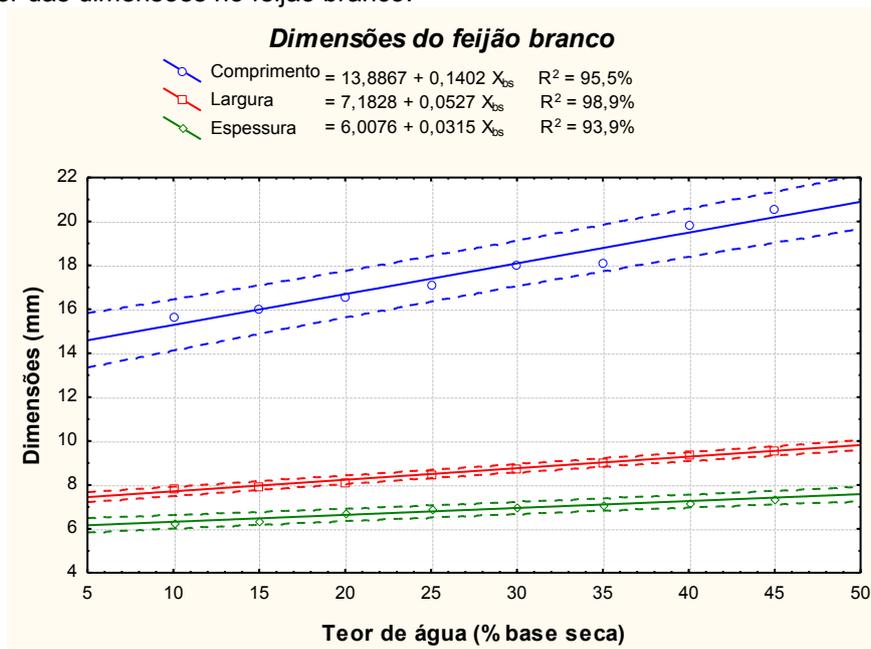


Figura 3. Variação das dimensões do comprimento largura e espessura do feijão branco e do feijão preto em função do seu teor de água.

Nas Tabelas 3 e 4 encontram-se os valores de teor de água de equilíbrio em função da temperatura e da umidade relativa do ar do feijão preto e do feijão branco, respectivamente. Observa-se nestes dados experimentais que a atividade de água cresce com a temperatura e com o aumento do teor de água de produto quer seja o feijão preto quer seja o feijão branco. O referido comportamento está de acordo com os obtidos para a maioria dos produtos higroscópicos como afirma SILVA et al. (2001).

Tabela 3. Valores do teor de água de equilíbrio do feijão branco (decimal) em função da temperatura e da umidade relativa do ar

Umidade Relativa	Teor de água(%b.s.)				
	Temperatura °C				
	10	20	30	40	50
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	8,0	6,8	6,1	5,4	4,6
30	12,0	9,2	8,4	7,6	6,5
50	15,2	13,4	12,6	10,5	8,7
70	18,4	15,0	14,0	13,0	12,0
90	27,1	25,2	23,1	21,7	19,6

Tabela 4. Valores do teor de água de equilíbrio do feijão preto (decimal) em função da temperatura e da umidade relativa do ar

Umidade Relativa	Teor de água(%b.s.)				
	Temperatura °C				
	10	20	30	40	50
0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
10	5,6	4,8	4,5	4,3	4,2
30	8,3	7,5	7,1	6,8	6,7
50	11,6	9,6	9,2	9,1	8,9
70	16,3	14,6	13,9	13,8	13,5
90	26,3	24,8	22,2	20,2	18,4

Na Tabela 5 e 6 estão os valores dos parâmetros estimados obtidos por regressão não linear, dos modelos de Henderson, Thompson, Cavalcanti Mata, Oswin, Sigma-Copace e Chung-Pfost para as isotermas de equilíbrio higroscópico do feijão branco e do feijão preto, respectivamente, bem como os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e os desvios percentuais médios (P). Nessas tabelas verifica-se que o modelo de Oswin foi o que teve um melhor coeficiente de determinação tanto para o feijão branco (99,4%), como para o feijão preto (99,21%), embora o melhor desvio percentual médio tenha sido obtido pelo modelo de Cavalcanti Mata.

Nas Figuras 4 a 6 encontram-se as superfícies de resposta das isotermas de equilíbrio higroscópico do feijão branco para os diferentes modelos estudados, e nas Figuras de 8 a 10, para o feijão preto nos quais se observa que as curvas ajustadas apresentam forma sigmoideal, sendo classificadas como isotermas do tipo II de acordo com a classificação de Brunauer et al., citados por RIVZI (1986).

Nas Figuras 7 e 11 estão os valores calculados versus os valores residuais das curvas de equilíbrio higroscópico das sementes de feijão "branco" e feijão preto, respectivamente ajustados pela equação de Henderson, Thompson, Cavalcanti Mata, Oswin, Sigma-Copace e de Chung-Pfost, onde observa-se que os modelos de Henderson, Thompson, Cavalcanti Mata, Sigma-Copace e de Chung-Pfost tem um comportamento tendencioso e apenas o Modelo de Oswin tem um comportamento aleatório

Este fato reforça o indicativo de que esta equação é a que melhor representa os dados experimentais das isotermas de desorção do feijão preto e do feijão branco.

Observa-se também nos dados experimentais que para o feijão branco para as condições ambientais entre 20 e 30°C e umidade relativa de 70% os valores de teor de água de equilíbrio são de 15% e 14% base seca, situando-se no limite do teor de água adequado a conservação do produto, indicando que as umidades relativas acima deste valor colocam em risco a armazenagem do feijão branco, pois de acordo com CAVALCANTI MATA et al. (2006), acima de um teor de água de 15% base seca a atividade biológica da semente de feijão é intensificada. Para o feijão preto variedade Diamante Negro embora os valores sejam um pouco inferiores essa mesma observação é válida, pois para umidades relativas acima de 70% o valor do teor de água de equilíbrio das sementes dos feijões estudados cresce acentuadamente.

Tabela 5. Parâmetros de ajuste dos modelos testados para as isotermas de equilíbrio higroscópico do feijão branco, coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e desvios percentuais médios (P), nas temperaturas de 10 a 50°C

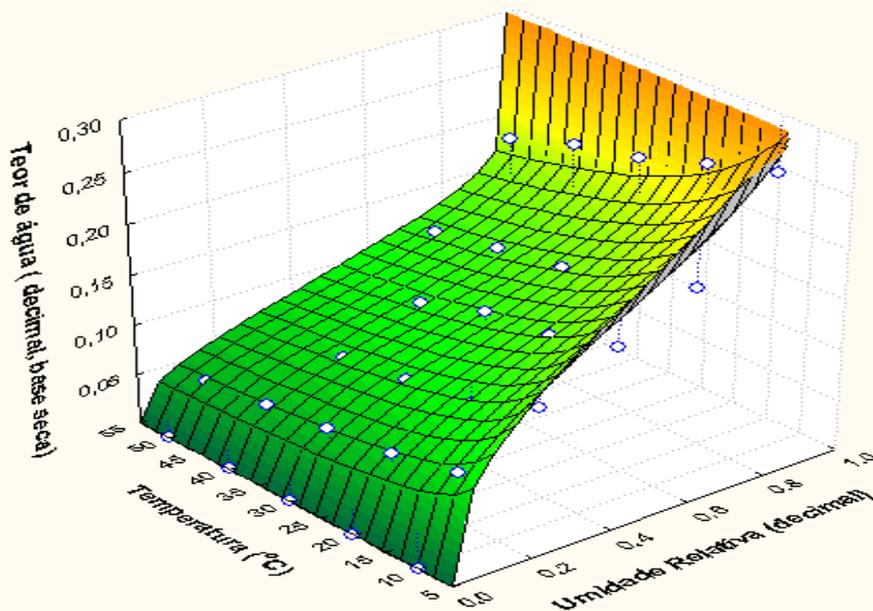
Modelos	Temperatura	Parâmetros				
		a	b	c	$R^2$	P(%)
Henderson	10 a 50°C	-6,0197	0,3825	-	93,4	15,22
Thompson	10 a 50°C	-0,932	24,881	0,491443	97,98	15,08
Cavalcanti Mata	10 a 50°C	11,024	0,4609	0,490951	97,83	9,68
Oswin	10 a 50°C	0,14949	-0,0016	0,30782	99,21	9,85
Sigma-Copace	10 a 50°C	-3,7918	0,009489	1,07061	89,79	17,32
Chung-Pfost	10 a 50°C	-265,5	-22,874	-	97,41	15,71

Tabela 6. Parâmetros de ajuste dos modelos testados para as isotermas de equilíbrio higroscópico do feijão preto, coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e desvios percentuais médios (P), nas temperaturas de 10 a 50 °C

Modelos	Temperatura	Parâmetros				
		a	b	c	$R^2$	P(%)
Henderson	10 a 50°C	-4,901	0,42146	-	88,4	12,21
Thompson	10 a 50°C	-0,3425	53,7598	0,6069	98,7	12,08
Cavalcanti Mata	10 a 50°C	-10,945	0,2918	0,60623	98,6	7,34
Oswin	10 a 50°C	0,1237	$0,75 \cdot 10^{-3}$	0,3652	99,4	8,97
Sigma-Copace	10 a 50°C	-4,221	0,00759	1,2097	93,7	17,24
Chung-Pfost	10 a 50°C	-239,89	-25,198	-	90,8	12,11

### Modelo de Henderson

$$X_e = [ \ln(1-UR)/(-6,0197 T) ]^{0,3825} \quad R^2 = 93,4\%$$



### Modelo de Thompson

$$X_e = [ \ln(1-UR)/(-0,932 (T+24,881) ) ]^{0,491443} \quad R^2 = 97,98\%$$

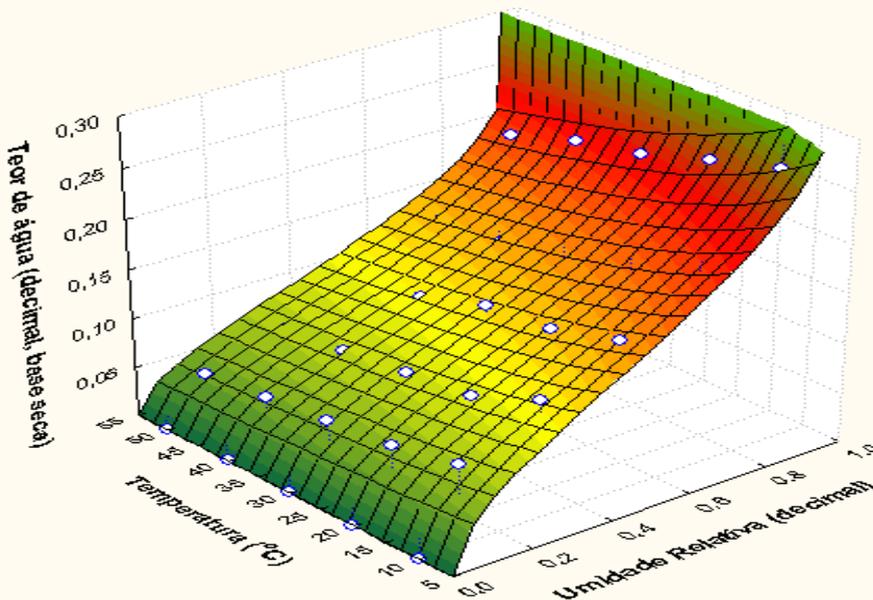
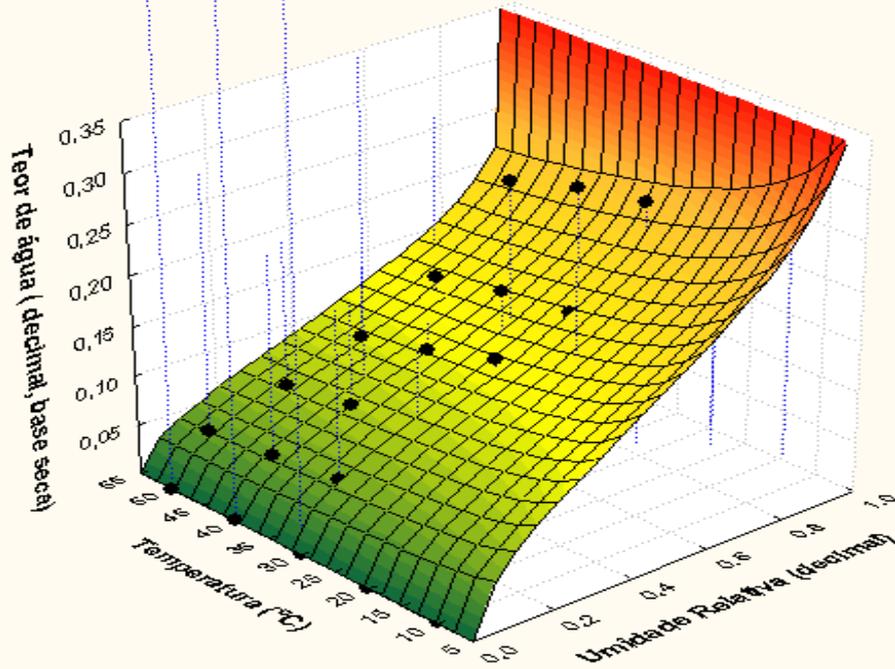


Figura 4 - Dados experimentais e calculados dos teores de água de equilíbrio higroscópico das sementes de feijão “branco” ajustadas pela equação de Henderson e de Thompson - curvas de desorção

### Modelo de Cavalcanti Mata

$$X_e = [\ln(1-UR) / (-11,024 T^{0,4609})]^{0,490951} \quad R^2 = 97,83\%$$



### Modelo de Oswin

$$X_e = (0,14949 - 0,00106 T) (UR/(1-UR))^{0,30782} \quad R^2 = 99,2\%$$

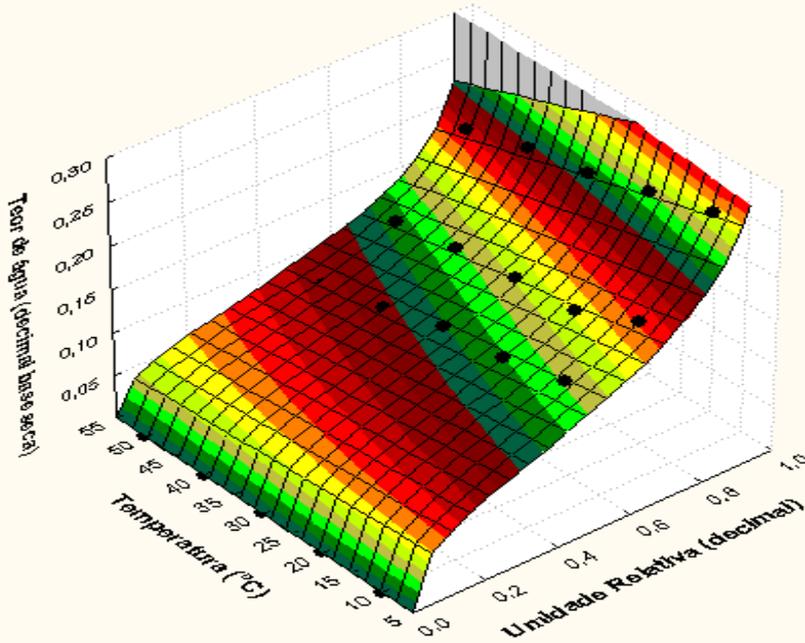
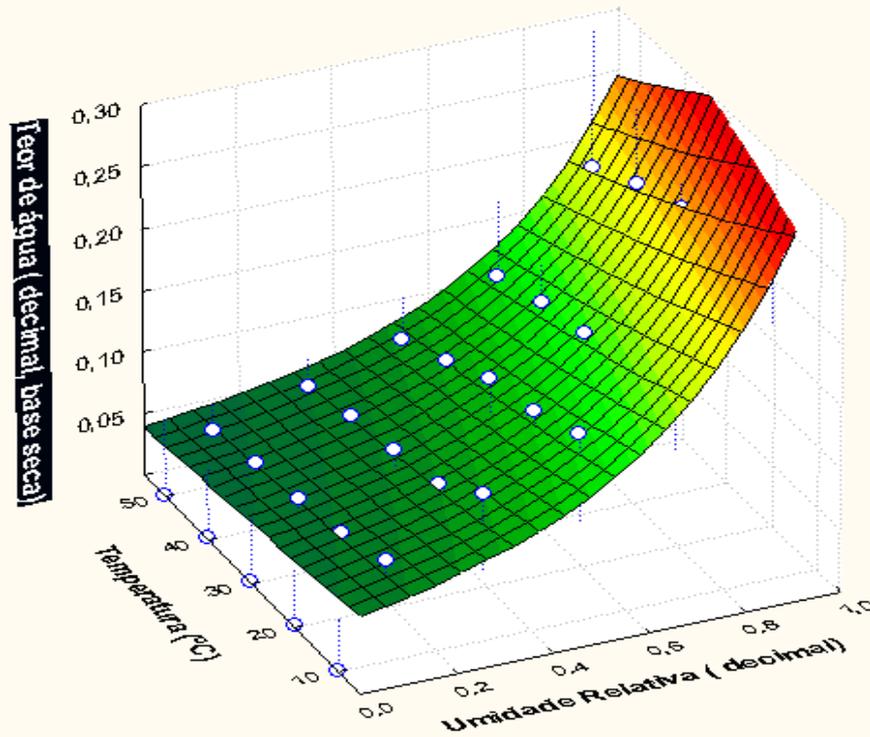


Figura 5. Dados experimentais e calculados dos teores de água de equilíbrio higroscópico das sementes de feijão “branco” ajustadas pela equação de Cavalcanti Mata e de Oswin - curvas de dessorção

## Modelo Sigma Copace

$$X_e = \exp(-3,7918 - 0,009489 T + 1,07061 \exp(UR)) \quad R^2 = 89,79\%$$



## Modelo de Chung- Pfost

$$UR = \exp(-265,5/T \exp(-22,874 X_e)) \quad R^2 = 97,4\%$$

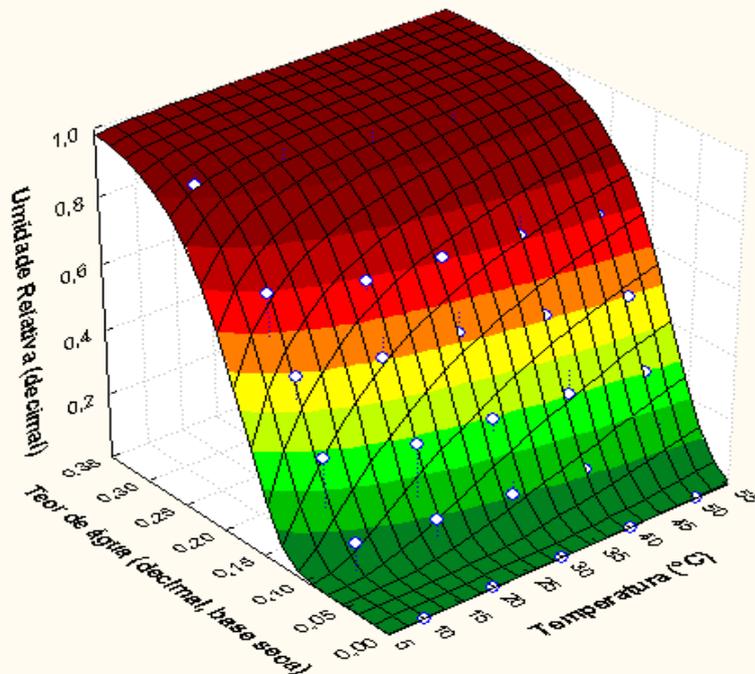


Figura 6. Dados experimentais e calculados dos teores de água de equilíbrio higroscópico das sementes de feijão “branco” ajustadas pela equação de Sigma-Copace e de Chung-Pfost - curvas de dessorção

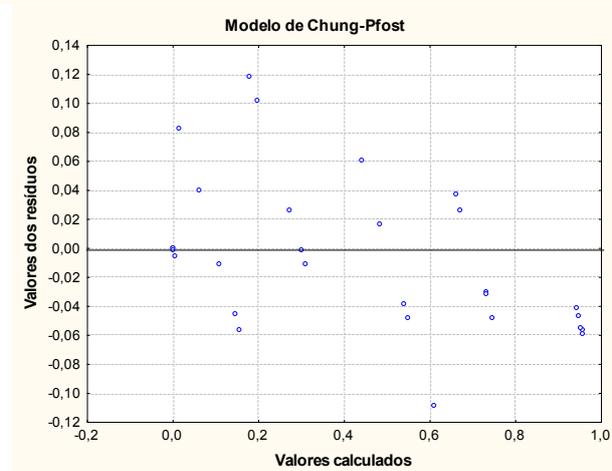
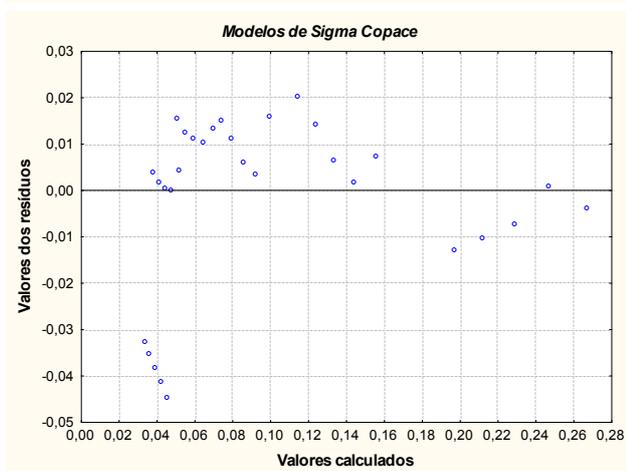
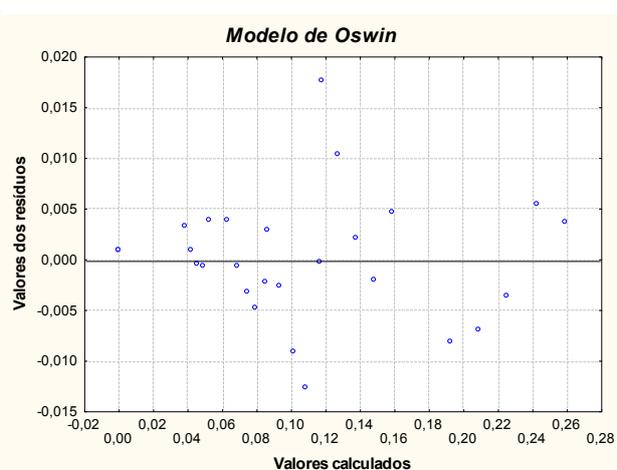
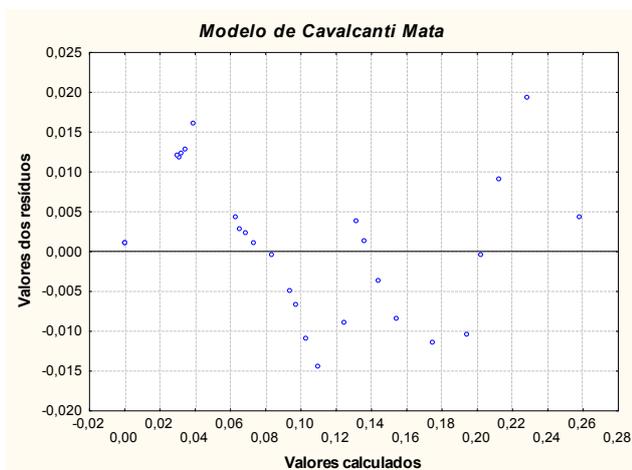
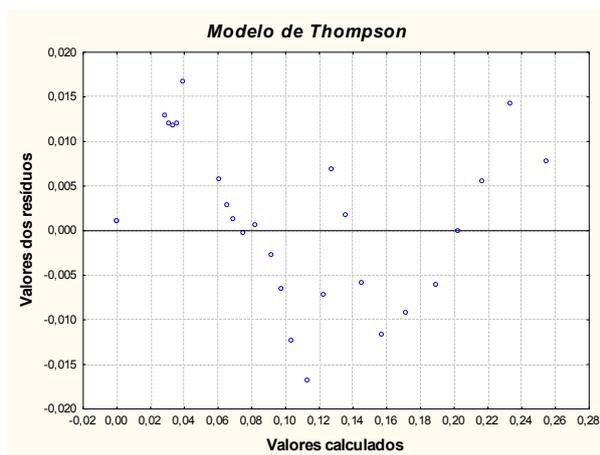
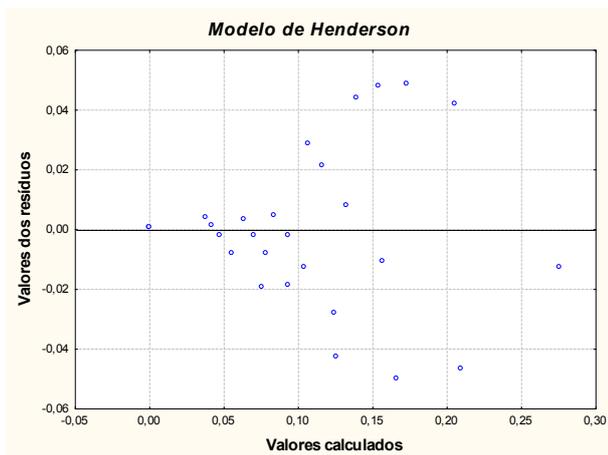
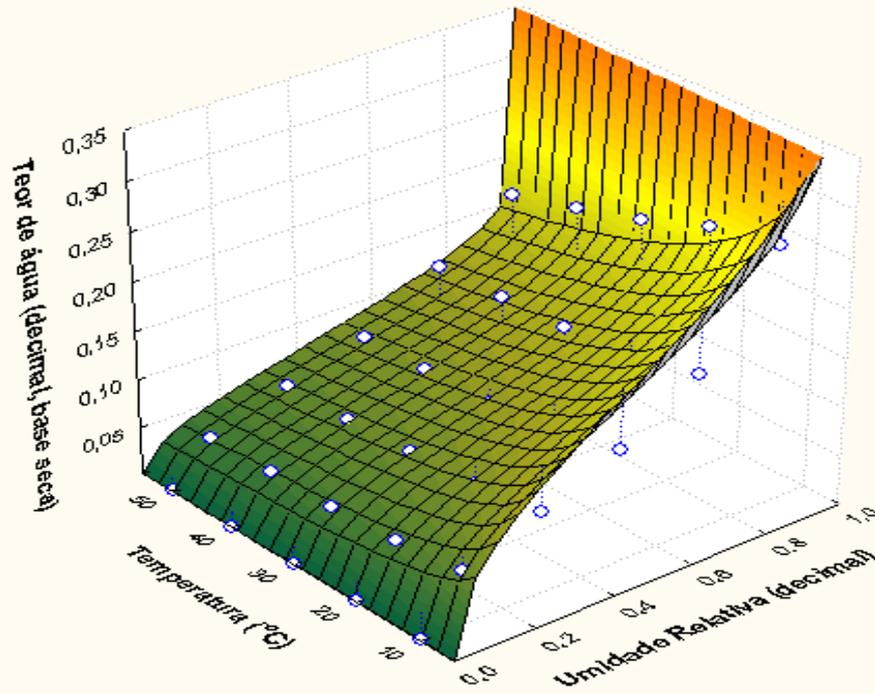


Figura 7. Dados de valores calculados versus valores residuais das curvas de equilíbrio higroscópico das sementes de feijão “branco” ajustadas pela equação de Henderson, Thompson, Cavalcanti Mata, Oswin, Sigma-Copace e de Chung-Pfost - curvas de dessecção

## Modelo de Henderson

$$X_e = [\ln(1-UR) / (-4,901 T)]^{0,42146} \quad R^2 = 88,4\%$$



## Modelo de Thompson

$$X_e = [\ln(1-UR) / (-0,3425 (T+ 53,7598))]^{0,6069} \quad R^2 = 98,7\%$$

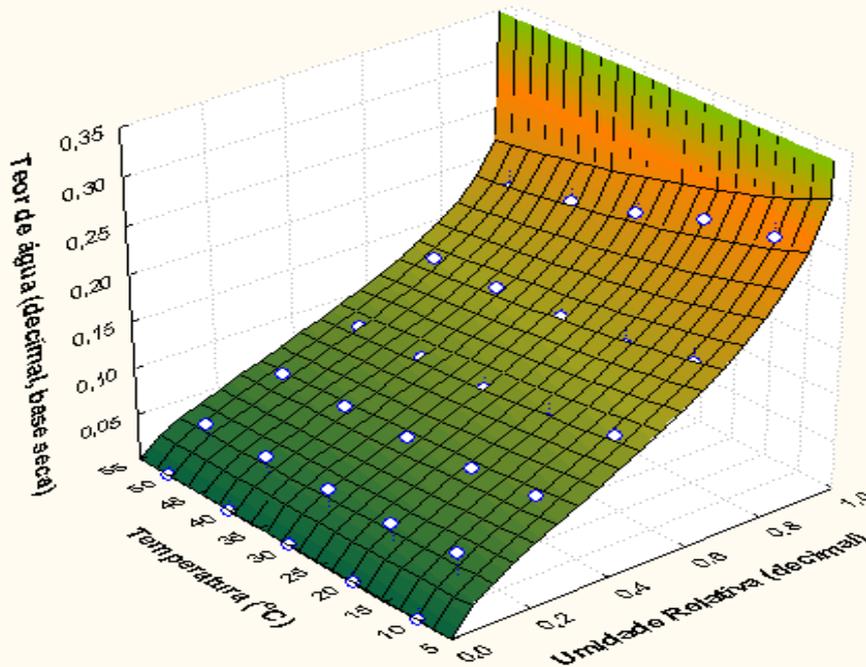
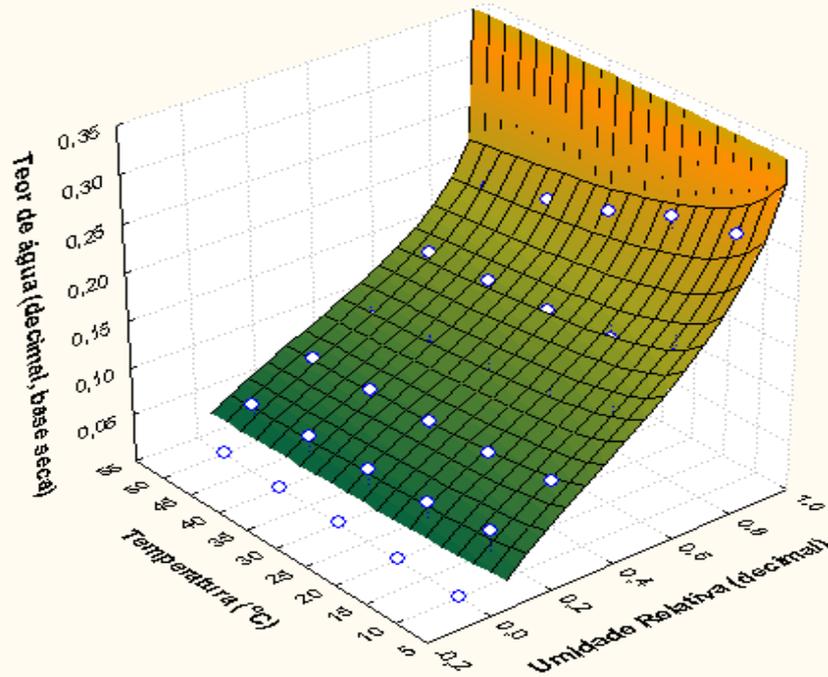


Figura 8. Dados experimentais e calculados dos teores de água de equilíbrio higroscópico das sementes de feijão “preto” ajustadas pela equação de Henderson e de Thompson - curvas de sorção

## Modelo de Cavalcanti Mata

$$X_e = [\ln(1-UR) / (-10,945 T^{0,2918})]^{0,60623} \quad R^2=98,6\%$$



## Modelo de Oswin

$$X_e = (0,1237 - 0,75 \cdot 10^{-3} T) (UR/(1-UR))^{0,3652} \quad R^2 = 99,4\%$$

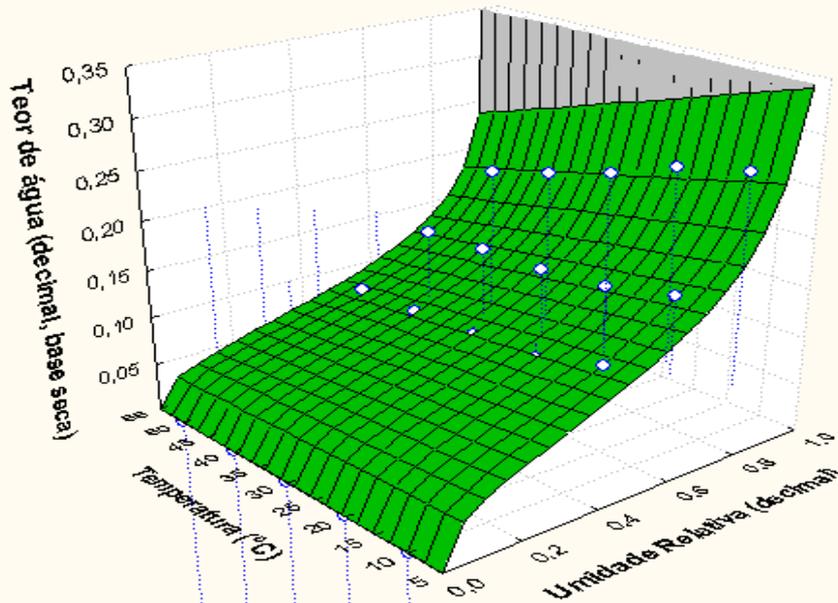
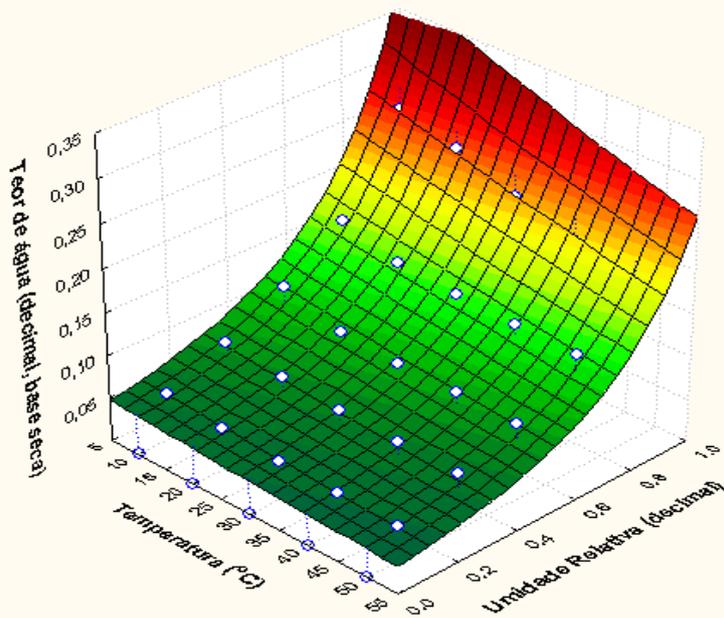


Figura 9. Dados experimentais e calculados dos teores de água de equilíbrio higroscópico das sementes de feijão "preto" ajustadas pela equação de Cavalcanti Mata e de Oswin - curvas de sorção

### Modelo de Sigma Copace

$$Xe = \exp (-4,221 - (0,00759 T) + 1,2097 \exp(UR) ) \quad R^2 = 93,7\%$$



### Modelo de Chung-Pfost

$$UR = \exp (-230,89/T \exp (-25,198 Xe) ) \quad R^2 = 90,8\%$$

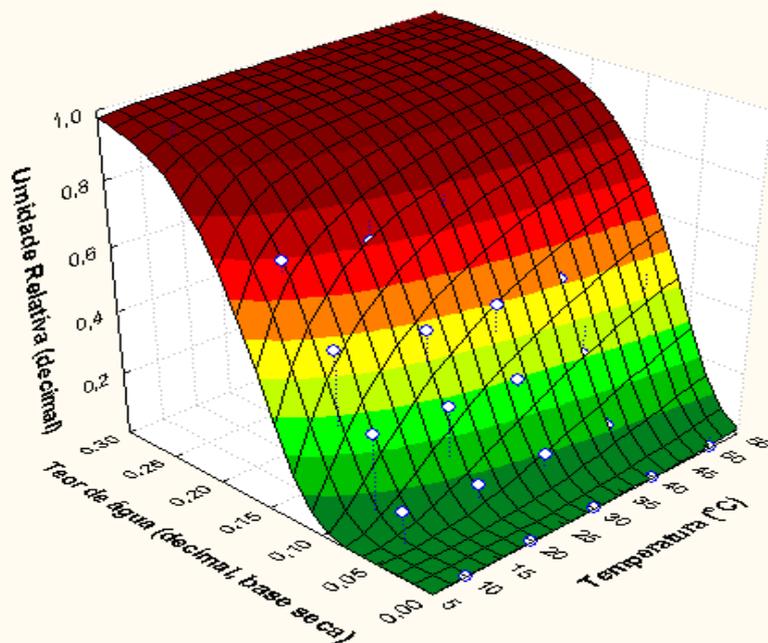


Figura 10. Dados experimentais e calculados dos teores de água de equilíbrio higroscópico das sementes de feijão “preto” ajustadas pela equação de Sigma-Copace e de Chung-Pfost - curvas de sorção

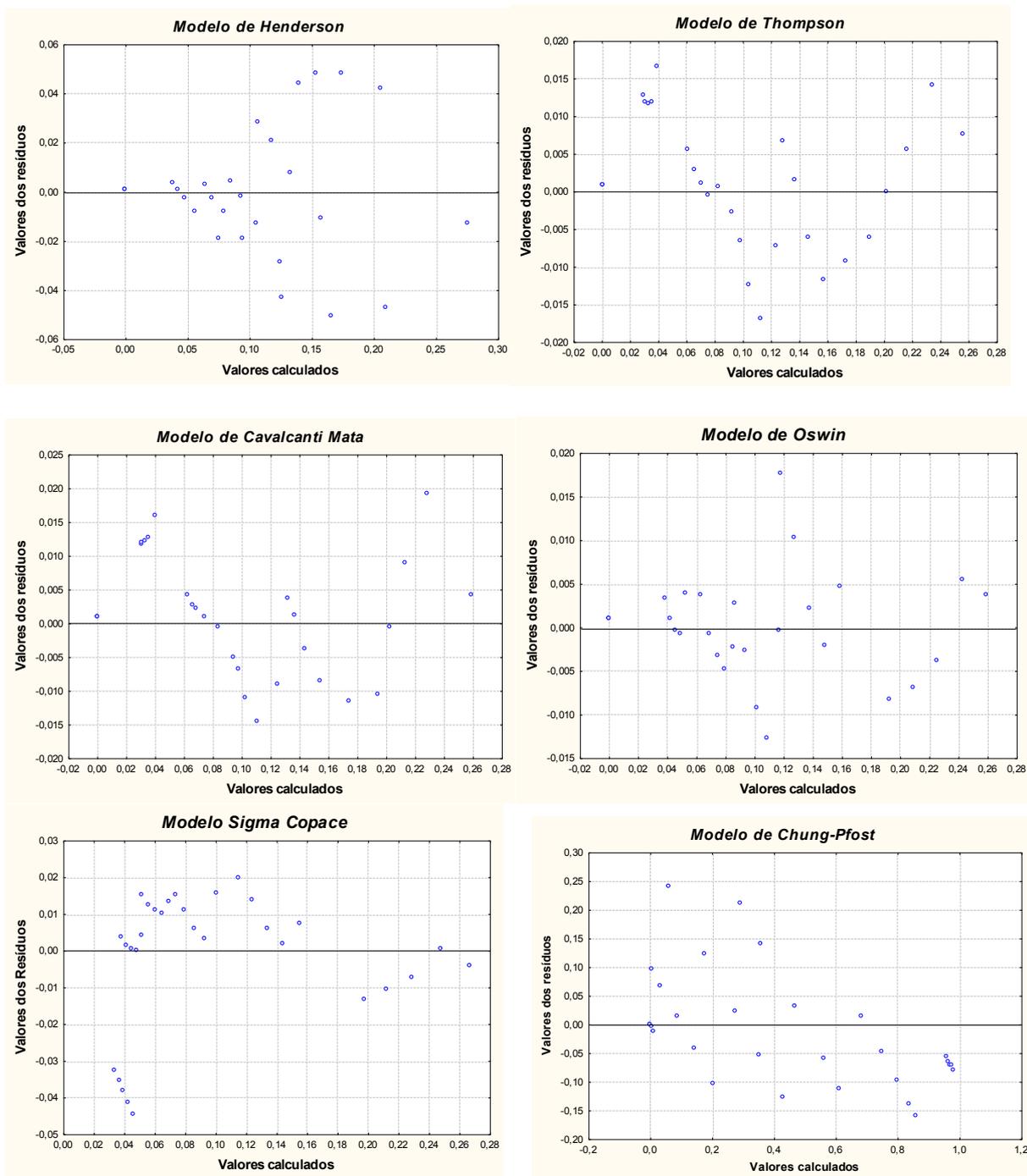


Figura 11. Dados de valores calculados versus valores residuais das curvas de equilíbrio higroscópico das sementes de feijão “preto” ajustadas pela equação de Henderson, Thompson, Cavalcanti Mata, Oswin, Sigma-Copace e de Chung-Pfost - curvas de dessecção

## CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- Existe variação das dimensões de comprimento largura e espessura do feijão branco e do feijão preto em função do seu teor de água.
- O comprimento das sementes é a dimensão que mais se altera crescendo 31% para o feijão branco entre o teor de água inicial (10% base seca) e o teor de água final (45% base seca) e de 15% para o feijão preto entre os mesmo teores de água inicial e o teor de água final.

- O modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais das sementes de feijão branco e de feijão preto foi o Modelo de Oswin com um coeficiente de determinação de 99,2% para o feijão branco e 99,4% para o feijão preto.
- Dentre os modelos estudados o modelo de Oswin é o único que apresenta um comportamento aleatório dos valores do resíduo quando plotados em relação aos valores calculados.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UFCG e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo apoio a esta pesquisa, mediante concessão de uma Bolsa de Iniciação Científica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ALMEIDA, F. de A.C.; MATOS, V.P.; CASTRO, J.R. de .; DUTRA, A.S. Avaliação da qualidade e conservação de sementes a nível de produtor. In: HARA, T.; CAVALCANTI MATA, M.E.R.M. **Armazenamento de grãos e sementes nas propriedades rurais**. Campina Grande, PB: UFPB/SBEA. 1997. p. 133-188.
- ANDERSON, J. W.; SMITH, B. M.; WASNOCK, C. S. Cardiovascular and renal benefits of dry bean and soybean intake. **The American Journal of Clinical Nutrition**, v. 70, suppl., p. 464S-474S, 1999.
- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W. & HALL, C.W. **Drying and storage of cereal grains and oil seeds**. West point, Connecticut, The AVI Publishing Company, 1992, 465 p.
- Cavalcanti Mata, M. E. R. M. **Efeitos da secagem em altas temperaturas por curtos períodos de tempo, em camada estacionária, sobre a armazenabilidade de sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), variedade “carioca”: Avaliação experimental, modelagem e simulação**. 1997. 229f Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) Departamento de Engenharia de Alimentos. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- CAVALCANTI MATA M.E.R.M.; ALMEIDA, F.A.C.; DUARTE, M.E. Secagem de Sementes. In: ALMEIDA, F. de A.C.; DUARTE, M.E; CAVALCANTI MATA M.E.R.M. **Tecnologia de armazenagem de sementes**. Campina Grande: LAPP/ UFCG. 2006 402 p.
- CAVALCANTI MATA, M.E.R.M.; ARAGÃO, R.F.; SANTANA, E.F.; SILVA, F.A.S. Estudo da morfologia geométrica em grãos. **Revista Nordestina de Armazenagem**, Campina Grande-PB. a. 3, n. 1, p. 3-30, 1986.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Quadro de suprimento, junho de 2006**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/download/indicadores/0301-oferta-edemanda-brasileira.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2006.
- FAO – **Perspectivas dos alimentos**. Disponível em: <https://www.fao.org.br/default.asp> Ace Acesso em: 23/10/2008
- GENOVESE, M. I.; LAJOLO, F. M. Atividade inibitoria de tripsina do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.): Avaliação crítica dos métodos de determinação. **Archivos Latinoamericanos de Nutrición**, v. 51, n. 4, p. 386-394, 2001.
- LUJÁN1, Dagnith Liz Bejarano; LEONEL, Alda Jusceline; BASSINELLO2, Priscila Zaczuk; COSTA, Neuza Maria Brunoro. Variedades de feijão e seus efeitos na qualidade protéica, na glicemia e nos lipídios sanguíneos em ratos **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.28, p.142-149, dez. 2008.
- MANISHA, C. et al. Beneficial effects of high dietary fiber intake in patients with type 2 diabetes mellitus. **The New England Journal of Medicine**, v.342, n.11, p.392-1398, 2003.
- MOHSENIN, N.N. **Physical proprieties of plant and animal materials**. New York, Gordon and Breach Science Publishers, 1978 2<sup>nd</sup> Ed. 742 p.
- PEREIRA, C. A.; COSTA, N. M. Proteínas do feijão preto sem casca: digestibilidade em animais convencionais e isentos de germes (germ-free). **Revista de Nutrição**, v. 15, n. 1, p. 5-14, 2002.
- OLIVEIRA, Glauco Vieira; CARNEIRO, Pedro Crescêncio Souza; CARNEIRO, José Eustáquio de Souza; CRUZ, Cosme Damião. Adaptabilidade e estabilidade de linhagens de feijão comum em Minas Gerais **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.2, p.257-265, fev. 2006
- RIZVI, S.S.H. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In: RAO, M.A., RIZVI, S.S.H.. **Engineering properties of foods**. New York Marcel Dekker, 1986. p.155-165.
- SILVA, M. M.; GOUVEIA, J. P. G. de; MOURA, R. S. F.; ALMEIDA, F. <sup>a</sup> C.; ARAÚJO, M. E. C. Adsorção de umidade em polpa de manga: Avaliação de modelos matemáticos. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 30, Foz do Iguaçu, **Anais...**, Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2001. CD.
- WANDER, A. E. Produção e consumo de feijão no Brasil, 1975-2005. **Informações Econômicas**, v.37, n.2, p.17-21, 2007.