

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS SEMENTES DE FEIJÃO-CAUPI, CULTIVAR BRS GUARIBA, DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM

GUILHERME CARDOSO OBA¹, ANDRÉ LUÍS DUARTE GONELI², ELTON APARECIDO SIQUEIRA MARTINS², CESAR PEDRO HARTMANN FILHO¹, ALEXANDRE ALVES GONÇALVES¹

¹ Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD, Rodovia Dourados/Itahum, Km 12 - Unidade II, Cep: 79.804-970, Dourados-MS, Brasil. E-mails: guilherme_oba@hotmail.com; cphartmann21@hotmail.com; alexandre_alvesg@hotmail.com

² Faculdade de Ciências Agrárias da UFGD, Rodovia Dourados/Itahum, Km 12 - Unidade II, Cep: 79.804-970, Dourados-MS, Brasil. E-mails: andregoneli@ufgd.edu.br; elton_asm@yahoo.com.br

RESUMO: Os produtos agrícolas podem apresentar alterações significativas em seus caracteres físicos, como tamanho e forma, quando submetidos a condições capazes de modificar seu teor de água. Assim, objetivou-se caracterizar a variação das principais propriedades físicas das sementes de feijão-caupi, cultivar BRS Guariba, durante o processo de secagem. As sementes, colhidas com um teor de água de 0,47 base seca (b.s.), foram secas em estufa de ventilação forçada de ar, a 40 °C, até atingirem 0,11 b.s. Durante a secagem, determinaram-se as seguintes propriedades físicas: volume da massa e unitária, diâmetro geométrico, área projetada e superficial, circularidade, esfericidade, porosidade intergranular e massa específica aparente e real. Avaliou-se ainda, por meio dos volumes determinados, a contração volumétrica da massa e unitária das sementes. Constatou-se que ambas as contrações volumétricas podem ser representadas pelos modelos de Bala e Woods modificado (1984), Corrêa et al. (2004), Exponencial, Polinomial de primeiro e segundo grau e Rahman (1995). O decréscimo do teor de água resulta no aumento da massa específica aparente e na redução das magnitudes das demais propriedades físicas, exceto a circularidade e esfericidade, que sofrem pouca alteração na faixa de teor de água avaliada.

Palavras-Chave: propriedades físicas, teor de água, *Vigna unguiculata* (L.) Walp.

PHYSICAL CHARACTERIZATION OF COWPEA SEEDS, BRS GUARIBA CULTIVAR, DURING DRYING PROCESS

ABSTRACT: Agricultural products may present significant changes in their physical characteristics, such as size and shape, when subjected to capable conditions to modifying their moisture content. Thus, it was aimed to characterize the variation of the main physical properties of cowpea seeds, BRS Guariba cultivar, during drying process. Seeds, harvested with a moisture content of 0.47 dry basis (d.b.), were dried in forced air ventilation oven, at 40 °C, until they reaching 0.11 d.b. During drying process, the following physical properties were determined: mass and unit volume, geometric diameter, projected and superficial area, circularity, sphericity, intergranular porosity, bulk and true density. Also, mass volumetric shrinkage and seeds unit was evaluated through the determined volumes. It was found that both volumetric shrinkages can be represented by the modified Bala and Woods (1984), Corrêa et al. (2004), Exponential, Polynomial of first and second degree and Rahman (1995) models. The decrease in the moisture content results in the increase of the bulk density and in the reduction of the magnitudes of the other physical properties, except the circularity and sphericity, that undergo little change in the evaluated moisture content range.

Keywords: physical properties, moisture content, *Vigna unguiculata* (L.) Walp.

1 INTRODUÇÃO

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) é uma das principais espécies de importância socioeconômica para as Regiões Norte e Nordeste do Brasil, devido seu papel em sistemas de produção agrícola e pelos teores de proteínas (25%) e carboidratos (58%) contidos em seus grãos, que são de importância para a alimentação humana (BARROS et al., 2013; SILVA et al., 2017; RIOS et al., 2018). Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento, na safra 2017/2018 foram produzidas 789,8 mil toneladas de feijão-caupi no país, tendo sido os Estados de Mato Grosso, Ceará, Bahia e Piauí responsáveis por 30,0; 14,6; 12,7 e 11,8% da produção nacional, respectivamente (CONAB, 2019).

A expansão e crescente relevância da cultura tem exigido o aumento do nível tecnológico empregado nas diversas fases da cadeia produtiva. No que se refere à pós-colheita, o material colhido em grande escala necessita passar por uma série de etapas, como a secagem e limpeza, objetivando-se a melhoria física e manutenção da qualidade do produto durante o armazenamento, até o processamento ou semeadura na safra seguinte (MORAIS et al., 2013; SMIDERLE et al., 2017).

Para o início de projetos ou adaptações de estruturas e equipamentos utilizados na pós-colheita, tais como silos e sistemas de transporte, secagem, limpeza, classificação e aeração, é fundamental a obtenção de dados referentes às principais propriedades físicas do produto trabalhado (GONELI et al., 2016; SILVA; CARVALHO, 2015). Dentre essas propriedades, podem ser citadas a massa específica aparente, porosidade intergranular, circularidade, esfericidade, área projetada e superficial, entre outras. Informações a respeito dos caracteres físicos do material ainda podem auxiliar em estudos de transferência de calor e massa e movimentação de ar na massa granular durante processos de secagem ou aeração (GONELI et al., 2011; LI et al., 2019). Atributos físicos, como a massa específica e a porosidade intergranular, também podem ajudar na identificação de

perdas quantitativas e qualitativas do produto durante o armazenamento (CORRÊA et al., 2016).

Devido à importância, as propriedades físicas dos produtos agrícolas, como sementes e frutos, têm sido o tema de diversas pesquisas, onde se tem verificado a elevada influência do teor de água do produto na determinação da magnitude de seus principais caracteres físicos (ARAUJO et al., 2014; GONÇALVES et al., 2014; HAUTH et al., 2018). Considerando-se a alteração do teor de água pelo processo de secagem, as modificações ocorridas nas propriedades físicas do material biológico se devem, mormente, à redução do seu volume externo (CORRÊA et al., 2011); fenômeno, esse, conhecido como contração volumétrica e que pode ser predita por modelos matemáticos empíricos a partir de dados experimentais (MARTINS et al., 2017a; OLIVEIRA et al., 2014). Segundo Quequeto et al. (2018), informações referentes à contração volumétrica da massa podem ser utilizadas no cálculo do volume de produto a ser repostado na câmara de secagem do secador, para que o mesmo sempre trabalhe na máxima capacidade, otimizando seu uso.

Embora feijões de diferentes gêneros, espécies e genótipos já tenham sido avaliados quanto à variação de suas propriedades físicas durante processos de desorção ou adsorção de água (DAVIES; ZIBOKERE, 2011; JESUS et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2014; THEERTHA et al., 2014; SHARON et al., 2015; MENDES et al., 2016), ainda nenhum estudo contemplou a caracterização física das sementes de feijão-caupi, cultivar BRS Guariba, durante a secagem. Levando-se em consideração as diferenças físico-químicas entre os diferentes tipos de feijões existentes, informações deste cunho poderão auxiliar no aumento da eficiência do manejo pós-colheita dessa cultivar.

Nesse sentido, realizou-se este trabalho com os seguintes objetivos: 1- caracterizar a variação das principais propriedades físicas das sementes de feijão-caupi, cultivar BRS Guariba, durante o processo de secagem; e 2- realizar a modelagem matemática da contração

volumétrica da massa e unitária do produto, empregando-se diferentes modelos empíricos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas, pertencente à Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), Dourados-MS. Foram utilizadas sementes de feijão-caupi, cultivar BRS Guariba, produzidas na Fazenda Experimental de Ciências Agrárias (FAECA/UFGD) (22°14'S e 54°59'W, 434 m).

As sementes, em vagens, foram manualmente colhidas quando apresentavam-se com teor de água de $0,47 \pm 0,01$ base seca (b.s.). Após debulha manual e seleção, as sementes sadias foram submetidas à secagem em estufa de ventilação forçada de ar, à temperatura de $40\text{ }^\circ\text{C}$, até atingirem teor de água de $0,11 \pm 0,01$ b.s. Os teores de água, inicial e final, foram determinados pelo método de estufa, a $105 \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$, durante 24 h e em triplicata (BRASIL, 2009). O acompanhamento da redução do teor de água durante a secagem foi realizado pelo método gravimétrico (perda de massa).

Devido às particularidades de cada avaliação, nem todas as propriedades físicas foram determinadas nos mesmos teores de

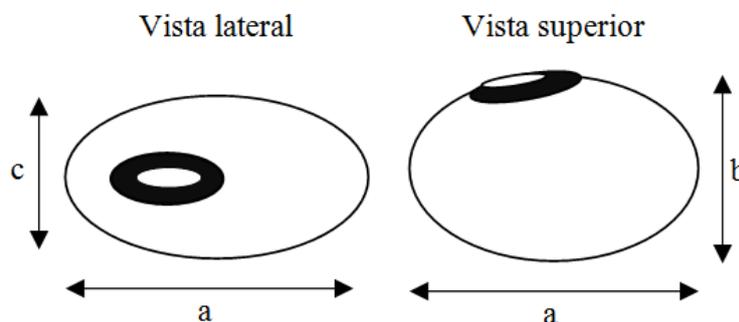
água, estando, entretanto, dentro da faixa de $0,47 \pm 0,01$ a $0,11 \pm 0,01$ b.s. A cada teor de água obtido durante a secagem, foram determinadas as propriedades físicas descritas em sequência.

Índice de contração volumétrica da massa (ψ_m) e unitária (ψ_u). Ambos os índices foram determinados pela relação entre o volume do produto em cada teor água obtido ao longo da secagem (V) e o seu volume inicial (V_0), conforme a Equação (1).

$$\psi = \frac{V}{V_0} \quad (1)$$

O acompanhamento da redução do volume da massa das sementes foi realizado tomando-se como base um volume inicial de 1000 cm^3 do produto, em três determinações. A verificação da redução do volume unitário das sementes deu-se por meio da medição das dimensões características principais das sementes (a- comprimento; b- largura; e c- espessura), conforme exemplificado na Figura 1, com auxílio de um paquímetro digital de resolução de $0,01\text{ mm}$, em 20 sementes selecionadas aleatoriamente. O volume unitário (V_u , em mm^3) foi calculado conforme a Equação (2) (MOHSENIN, 1986), utilizando-se os valores das dimensões características principais, em mm.

Figura 1. Representação das dimensões características principais das sementes de feijão-caupi, cultivar BRS Guariba.



$$V_u = \frac{\pi(a b c)}{6} \quad (2)$$

A escolha da Equação (2), para calcular o volume individual (V_u) das sementes, baseou-se em testes preliminares realizados

com tolueno, onde o volume real do produto foi comparado ao volume estimado por algumas equações, sendo constatado que os valores obtidos pela Equação (2) se apresentaram mais próximos do volume real.

O diâmetro geométrico (D_g) foi calculado pela Equação (3) (MOHSENIN, 1986), utilizando-se valores das dimensões características das mesmas sementes selecionadas anteriormente.

$$D_g = (a b c)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

A área projetada para a posição natural de repouso (A_p) foi determinada pela Equação (4), sendo os resultados apresentados em mm^2 .

$$A_p = \frac{\pi a b}{4} \quad (4)$$

A área superficial (S), expressa em mm^2 , foi calculada conforme proposto por Mohsenin (1986), pelas seguintes expressões:

$$S = \frac{\pi B^2}{2} + \frac{\pi a B}{2 e} \text{sen}^{-1} e \quad (5)$$

Sendo:

$$B = (b c)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$e = \sqrt{1 - \left(\frac{B}{a}\right)^2} \quad (7)$$

A circularidade para a posição natural de repouso (C) e a esfericidade (E_s), características que determinam a forma das sementes, foram determinadas por meio das Equações (8) e (9), respectivamente (MOHSENIN, 1986), sendo ambos os resultados expressos em porcentagem.

$$C = \left(\frac{b}{a}\right) 100 \quad (8)$$

$$E_s = \left[\frac{(a b c)^{\frac{1}{3}}}{a}\right] 100 \quad (9)$$

A massa específica aparente (ρ_{ap}) foi determinada em balança de peso hectolítrico com recipiente cilíndrico de volume de 1,0 L, em cinco repetições. Já a massa específica real (ρ_u) foi obtida pela relação entre a massa unitária das sementes (m_u , em g) e o volume unitário das mesmas (V_u , em mm^3), conforme a Equação (10), em 20 sementes selecionadas aleatoriamente. Ambos os resultados de ρ_{ap} e ρ_u foram expressos em kg m^{-3} .

$$\rho_u = \left(\frac{m_u}{V_u}\right) 10^6 \quad (10)$$

A porosidade intergranular (ε) foi determinada pela relação entre a massa específica aparente e a massa específica unitária das sementes, conforme a Equação (11) (MOHSENIN, 1986), sendo os resultados apresentados em porcentagem.

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_u}\right) 100 \quad (11)$$

A massa de mil sementes (M_{1000}) foi determinada em oito repetições de 100 sementes, em balança de resolução de 0,001 g, cujos os valores médios foram ajustados para a massa de mil sementes e os resultados expressos em g.

Aos dados experimentais do índice de contração volumétrica da massa e unitária foram ajustados modelos matemáticos (Tabela 1) tradicionalmente empregados para a representação desses fenômenos em produtos agrícolas (CORRÊA et al., 2011; GONELI et al., 2011; MARTINS et al., 2017a; OLIVEIRA et al., 2014).

Tabela 1. Modelos matemáticos empregados para a representação do índice de contração volumétrica da massa e unitária das sementes de feijão-caupi, cultivar BRS Guariba.

Designação do modelo	Equação
Bala e Woods, modificado (1984) citado por Goneli et al. (2011)	$\psi = 1 - a \{1 - \exp[-b(U_0 - U)]\}$ (12)
Corrêa et al. (2004) citado por Corrêa et al. (2011)	$\psi = 1 / [a + b \exp(U)]$ (13)
Exponencial	$\psi = a \exp(b U)$ (14)
Polinomial de primeiro grau	$\psi = a + b U$ (15)
Polinomial de segundo grau	$\psi = a + b U + c U^2$ (16)
Rahman (1995) citado por Martins et al. (2017a)	$\psi = 1 + \beta(U - U_0)$ (17)

ψ - índice de contração volumétrica, adimensional; U- teor de água atual do produto, b.s.; U_0 - teor de água inicial do produto, b.s.; a, b, c- coeficientes dos modelos, decimal; e β - coeficiente de contração volumétrica, decimal.

O ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais dos índices de contração volumétrica, da massa e unitária, foi realizado pelo método Gauss-Newton, utilizando-se o programa computacional Statistica 8.0. A seleção dos modelos baseou-se nas magnitudes do coeficiente de determinação (R^2 , em decimal), erro médio relativo (P, em %), calculado pela Equação (18), e desvio padrão da estimativa (SE, decimal), obtido pela Equação (19).

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (18)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (19)$$

Em que: n- número de observações experimentais; Y e \hat{Y} - valor observado e estimado, respectivamente; e GLR- graus de liberdade do modelo (número de observações experimentais menos o número de coeficientes do modelo).

As médias referentes às demais propriedades físicas foram submetidas à análise de regressão. O ajuste do modelo

selecionado foi avaliado com base nas magnitudes do coeficiente de determinação (R^2 , decimal), nível de significância da equação (p_{valor} , decimal), erro médio relativo [P, em %; Equação (18)] e o conhecimento do fenômeno biológico em estudo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme disposto na Tabela 2, para ambos os índices de contração volumétrica, da massa e unitária, verificou-se que todos os modelos matemáticos apresentaram magnitudes de coeficiente de determinação (R^2) superiores a 0,98, erro médio relativo (P) abaixo de 1,7% e valores reduzidos de desvio padrão da estimativa ($SE < 0,017$). De acordo com critérios adotados por outros pesquisadores, um modelo é considerado aceitável quando esse apresenta coeficiente de determinação superior a 0,98, desvio padrão da estimativa próximo a zero e erro médio relativo inferior a 10%; o erro médio relativo expressa o desvio dos dados experimentais em relação à curva estimada pelo modelo (CORRÊA et al., 2011; MARTINS et al., 2017a; MENDES et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2014; QUEQUETO et al., 2018).

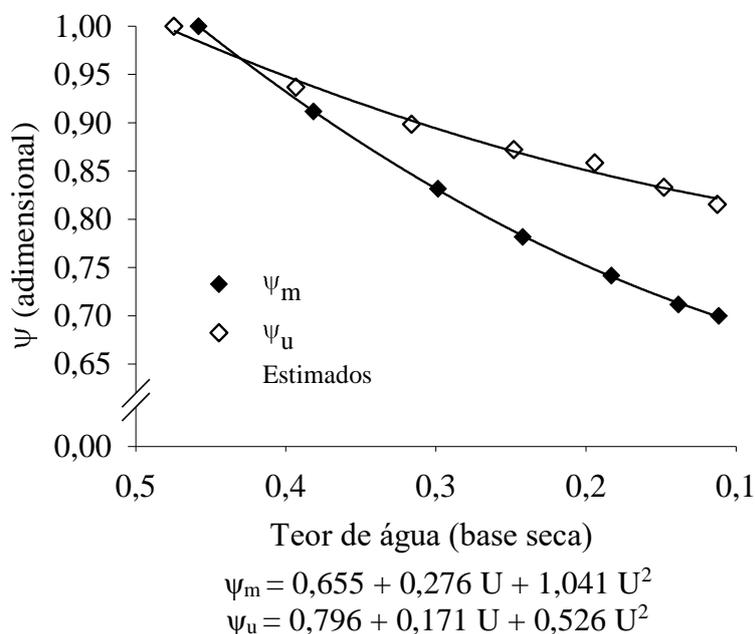
Tabela 2. Valores de desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) e coeficiente de determinação (R^2) para os diferentes modelos matemáticos ajustados aos dados do índice de contração volumétrica da massa (ψ_m) e unitária (ψ_u) das sementes de feijão-caupi, cultivar BRS Guariba.

Modelos	ψ_m			ψ_u		
	SE (decimal)	P (%)	R^2 (decimal)	SE (decimal)	P (%)	R^2 (decimal)
(12)	0,0018	0,1678	0,9999	0,0064	0,4746	0,9958
(13)	0,0082	0,7560	0,9977	0,0090	0,7168	0,9917
(14)	0,0015	0,1277	0,9999	0,0076	0,5569	0,9952
(15)	0,0143	1,3253	0,9931	0,0103	0,8420	0,9890
(16)	0,0048	0,4025	0,9992	0,0062	0,5010	0,9960
(17)	0,0162	1,6160	0,9893	0,0124	1,0566	0,9810

Dessa forma, pode-se afirmar que todos os modelos avaliados neste trabalho apresentaram ajuste satisfatório aos dados experimentais; podendo, portanto, ser utilizados para estimar a contração volumétrica da massa e unitária das sementes da cultivar

BRS Guariba, dentro da faixa de teor de água estudada (Tabela 2). Dentre os modelos ajustados, selecionou-se o de Polinomial de segundo grau (16) para a representação de ambos índices de contração volumétrica, da massa e unitária (Figura 2).

Figura 2. Índice de contração volumétrica da massa (ψ_m) e unitária (ψ_u) das sementes de feijão-caupi, cultivar BRS Guariba, para diferentes teores de água.



Constatou-se que, ao final do processo de secagem (teor de água de 0,11 b.s.), a massa das sementes teve seu volume reduzido em 30% em relação ao volume inicial, ao passo que a contração volumétrica unitária foi de apenas 18% (Figura 2). Goneli et al. (2011) relataram comportamento similar para frutos de *Ricinus communis* L., onde verificaram, ao

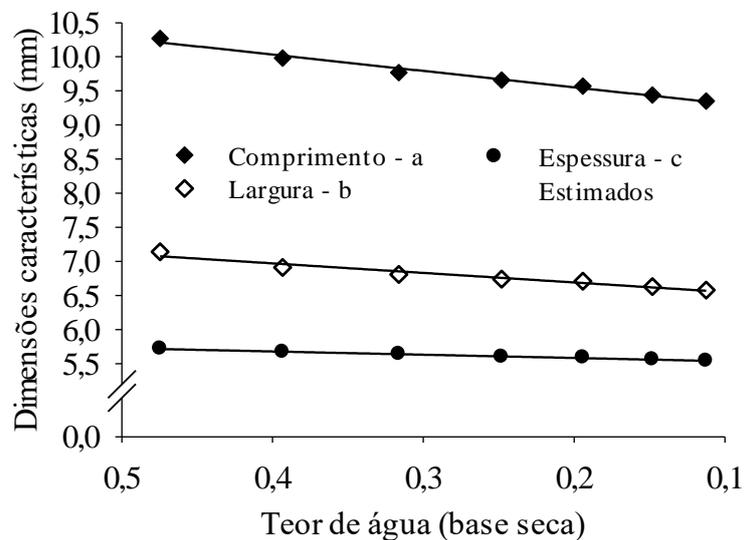
final do processo de secagem, contração volumétrica da massa 27% superior à unitária; no referido trabalho, ambas as contrações volumétricas também foram satisfatoriamente representadas pelo modelo polinomial de segundo grau.

A contração volumétrica em materiais biológicos, pela remoção de água durante a

secagem, se deve à redução da tensão no interior de suas células, a qual promove modificações nas estruturas celulares e decréscimos nas dimensões externas do produto (CORRÊA et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2013). De fato, a redução do teor de água promoveu decréscimos significativos nas dimensões características principais das sementes, onde os valores de comprimento, largura e espessura variaram linearmente de 10,21 a 9,34 mm; 7,08 a 6,57 mm e 5,72 a 5,54 mm, respectivamente, dentro da faixa de teor de água de 0,4746 a 0,1124 b.s. (Figura 3).

Além disso, verificou-se que as sementes apresentaram contração menos intensa de sua espessura (3,0%) em relação à contração do comprimento (8,5%) e largura (7,2%), evidenciando que a redução das dimensões características principais ocorreu de forma desuniforme durante a secagem. Essa tendência está de acordo com a verificada para a maioria dos produtos agrícolas durante processos de desorção de água (GONELI et al., 2011; ARAUJO et al., 2014; MARTINS et al., 2017a).

Figura 3. Dimensões características principais das sementes de feijão-caupi, cultivar BRS Guariba, para diferentes teores de água.



Os valores médios de comprimento, largura e espessura (9,72; 6,79 e 5,62 mm, respectivamente), encontrados para a cultivar BRS Guariba (Figura 3), diferem-se acentuadamente dos verificados por Davies e Zibokere (2011), trabalhando com as cultivares nigerianas IAR-339-1 (11,9; 8,4 e 7,4 mm), IT86G-1010 (14,3; 10,2 e 8,0 mm) e IFE BROWN (12,0; 8,0 e 6,7 mm). Essa comparação evidencia a variação acentuada nos caracteres físicos entre cultivares de sementes de uma mesma espécie.

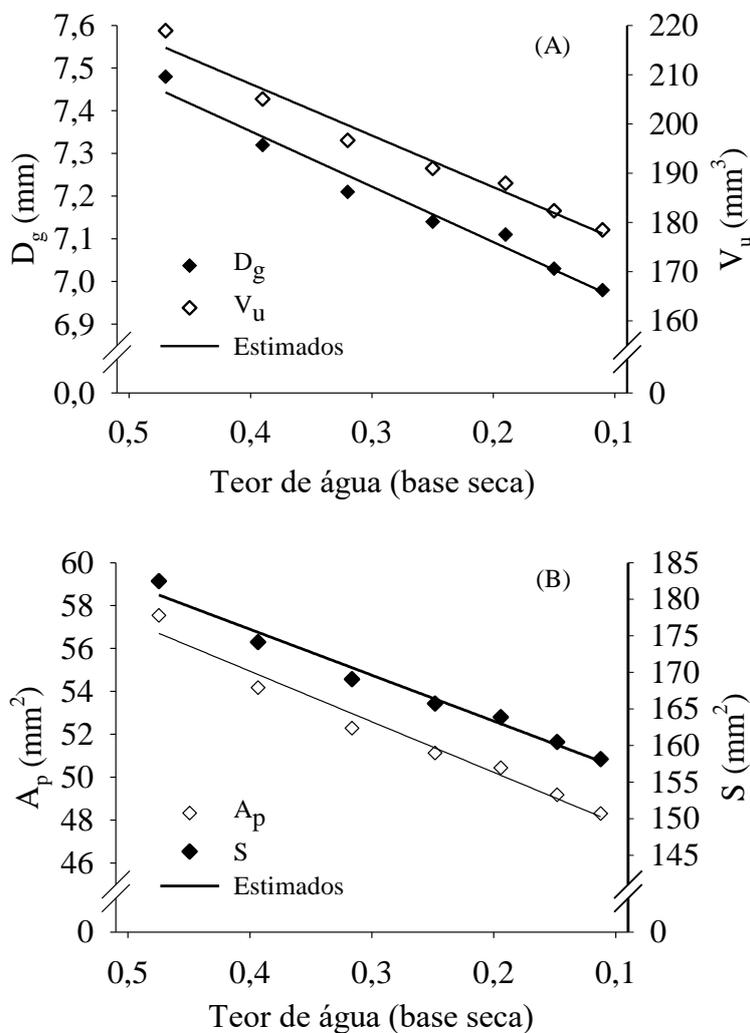
Também foi constatado o efeito da redução do teor de água sobre as características de diâmetro geométrico (D_g), volume unitário (V_u), área projetada para posição natural de repouso (A_p) e área superficial (S) das

sementes (Figuras 4A e 4B). Em todos os casos, o processo de secagem resultou no decréscimo linear dos valores, os quais variaram de 7,45 a 6,98 mm; 215,95 a 177,96 mm³; 56,7 a 48,2 mm² e de 180,6 a 157,8 mm², respectivamente, na faixa de teor de água de 0,4746 a 0,1124 b.s. Os resultados apresentados, até o momento, confirmam que as propriedades físicas relacionadas ao tamanho das sementes da cultivar BRS Guariba são altamente dependentes do teor de água, constituindo importantes informações para futuros projetos ou adaptações de estruturas e equipamentos pré-existentes a serem empregados na sua pós-colheita. Nesse sentido, valores similares de diâmetro geométrico e área projetada, desse genótipo

(Figuras 4A e 4B), foram encontrados para sementes de *Phaseolus vulgaris* L., cultivares

BRS Pontal e BRS Valente (JESUS et al., 2013).

Figura 4. A- Diâmetro geométrico (D_g) e volume unitário (V_u); B- área projetada para posição natural de repouso (A_p) e área superficial (S) das sementes de feijão-caupi, cultivar BRS Guariba, para diferentes teores de água.



Com relação a forma do produto, a circularidade, para a posição natural de repouso, e a esfericidade foram características que menos variaram com a redução do teor de água, verificando-se valores médios de $69,9 \pm 0,4\%$ e $73,9 \pm 0,6\%$, respectivamente, entre 0,4746 a 0,1124 b.s. (dados não apresentados). Esses resultados evidenciaram que, dentro da faixa de teor de água avaliada, as sementes da cultivar BRS Guariba não podem ser classificadas como circulares e/ou esféricas (MOHSENIN, 1986). Resultados similares foram encontrados para sementes de genótipos nigerianos de *V. unguiculata*

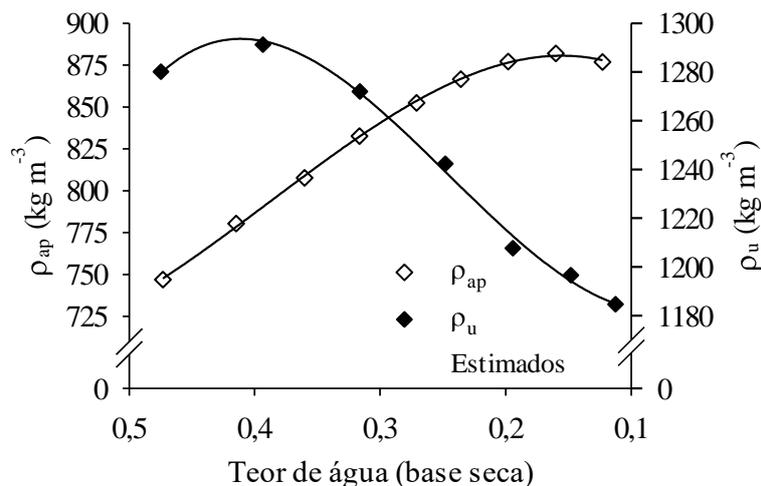
(DAVIES; ZIBOKERE, 2011), entre outras espécies de feijões (JESUS et al., 2013; THEERTHA et al., 2014; SHARON et al., 2015). Mendes et al. (2016), trabalhando com *Vigna angularis* Willd., também não verificaram tendência definida para a variação da circularidade do produto durante a secagem; contudo, houve ligeiro aumento da esfericidade à medida que se reduziu o teor de água. Conforme citaram Hauth et al. (2018), a circularidade e a esfericidade, associadas a outras propriedades relacionadas ao tamanho, são importantes características a serem consideradas no projeto de equipamentos de

classificação, permitindo o aumento da eficiência do processo e a redução de perdas ocasionadas pela quebra produto.

Com a redução do teor de água, verificou-se o aumento sensível da massa específica aparente (ρ_{ap}) das sementes até o teor de água de 0,20 b.s. (876,1 kg m⁻³), com

máximo valor alcançado em 0,16 b.s. (880,6 kg m⁻³). Contudo, ao final da secagem (0,1228 b.s.), verificou-se ligeiro decréscimo da ρ_{ap} (877,9 kg m⁻³), indicando possível mudança de tendência dessa característica em relação a menores conteúdos de água (Figura 5).

Figura 5. Massa específica aparente (ρ_{ap}) e real (ρ_u) das sementes de feijão-caupi, cultivar BRS Guariba, para diferentes teores de água.



O aumento das magnitudes de ρ_{ap} , entre 0,4732 a 0,16 b.s., indica que a contração da massa do produto ocorreu de forma mais intensa em relação à perda de água na forma de vapor para o ar de secagem (Figura 5), como também constatado em sementes de *P. vulgaris* L., cultivares BRS Pontal e BRS Valente (JESUS et al., 2013) e cultivares de *Glycine max* L. (HAUTH et al., 2018).

Ademais, os valores de ρ_{ap} encontrados no presente estudo (747,6 a 880,6 kg.m⁻³; Figura 5) assimilam-se aos verificados para sementes de *P. vulgaris* L. (738,7 a 757,1 kg.m⁻³; JESUS et al., 2013) e *Vigna mungo* L. (777,6 a 883,6 kg.m⁻³; SHARON et al., 2015); porém, diferem-se acentuadamente dos encontrados para outras cultivares de *V. unguiculata* (643,5 a 706,6 kg m⁻³; DAVIES; ZIBOKERE, 2011). Levando-se em consideração que a faixa de teor de água avaliada nos referidos trabalhos foi semelhante àquela analisada neste estudo, tais informações evidenciam a discrepância ou, em algumas situações, a semelhança entre as magnitudes de determinadas propriedades físicas dos diversos

tipos de feijões existentes. Isso reforça a importância da caracterização física das sementes de cada espécie/genótipo para o correto dimensionamento ou adaptação das estruturas e equipamentos pós-colheita; especificamente, dados sobre a massa específica aparente do produto a ser armazenamento são empregados no cálculo da capacidade estática de silos (SILVA; CARVALHO, 2015).

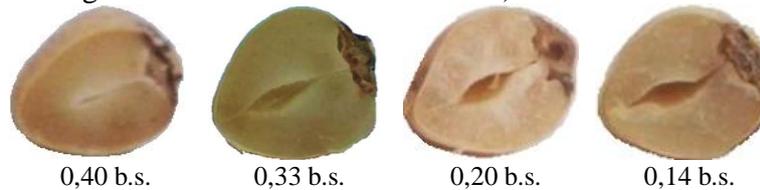
Em relação à massa específica real (ρ_u), um ligeiro incremento nas magnitudes foi constatado entre os teores de água de 0,4746 a 0,41 b.s. (1279,7 a 1293,6 kg m⁻³). A partir disso, os valores de ρ_u decresceram acentuadamente com a redução do teor de água do produto, atingindo, ao final da secagem (0,1224 b.s.), ρ_u de 1184,9 kg m⁻³ (Figura 5). Essa tendência de redução dos valores de ρ_u , a partir de 0,41 b.s. (Figura 5), discordou da verificada para sementes de outras variedades de *V. unguiculata* (DAVIES; ZIBOKERE, 2011), as quais apresentaram maiores magnitudes de ρ_u nos menores teores de água. Contudo, foi encontrado um comportamento

similar ao do presente estudo para sementes de *V. mungo* L. (THEERTHA et al., 2014).

Contrário ao que foi constatado para a massa específica aparente, os resultados da massa específica real, a partir de 0,41 b.s., indicaram que houve maior intensidade de perda de água (redução de massa) pelas

sementes em relação à contração do seu volume individual durante a secagem (Figura 5). Neste trabalho, isso pode estar relacionado à formação de espaços vazios no interior das sementes conforme a redução do teor de água (Figura 6).

Figura 6. Corte transversal em sementes de feijão-caupi, cultivar BRS Guariba, com diferentes teores de água (as imagens não estão em mesma escala).



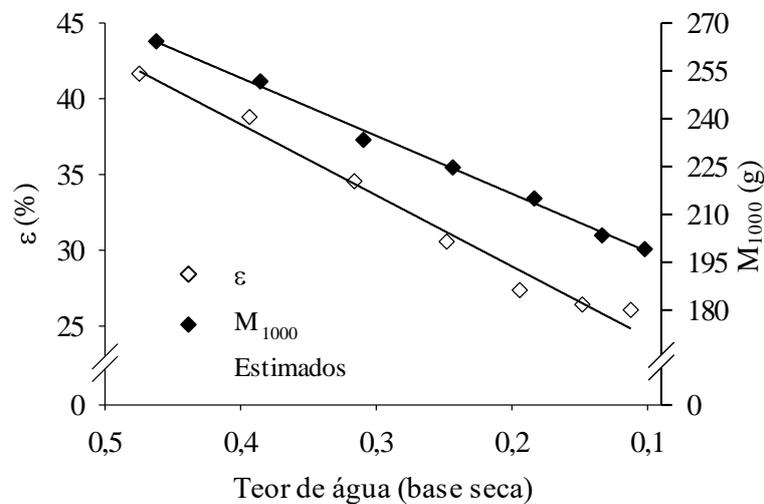
À medida que se reduziu o teor de água da semente, houve o desprendimento de seus cotilédones devido à redução da espessura desses na região central de contato, resultando na formação de espaços internos vazios (Figura 6). Possivelmente esse fenômeno (Figura 6) tenha atenuado o encolhimento das dimensões externas das sementes durante a secagem, principalmente a espessura (conforme foi verificado na Figura 3), ao passo que perda de água para o ar de secagem ocorreu normalmente, resultando na redução da massa específica real (Figura 5).

A dureza do tegumento/pericarpo e a formação de espaços vazios no interior das sementes têm sido apontadas como as principais causas da redução da massa específica aparente e real apresentada por sementes de algumas espécies durante a secagem (ARAUJO et al., 2014; GONÇALVES et al., 2014; MARTINS et al., 2017b). Araujo et al. (2014) também verificaram, durante o processo de secagem, a

formação de espaços vazios no interior das sementes de *Arachis hypogaea* L., cultivar IAC 505; contudo, assim como no presente estudo (Figura 6), não é possível afirmar se esse é um comportamento frequente do genótipo. Ressaltando-se que a contração volumétrica da massa foi consideravelmente mais acentuada que a contração volumétrica unitária (Figura 2), o desprendimento dos cotilédones das sementes (Figura 6) não foi capaz de interferir nos resultados da massa específica aparente, que aumentou com a redução do teor de água (Figura 5).

Na Figura 7 é possível constatar que a redução do teor de água das sementes promoveu o decréscimo da porosidade intergranular, reduzindo linearmente de 41,8 para 24,8% entre 0,4746 a 0,1124 b.s. Essa tendência de decréscimo se deve ao efeito conjunto da contração volumétrica unitária e da massa do produto durante o processo de secagem (Figura 2), de modo que os espaços vazios na massa de sementes foram reduzidos.

Figura 7. Porosidade intergranular (ϵ) e massa de mil sementes (M_{1000}) de feijão-caupi, cultivar BRS Guariba, para diferentes teores de água.



Para Li et al. (2019) e Quequeto et al. (2018), decréscimos nos espaços vazios intergranular, como os verificados neste trabalho (Figura 7), podem resultar em maior resistência oferecida à passagem de ar pela massa do produto, afetando o comportamento, uniformidade e a eficiência de operações de secagem ou aeração. Resultados semelhantes aos do presente estudo (Figuras 5 e 7) foram encontrados para *V. mungo* L. (THEERTHA et al., 2014), onde verificaram-se menores magnitudes de massa específica real e porosidade intergranular e maiores valores de massa específica aparente nos menores teores de água das sementes.

Os valores da massa de mil sementes (M_{1000}) reduziram linearmente com o decréscimo do teor de água, variando de 266,3 a 200,6 g entre 0,4746 a 0,1124 b.s.; tendência atribuída à perda da massa de água do produto durante a secagem (Figura 7).

Independentemente do teor de água, os valores de M_{1000} obtidos para a cultivar BRS Guariba (Figura 7) diferiram-se consideravelmente dos encontrados por Davies e Zibokere (2011), trabalhando com os genótipos nigerianos Ife Brown, IT86D-1010 e IAR-339-1 (539,2 a 281,5 g na faixa de 0,30 a 0,15 b.s.), confirmando as diferenças nas propriedades físicas de sementes de cultivares de mesma espécie.

Na Tabela 3 estão apresentadas as equações de regressão ajustadas aos dados experimentais das propriedades físicas das sementes de feijão-caupi, cultivar BRS Guariba, em função do teor de água. Verifica-se que todos os modelos apresentaram elevados graus de ajuste, evidenciados pelos valores de coeficiente de determinação (R^2) entre 0,9533 a 0,9994, nível de significância (p_{valor}) inferior a 0,001 e erro médio relativo (P) abaixo de 2,2%.

Tabela 3. Equações de regressão ajustadas aos dados experimentais das propriedades físicas das sementes de feijão-caupi, cultivar BRS Guariba, em função do teor de água (U b.s.), e respectivos valores de coeficiente de determinação (R^2), nível de significância (p_{valor}) e erro médio relativo (P).

Propriedade física	Equação de regressão	R^2	p_{valor}	P
		(decimal)		(%)
a	$y = 9,0737 + 2,3975 U$	0,9841	<0,0001	0,3099
b	$y = 6,4114 + 1,3992 U$	0,9533	0,0002	0,4736
c	$y = 5,4882 + 0,4773 U$	0,9919	<0,0001	0,0773
D_g	$y = 6,8325 + 1,2993 U$	0,9752	<0,0001	0,2645
V_u	$y = 166,1741 + 104,8836 U$	0,9730	<0,0001	0,8441
A_p	$y = 45,5073 + 23,5918 U$	0,9706	<0,0001	0,8126
S	$y = 150,7743 + 62,8128 U$	0,9782	<0,0001	0,5832
ρ_{ap}	$y = 809,1188 + 1003,8866 U - 4039,1707 U^2 + 3472,2313 U^3$	0,9994	<0,0001	0,1173
ρ_u	$y = 1204,5876 - 606,5087 U + 4531,6790 U^2 - 6153,3768 U^3$	0,9962	0,0004	0,1548
ε	$y = 19,5639 + 46,8801 U$	0,9817	<0,0001	2,1138
M_{1000}	$y = 180,1714 + 181,5411 U$	0,9958	<0,0001	0,7923

4 CONCLUSÕES

Ambas as contrações volumétricas podem ser representadas pelos modelos de Bala e Woods modificado (1984), Corrêa et al. (2004), Exponencial, Polinomial de primeiro e segundo grau e Rahman (1995).

O decréscimo do teor de água resulta no aumento da massa específica aparente e na redução das magnitudes das demais propriedades físicas, exceto a circularidade e esfericidade, que sofrem pouca alteração na faixa de teor de água avaliada.

6 REFERÊNCIAS

ARAÚJO, W. D.; GONELI, A. L. D.; SOUZA, C. M. A.; GONÇALVES, A. A.; VILHASANTI, H. C. B. Propriedades físicas dos grãos de amendoim durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 3, p. 279-286, 2014.

BARROS, M. A.; ROCHA, M. M.; GOMES, R. L. F.; SILVA, K. J. D.; NEVES, A. C. Adaptabilidade e estabilidade produtiva de feijão-caupi de porte semiprostrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, n. 4, p. 403-410, 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: MAPA/ACS, 2009. 395 p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Brasília: Conab, 2019. 132 p. (Oitavo Levantamento: Safra 2018/2019)

5 AGRADECIMENTOS

Ao suporte financeiro para pesquisa pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul (Fundect).

- CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; WANDER, L. V.; VARGAS-ELÍAS, G. A.; SANTOS, F. L.; NUNES, E. H. M. Preservation of roasted and ground coffee during storage. Part 2: bulk density and intergranular porosity. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 20, n. 7, p. 666-671, 2016.
- CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; GARIN, S. A.; JAREN, C.; OLIVEIRA, G. H. H. Mathematical models to describe the volumetric shrinkage rate of red beans during drying. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 4, p. 716-726, 2011.
- DAVIES, R. M.; ZIBOKERE, D. S. Effects of moisture content on some physical and mechanical properties of three varieties of cowpea (*Vigna unguiculata* (L) Walp.). **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, Beijing, v. 13, n. 1, p. 1-8, 2011.
- GONÇALVES, D. N.; RESENDE, O.; COSTA, L. M.; PRADO, M. Determination of physical properties of crambe fruits during drying. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 5, p. 972-979, 2014.
- 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**, Maringá, v. 33, n. 1, p. 1-8, 2011.
- GONELI, A. L. D.; MARTINS, E. A. S.; JORDAN, R. A.; GEISENHOF, L. O.; GARCIA, R. T. Experimental dryer design for agricultural products. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 36, n. 5, p. 938-950, 2016.
- HAUTH, M. R.; BOTELHO, F. M.; HOSCHER, R. H.; BOTELHO, S. C. C.; OLIVEIRA, G. H. H. Physical properties of different soybean cultivars during drying. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 38, n. 4, p. 590-598, 2018.
- JESUS, F. F.; SOUZA, R. T. G.; TEIXEIRA, G. C. S.; TEIXEIRA, I. R.; DEVILLA, I. A. Propriedades físicas de sementes de feijão em função de teores de água. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 21, n. 1, p. 9-18, 2013.
- LI, T.; LI, C.; TI, C.; XU, F.; FANG, Z. Porosity of flowing rice layer: experiments and numerical simulation. **Biosystems engineering**, Bedford, v. 179, p. 1-12, 2019.
- MARTINS, E. A. S.; GONELI, A. L. D.; GONÇALVES, A. A.; HARTMANN FILHO, C. P.; RECH, J.; OBA, G. C. Physical properties of safflower grains. Part II: volumetric shrinkage. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 21, n. 5, p. 350-355, 2017a.
- MARTINS, E. A. S.; GONELI, A. L. D.; HARTMANN FILHO, C. P.; MAUAD, M.; SIQUEIRA, V. C.; GONÇALVES, A. A. Physical properties of safflower grains. Part I: geometric and gravimetric characteristics. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 21, n. 5, p. 344-349, 2017b.
- MENDES, U. C.; RESENDE, O.; DONADON, J. R.; ALMEIDA, D. P.; ROCHA, A. C.; OLIVEIRA, D. E. C. Effect of drying on the physical properties of adzuki bean. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 37, n. 6, p. 3871-3880, 2016.

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

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

OLIVEIRA, D. E. C.; RESENDE, O.; MENDES, U. C.; SMANIOTTO, T. A. S.; DONADON, J. R. Modelagem da contração volumétrica do feijão-adzuki durante a secagem. **Científica**, Jaboticabal, v. 42, n. 1, p. 23-31, 2014.

OLIVEIRA, D. E. C.; RESENDE, O.; SMANIOTTO, T. A. S.; SIQUEIRA, V. C.; JOSÉ NETO, C. A. J. Alterações morfométricas em grãos de soja durante o processo de secagem. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 3, p. 975-984, 2013.

QUEQUETO, W. D.; SIQUEIRA, V. C.; SCHOENINGER, V.; MARTINS, E. A. S.; ISQUIERDO, E. P.; SILVA, F. P. Physical properties of buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) grains during convective drying. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 11, p. 793-798, 2018.

RIOS, M. J. B. L.; SILVA, K. J. D.; ARAÚJO, R. S. R. M.; FIGUEIREDO, R. A. T.; ROCHA, M. M.; HASHIMOTO, J. M. Chemical, granulometric and technological characteristics of whole flours from commercial cultivars of cowpea. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 31, n. 1, p. 217-224, 2018.

SHARON, M. E. M.; ABIRAMI, C. V. K.; ALAGUSUNDARAM, K.; ALICE, J. R. P. S. Moisture dependent physical properties of black gram. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, Beijing, v. 17, n. 1, p. 181-187, 2015.

SILVA, C. S.; MOURA, J. G.; OLIVEIRA, A. B.; FERREIRA, L. E.; SILVA, T. M. Growth and gas exchange in cowpea plants under different managements and saline conditions. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 48, n. 5, p.756-764, 2017.

SILVA, M. C. A. T.; CARVALHO, L. S. Ferramenta computacional para dimensionamento de silo unicelular de concreto armado - parte I: silo de seção circular. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 2, p. 378-389, 2015.

SMIDERLE, O. J.; SOUZA, A. G.; ALVES, J. M. A.; BARBOSA, C. Z. R. Physiological quality of cowpea seeds for different periods of storage. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 48, n. 5, p. 817-823, 2017.

THEERTHA, D. P.; SUJEETHA, J. A. R. P.; ABIRAMI, C. V. K.; ALAGUSUNDARAM, K. Effect of moisture content on physical and gravimetric properties of black gram (*Vigna mungo* L.). **International Journal of Advancements in Research & Technology**, v. 3, n. 3, p. 97-104, 2014.