

DISPOSITIVOS ASSOCIADOS À CÂMERA DIGITAL COMUM PARA MENSURAÇÃO DE ÁREA FOLIAR DE PLANTAS NO CAMPO*

Gervásio F. A. Rios¹, Renato A. Rios², Gabriela S. Oliveira³, Fabiana C. Ribeiro⁴, Luiz G. de Carvalho⁵

* Parte das patentes PI1020120212994 e PI1020120335379 solicitadas ao INPI/UFLA

¹ Eng. Agrônomo, Professor Adjunto, Universidade de Brasília - FAV/UnB, e-mail: gervasiorios@unb.br

² Eng. Agrônomo, Universidade Federal de Viçosa - UFV

³ Graduanda de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília - FAU/UnB

⁴ Eng. Agrônoma, Professora Adjunta, Universidade de Brasília - FAV/UnB

⁵ Eng. Agrícola, Professor Associado, Universidade Federal de Lavras - UFLA

Apresentado no
XLIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2014
27 a 31 de julho de 2014- Campo Grande- MS, Brasil

RESUMO: Objetivou-se: 1) desenvolver uma metodologia portátil e alternativa ao método padrão de mensuração foliar direta, escâner LI-Cor 3000c (m.P), mediante um protótipo acessório (m.A1) e, ou um dispositivo laser (m.L1) acoplados à câmera digital comum para determinação da escala fotogramétrica de imagens obtidas; 2) avaliar o desempenho de mensuração de dimensões foliares da mamoneira pelos modelos m.A1, laser m.L1, medição com régua (m.R) e o método padrão m.P; a metodologia foi aplicada para mensuração de área de folhas extraídas ou não da planta de mamoneira sob condições de tempo, campo de cultivo e; nesse contexto, visa estimar a cobertura do solo, estádios fenológicos, biomassa, capacidade produtiva, consumo hídrico, intensidade do ataque de pragas/doenças, previsão de safra, entre outros aspectos ligados à agricultura e trabalhos de pesquisas. Esse trabalho foi desenvolvido utilizando-se os protótipos m.A1 e m.L1, régua graduada (m.R), escâner LI-Cor 3000c (m.P) e uma câmera digital Olympus (mod. FE340); foram realizadas amostragens para validação dos modelos em relação ao padrão (m.P) extraindo-se aleatoriamente nas parcelas vinte folhas, sendo quatro por cinco classes de folhas. Concluiu-se que os modelos de mensuração tiveram desempenhos satisfatórios não diferindo do modelo padrão, significativamente. **PALAVRAS-CHAVE:** Área foliar, Fotogrametria Digital, Homografia, Laser, Telêmetro

USE OF DIGITAL CAMERA COMMON FOR MEASUREMENT OF PLANTS IN FIELD AND IN AGRICULTURAL EXPERIMENTATION

ABSTRACT: This study aimed to: 1) develop a portable and alternative methodology to the direct leaf measurement standard method, scanner LI-3000C Color (m.P), through an accessory prototype (m.A1) and, or a laser device (m.L1) associates to the common digital camera for determination of photogrammetric scale of images obtained; 2) evaluate the performance of measurement of leaf dimensions of castor bean by mod.A1 models, laser m.L1, measuring ruler (m.R) and standard method m.P; the methodology was applied to measure leaf area extracted or not of the castor bean plant under weather conditions, crop field and; in this context, aims to estimate the ground cover, phenological stadiums, biomass, production capacity, water consumption, intensity of attack by pests/diseases, crop forecast, among other aspects relating to agriculture and research work. This study was conducted using the m.A1 and m.L1 prototypes, graduated ruler (m.R), scanner LI-Cor-3000c (m.P) and a Olympus digital camera (model FE340); samplings were performed for validation of the models compared to standard (m.P) extracting itself randomly twenty sheets in the parcels, four of five classes of leaves. It was concluded that the measurement models had satisfactory performance not differing from the standard model, significantly.

KEYWORDS: Castor Bean, Digital photogrammetry, Homography, Laser, Leaf area.

INTRODUÇÃO

A discretização da imagem, aumento de armazenamento e processamento da informação, popularização das câmeras digitais e equipamentos eletrônicos vêm promovendo avanços e possibilidades nunca antes experimentados em diferentes campos do conhecimento humano. No contexto agrícola a fotogrametria e o sensoriamento remoto se destacam como técnicas e meios de quantificação e estimativa da cobertura do solo, biomassa, consumo de água entre outros aspectos ligados à agricultura e trabalhos de pesquisas. Nesse contexto, os protótipos acoplados à câmera fotográfica digital comum para determinação da escala fotogramétrica de imagens foram desenvolvidos tendo como motivação a mensuração acurada e periódica de plantas (ou suas partes: dimensões foliar, projeção da copa, altura, etc.) ao longo de seu ciclo vegetativo por amostragem destrutiva e não-destrutiva da planta; de forma simples, ágil, com reduzida mão-de-obra e; tendo em vista um baixo custo, praticidade e acurácia de medidas a serem processadas e analisadas em trabalhos de pesquisas e avaliações de cultivo no campo.

Essa motivação teve origem na necessidade de mensuração de parâmetros biométricos das plantas, sob distintas condições experimentais de campo e finalidades relacionadas: às estimativas de consumo de água (evapotranspiração); capacidade fotossintética das plantas (produção de biomassa, taxa de ocupação/ cobertura do solo, estádios e escala fenológica do ciclo da cultura) e; às análises do ataque de pragas e doenças (intensidade/ severidade, nível de dano econômico e manejo agrometeorológico); assim como, pelas dificuldades de obtenção dessas medidas no campo, em decorrência, dentre outros fatores, do elevado custo operacional e, ou uso de instrumentos quase sempre caros e importados (a exemplo do LI-Cor 3100c Portable Leaf Area Meter, LI-Cor 3000c, LAI-2200, CI-202 Leaf Area Meter, entre outros). Esse elevado custo é uma das razões pelas quais, salvaguardadas as exceções, muitos experimentos e trabalhos de pesquisa básica poderiam ser mais bem explorados e alcançar resultados mais avançados. Adicionalmente tal motivação teve como pré-requisitos os conhecimentos empreendidos por iniciativa própria e nos cursos de graduação e pós-graduação; a participação e realização de experimentos de pesquisa; as análises e elaboração de artigos, resumos e projeto de pedido de patente junto à Universidade Federal de Lavras.

Com a capacidade computacional extraordinária que nos encontramos o levantamento quantitativo e periódico desses parâmetros é fundamental, pois integram importantes variáveis de estudos da fisiologia, fenologia, fitopatometria, fitotecnia, agrometeorologia, sensoriamento remoto e servem para fins de estimativa, simulação e, ou previsão em modelos de análise quantitativa do crescimento/desenvolvimento vegetativo; grau de ataque de pragas/doenças; às estimativas da evapotranspiração e; componentes de produção das plantas e produtividade (ou safra).

Em síntese, destaca-se a importância de se mensurar/estimar a área foliar (AF) ou o índice de área foliar ($IAF = AF/At$) obtido pela razão entre a área foliar de uma planta e, ou comunidade vegetal (AF) e sua área útil total explorável (At) ao longo do ciclo. Visto que, esse é o principal parâmetro biométrico das plantas, expressando o estado de crescimento e desenvolvimento do vegetal e que está estritamente correlacionado aos três principais fatores da produção vegetal: fotossíntese, fitossanidade e consumo de água (evapotranspiração).

Nesse sentido, além de outros trabalhos já publicados com base em dados de área foliar obtidos utilizando-se dessa metodologia aqui proposta (Rios et al., 2012a; Rios et al., 2012b; Rios et al., 2011a; Rios et al., 2011b; Rios et al., 2011c), vários são os trabalhos que devem e que foram consultados para o embasamento e desenvolvimento desses dispositivos, destacando-se alguns deles relacionados: a) ao estudo de imagens digitais, fotogrametria e uso de softwares (AFSoft; SIARCS; ImajeJ ®) para o processamento e análise de imagens (Brito & Coelho Filho, 2007; Fernandes, 2005; Ferreira et al., 2001; Jorge & Silva, 2009; Reiss & Tommasselli, 2003; Reiss, 2002; Silva, 2006; Rezende, 2006; Rezende, 2008; Valente, 2010; Vieira, 2003); b) à mensuração de área foliar (Fonseca & Condé, 1994; Severino et al., 2004 e 2005; Silva et al., 1998 e 2002); c) à estimativa do Índice de Área Foliar (Favarin, 2002; Marcon et al., 2011; Marcon, 2009; Rezende, 2012; Watson, 1947 e 1952); d) à estimativa do Índice de Área Foliar e análise quantitativa do crescimento/desenvolvimento (Beltrão, 2002; Benincasa, 1988 e 2003; Bréda, 2003; Lima filho et al., 2004; Lucchesi, 1984; Peixoto et al., 2010 e 2011; Procópio et al., 2003; Rios, 2012); e) ao uso de

modelos de simulação do crescimento (Aquacrop, entre outros) e Escala fenológica (Beltrão et al., 2001; Bergamaschi, 2004; Steduto et al., 2009); f) à estimativa da área de projeção da copa, fator de cobertura e avaliação da cobertura do solo (Ferreira et al., 2001; Mehl, 2003; Steduto et al., 2009); g) à estimativa do ataque de pragas/doenças de plantas (Jorge & Silva, 2009; Santos et al., 2010) e; h) outros relacionados à importância de estimativa da área foliar da planta, sua relação com a evapotranspiração, mecanismos da relação fonte-dreno e outras aplicações (Albuquerque et al., 1997; Allen et al., 1998; Doorenbos & Kassam, 1979; Doorenbos & Pruitt, 1977; Lima Filho et al., 2004; Mauloni et al., 2011; Monico et al., 2009; Pereira et al., 1997; Rios et al. 2013; Rodrigues et al., 2005; Rodríguez et al., 2009; Sentelhas, 2001; Silva et al., 2005).

Nesse contexto, propôs-se com este estudo, alcançar os seguintes objetivos: a) desenvolver uma metodologia portátil e alternativa ao método padrão de mensuração foliar direta, escâner LI-Cor 3000c, mediante acessórios e dispositivos lasers acoplados à câmera digital comum para determinação da escala fotogramétrica de imagens obtidas em campo de produção ou áreas de experimentação agrícola; b) avaliar o desempenho de mensuração de dimensões foliares da mamoneira por um dos protótipos acessórios e um dos dispositivos a laser em relação à medição padrão com régua graduada ou método do escâner.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido utilizando-se de um protótipo acessório (tipo A1) e outro dispositivo laser (m.L1), ambos acoplados a uma câmera fotográfica digital marca Olympus Imaging Corp. (mod. FE340), vários apontadores lasers (tipo apontador laser de apresentações de slides), régua graduada, escâner LI-Cor 3000c e de ensaios específicos e experimentos realizados com o cultivo da mamoneira.

Caracterização dos acessórios, dispositivos e protótipos

Esses dispositivos e seus protótipos (A1 e m.L1), individual ou conjuntamente, acoplados na câmara digital são utilizados para determinar a escala da imagem (em pixel/metro) mediante um padrão de referência conhecido, conforme ilustrações da Figura 1.

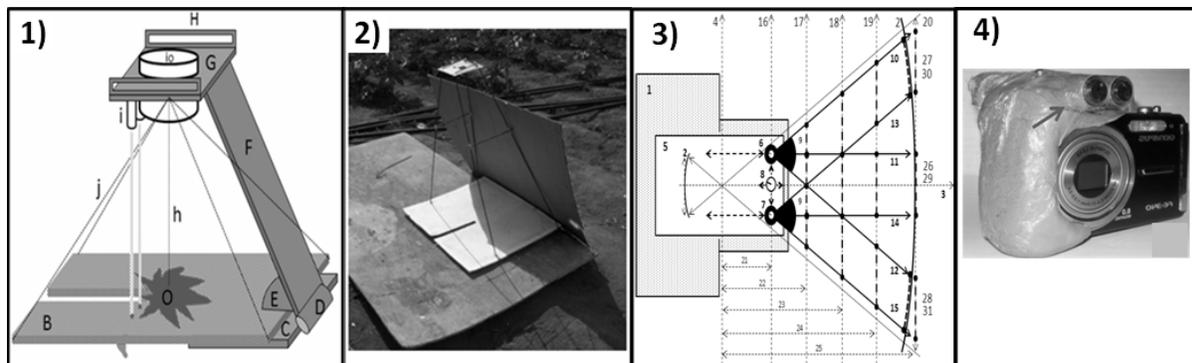


FIGURA 1. Ilustração dos acessórios (1), dispositivos (3) e protótipos (2 e 4) para acoplagem em câmeras fotográficas e suas partes constituintes com o uso da articulação do tipo rígido A1 (C, D, E e F) ou flexível A2 (B e J), associados ou não aos dispositivos lasers tipo A1 (1 e 2), com foto do protótipo tipo A1 (1), ilustração dos dispositivos com um (m.L1) ou três (m.L3) pares de lasers (3) e um protótipo do dispositivo (m.L1) acoplados à câmera digital, destacando-se com as setas as fontes do par de lasers (4).

Os acessórios tipo A1 e tipo A2 foram desenvolvidos fundamentalmente para a maior agilidade e uso nos casos específicos de mensuração biométrica de plantas ou objetos de baixo porte (severidade do ataque de pragas e, ou doenças das plantas, área de projeção e dimensões da copa, ramos, folhas, etc.) por fotografias digitais tomadas a uma distância fixa sob as mais adversas condições de campo, para auxiliar no mais rápido e eficiente processamento das imagens coletadas sem a necessidade ou não do uso do dispositivo-laser de escala. Já esse dispositivo-laser dos tipos modelos com um (m.L1) ou mais pares de lasers paralelos (m.L3) foram desenvolvidos visando maior portabilidade, adaptabilidade, agilidade e precisão para estabelecer a escala métrica da

imagem de objetos dos mais variados tamanhos, distâncias de tomada da fotografia, situações e condições adversas de campo.

O protótipo acessório é acoplável a uma câmara digital comum, e sua estrutura se constitui de três partes básicas, duas bases ligadas por uma haste de articulação rígida do tipo A1 (m.A1) ou flexível do tipo A2 (m.A2). Em todo caso constituindo-se de três partes principais que são descritas a seguir, conforme ilustração e protótipo da Figura 1. Nessa figura, descrevem-se os seguintes componentes:

- O invento com o uso da articulação do tipo rígido A1 (m.A1) é composto pelas partes B, C, D, E, F, G e H em conjunto com dispositivo-laser m.L1 (i) e a câmara (io) encaixada em orifício da plataforma superior (G), podendo ser operada por uma só pessoa na tomada de fotos de pequenos objetos-alvo (O) removíveis ou não da cena original;
- O invento com o uso da articulação do tipo flexível A2 é composto pelas partes B, G, H e J em conjunto com a câmara (io) operado por duas ou mais pessoas na tomada de fotos de pequenos objetos-alvo (O) não removíveis da cena original;
- B é a base inferior de apoio do objeto a ser avaliado (O), com abertura central para entrada do talo (pecíolos) para avaliação de folhas na planta ou do caule de pequenas plantas para avaliação de sua cobertura ou projeção de copa. Pode ser constituída de material rígido e leve (derivados de madeira, papelão, compensados, plástico, acrílico,...), revestida ou impressa com uma referência de escala (papel milimetrado);
- G é a base superior também constituída de material rígido e leve (plástico, alumínio...) onde é acoplado a câmara e duas alças de manuseio (H) do conjunto;
- C é a plataforma inferior de apoio e fixação da base B; D é a articulação (regulável em E) entre C e a haste de sustentação (F) da plataforma superior (G) de apoio do par de alças (H) de operação/movimentação de todo o conjunto constituindo-se no tipo A1 de material rígido e leve (plástico, alumínio...) e das partes C, D, E, F, G e H, conforme Figura 1;
- j (exclusivo do tipo A2) é um conjunto de fios/cordas (de algodão ou nylon) ligados à base B e ao conjunto G-H-i que adequadamente esticado pelo operador define, previamente, altura h fixada entre esse (io) e a base inferior B para fixação e obtenção da referência de escala.

O uso do invento com haste do tipo A1 é adequado para mensuração de pequenos objetos-alvo que não podem ser avaliados in loco, mas que podem ser convenientemente removido a um local adequado do campo, sob a forma de amostras destrutivas, como por exemplo, a mensuração de folhas removidas da copa da planta. O uso da haste tipo A2 supre as limitações anteriores permitindo maior mobilidade de operação e flexibilidade no campo, possibilitando que os objetos-alvo possam ser mensurados in loco sem precisar lançar mão de amostras destrutivas, a exemplo da mensuração de folhas internas à copa da planta. O invento do tipo A2, porém, distintamente do tipo A1, requer dois ou mais operadores na sua operação, um para operar a câmara e outro pra segurar e orientar a base inferior de apoio do objeto-alvo. Ressalta-se que apesar da potencialidade de uso do acessório do tipo A2 esse ainda não foi testado em experimentos. Conforme Figura 1, a diferença entre o protótipo de articulação rígida A1 e o flexível A2 acoplados à câmara (io) se dá pela alternância entre a haste de sustentação rígida (F, E, D e C) e o conjunto de fios/cordas (J) ligando base B e ao conjunto em G.

Uma das alternativas úteis de uso desses protótipos é para a estimativa da escala de projeção da copa de uma planta a partir das medidas de altura de uma régua graduada (X_r) colocada no plano de projeção da copa ao solo. Isso permite a calibração e a estimativa da escala nesse plano, mediante uma função bem ajustada no intervalo de domínio dessas distâncias. ($E=f(X_r)$) ou de medidas de X_i feitas por trena laser (telêmetro), etc., ou dispositivos próprios da câmara digital, conforme ilustração da Figura 2. A aplicação desse modelo se justifica para o caso em que se conhece ou se pode medir com facilidade a distância de tomada da fotografia (X_i).

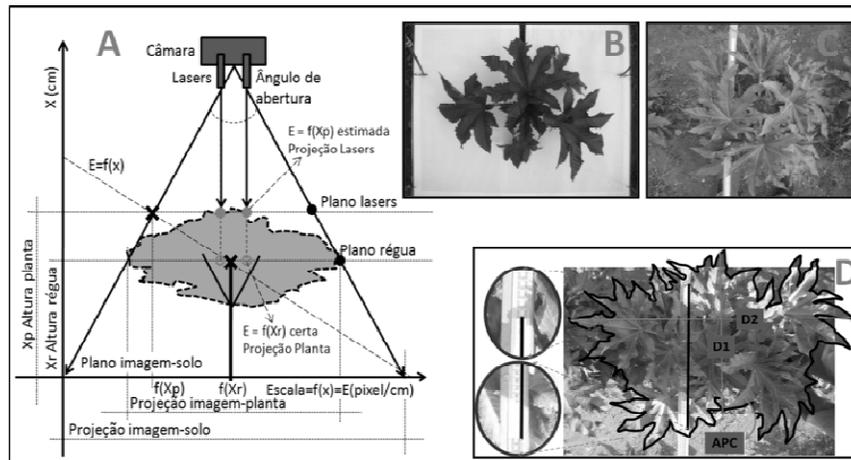


FIGURA 2. Ilustração de uso, aplicação e calibração da função de escala ($E = f(x)$) com a distância (X) para a estimativa de dimensões ($D1$ e $D2$) e área de projeção da copa da planta (APC) no plano da imagem (A e D); APC , $D1$ e $D2$ estimadas com a função do dispositivo laser (A) e auxílio da régua graduada (C e D).

Caracterização dos modelos de medida

Os protótipos acessórios (m.A1 ou m.A2) e laser (m.L1 ou m.L3) se reportam a modelos de determinação de escala da imagem (E , em pixel/cm) e devem atender a alguns pressupostos e observações comuns, tais como os seguintes: i) Os modelos destinam-se às estimativas das dimensões de objetos planos no plano objeto-imagem; ii) As imagens (fotos) devem ser de baixa variação da escala no plano imagem, tiradas de máquinas com lentes de baixa distorção e com configuração padrão (normal), e, ou ortoretificadas em computador, sem requerer a calibração dos parâmetros internos e externos da câmera digital; iii) O dispositivo laser deve ser calibrado e permitir que o par de lasers (de preferência, projetado no centro da cena quando constituído de um par apenas) permaneça perfeitamente paralelo (com sua projeção referencial de tamanho fixo, d), ou o mais paralelo possível (com seu referencial pouco variável, d'), independente da distância do plano objeto-imagem e ; iv) A determinação acurada da escala pelo protótipo e modelos associados exige que o protótipo laser seja calibrado, validado e os lasers sejam projetados de preferência ao centro da cena quando formado de apenas um par.

Com base nessas observações foram avaliados os modelos m.A1 e m.L1 e os modelos padrão de comparações pelo uso da régua (m.R) e do LI-Cor 3000c (m.P) para mensuração das dimensões (largura, L , e comprimento, P) e área foliar unitária (A) por amostragem destrutiva de folhas coletadas, aleatoriamente nas parcelas cultivadas, em três estratos da mamoneira aos 114 dos 220 dias de desenvolvimento da planta, sendo quatro folhas por classe de tamanhos de largura de folha (L) entre 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 e 50-60 cm, correspondentes às áreas entre 70-200, 200-500, 500-800, 800-1.100 e 1.100-1.500 cm^2 , obtidas com o uso da régua (m.R) mediante a equação $A = 0,3526*(P+0,5*L)^2$ que obteve ótimos resultados de ajuste conforme Rios et al. (2011b).

Na Figura 3 são observadas as folhas totalmente apoiadas na base do acessório (em razão da amostragem destrutiva, A) e também sua imagem binarizada para processamento (B), assim como o uso do acessório em amostras não-destrutivas (C e D, visto que, se operado adequadamente e consideradas as características peculiares das folhas, apresenta-se como uma ótima alternativa) e as dimensões foliares utilizadas em modelos de estimativa da área foliar (D) que por processo simplificado de análise e binarização das fotografias digitais foram também mensuradas aplicando-se o Software livre ImageJ®.

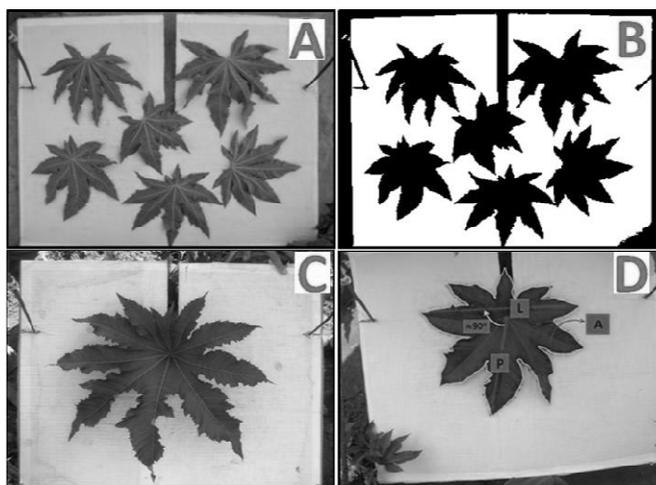


FIGURA 3. Ilustração da aplicação do protótipo acessório rígido (m.A1) acoplado à câmera para obtenção da escala (pixel/cm) e mensuração área foliar e suas dimensões com (A e B) e sem (C e D) extração de amostras foliares da planta; destacando-se a imagem binarizada para processamento (B); e em (D) o comprimento da nervura principal (P); largura da folha (L) e área foliar (A).

As comparações entre as dimensões foliares observadas com o uso de um modelo padrão (m.P) e aquelas estimadas pelos modelos, utilizando o acessório m.A1, dispositivo laser m.L1, bem como a medida com o uso da régua (m.R) foram efetuadas por intermédio do ajuste do modelo de regressão linear simples (RLS-1: $Y_i = bX_i + a + e_i$) dos valores estimados sobre os valores observados. As estimativas dos parâmetros de regressão foram testadas sobre as hipóteses: H_0 ($a=0$), H_a ($a \neq 0$) e H_0 ($b=1$), H_a ($b \neq 1$). No caso de não-rejeição de ambas as hipóteses de nulidade, concluiu-se que os valores observados e estimados foram similares. Em caso contrário, a equação de regressão foi testada suprimindo-se a estimativa do parâmetro intercepto (a) sob o modelo RLS-2: $Y_i = bX_i + e_i$, em que Y_i =dimensão foliar estimada; X_i = dimensão foliar observada; b =coeficiente angular e e_i =erro aleatório, associado a cada observação, pressuposto normalmente distribuído ($0, \sigma^2$). Nessa nova comparação, entre o valor observado e o valor estimado, foram realizadas as seguintes hipóteses: H_0 ($b=1$) e H_a ($b \neq 1$). No caso de não-rejeição da hipótese de nulidade (H_0), concluiu-se que os valores observados e os estimados foram similares e, em caso contrário, rejeita-se H_0 estimando-se em todo caso o erro global da estimativa como: $EGE = (b - 1) \times 100$, em que, b =coeficiente angular estimado de RLS-2 e 1 =valor paramétrico para b sob a pressuposição de a hipótese de nulidade (H_0) ser verdadeira.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de medida e desempenho dos protótipos ou modelos de mensuração foliar, por meio dos dispositivos fotográficos (m.A1 e m.L1), em relação às medidas obtidas pelos modelos padrões da régua (m.R) e escâner LI-Cor 3000c (m.P) foram discutidas conforme as Tabelas 1 e 2 e gráficos da Figura 4.

Na Tabela 1 são apresentadas dimensões das folhas, largura (L) e comprimento da nervura principal (P) obtidas por régua (m.R), mensuradas por classe de largura da folha (L), cujas classes de 0 a 10 cm de largura foi considerada de folhas imaturas e de 60 a 70 cm aquela em que não foi observada folhas nos três estratos das plantas amostradas, e as respectivas áreas foliares (A) obtidas por escâner (m.P) que variam, em média, de 62 a 1.599 cm^2 . Em termos médios essas classes por tamanhos de largura de folha (L) entre 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 e 50-60 cm, correspondem às áreas entre 70-200, 200-500, 500-800, 800-1.100 e 1.100-1.500 cm^2 obtidas pela equação $A = 0,3526 \cdot (P + 0,5 \cdot L)^2$ de ótimo ajuste conforme Rios et al. (2011b).

TABELA 1. Valores médios de Largura (L) e comprimento (P) de folhas da mamoneira por classes de largura obtidas pelo método da régua (m.R) e respectivas áreas foliares (A) obtidas pelo método padrão LI-Cor 3000c (m.P)*

| Classes (L, cm) | n.folhas | L (cm) | P (cm) | A (cm ²) |
|-----------------|----------|-----------|-----------|----------------------|
| 0 - 10 | 0 | - | - | - |
| 10 - 20 | 4 | 14,0 ±3,1 | 10,0 ±1,8 | 104,7 ±42,2 |
| 20 - 30 | 4 | 24,5 ±3,0 | 16,8 ±2,2 | 310,2 ±75,4 |
| 30 - 40 | 4 | 35,3 ±3,2 | 24,8 ±3,0 | 664,4 ±126,3 |
| 40 - 50 | 4 | 45,8 ±3,9 | 30,0 ±2,4 | 996,1 ±174,1 |
| 50 - 60 | 4 | 55,0 ±3,3 | 35,0 ±2,8 | 1393,2 ±205,3 |
| 60 - 70 | 0 | - | - | - |
| Média | - | 34,9 | 23,3 | 693,7 |

*1) ± é a margem de desvio da média ao nível de 95% de probabilidade; 2) P, L e A da folha, conforme Rios et al, (2011b).

As estimativas dos parâmetros das equações de regressão das medidas de dimensões foliares da mamoneira obtidas pelo modelo acessório (P/m.A1) e laser (P/m.L1) em relação às obtidas do modelo padrão de regressão com o uso da régua (m.R), e desses para mensuração da área foliar (A/m.A1, A/m.L1 e A/m.R) em relação ao modelo padrão de regressão com o uso do escâner LI-Cor 3000c (m.P) encontram-se na Tabela 2. Com isso foi possível observar que houve um ótimo ajuste e precisão das equações testadas com relação à regressão linear simples completa (RLS-1) e simplificada (RLS-2). Contudo, observou-se que ambas as hipóteses de nulidade não foram aceitas para todos os modelos testados com relação à regressão completa (RLS-1), destacando-se para ambas as regressões (RLS-1 e RLS-2) a alta precisão desses modelos expressa pelos coeficientes de determinação (R²) e alta acurácia indicada pela aceitação da hipótese de nulidade (b = 1), erro padrão e pelo erro global da estimativa (EGE%).

TABELA 2. Estimativas dos coeficientes (a e b) de regressão linear simples completa (RLS-1) e simplificada (RLS-2), significância das hipóteses de nulidade, coeficientes de determinação (R²), erro padrão (erro-Pd) e erro global de estimativa (EGE%) dos modelos de mensuração de dimensões (P) e área foliar (A) pelo acessório (P/m.A1 e A/m.A1), dispositivo laser (P/m.L1 e A/m.L1) e uso da régua (P/m.R e A/m.R) em relação ao modelo padrão m.R para dimensões (P) e ao método padrão LI-Cor 3000c (m.P) para área foliar (A)*

| Medidas /modelos ¹ | RLS-1 (Y = bX + a) | | | | | RLS-2 (Y = bX) | | | |
|-------------------------------|--------------------|---------|---------------------|---------|----------------|---------------------|---------|------------------|----------------|
| | Intercepto_y | | Coeficiente angular | | R ² | Coeficiente angular | | EGE ² | R ² |
| | a | Erro-Pd | b | Erro-Pd | adm | b | Erro-Pd | % | adm |
| P/m.A1 | -0,251ns | 0,253 | 1,025** | 0,010 | 0,998 | 1,016** | 0,004 | 1,6 | 0,999 |
| P/m.L1 | -0,251ns | 0,252 | 1,023** | 0,010 | 0,998 | 1,013** | 0,004 | 1,3 | 0,999 |
| A/m.A1 | -3,787ns | 24,394 | 1,009** | 0,029 | 0,985 | 1,005** | 0,016 | 0,5 | 0,995 |
| A/m.L1 | -3,806ns | 24,319 | 1,006** | 0,029 | 0,985 | 1,002** | 0,016 | 0,2 | 0,995 |
| A/m.R ³ | -0,461ns | 22,110 | 0,986** | 0,026 | 0,987 | 0,985** | 0,015 | -1,5 | 0,996 |

* Hipóteses Ho: a=0 e Ho: b=1, sendo a e b os parâmetros da regressão linear simples (RLS-1); ¹dimensões da folha da mamoneira estimadas pelos modelos do acessório (m.A1), dispositivo laser associado (m.L1) e modelos padrões com o uso da régua (m.R) e do escâner LI-Cor 3000c (m.P), sendo P=comprimento da nervura principal (observado pelo m.R) e A=área foliar unitária (observada pelo m.P); ²EGE% = (b-1)100 = erro global da estimativa, em %, sendo b da equação RLS-2; ³Área foliar obtida pela equação $A = 0,3526*(P+0,5*L)^2$, sendo P=comprimento e L = a largura foliar conforme Rios et al. (2011b); Os símbolos “***” e “ns” correspondem à significância a 1% e à não-significância a 5% de probabilidade pelo teste t.

As dimensões de comprimento foliar (P) obtidas pelos modelos acessório (P/m.A1) e laser (P/m.L1) superestimaram as mensurações obtidas com o uso da régua (m.R) em apenas 1,6 e 1,3%, enquanto que para as mensurações de área foliar (A) por esses modelos em relação ao modelo padrão de escâner (m.P) tiveram uma pequena superestimação de apenas 0,5 e 0,2% e subestimação pelo uso da régua (m.R) de 1,5%. Ressalta-se que, apesar da pequena diferença, o modelo laser (m.L1) foi o que se destacou entre os modelos, seguido dos modelos de mensuração acessório (m.A1) e pelo uso da régua graduada (m.R).

Na Figura 4 (a) observa-se a acurácia dos modelos m.A1 e m.L1 de mensuração das dimensões foliares (comprimento foliar, P) em relação à mensuração direta com a régua pelo método padrão (m.R), resultante de uma alta aproximação da reta 1:1, coeficientes de determinação

(R^2) superiores a 99% e coeficientes angulares da equação linear próximo da unidade e coeficientes do intercepto-y nulos (Tabela 2), indicativos de grande acurácia dos modelos (maior precisão e menor discrepância).

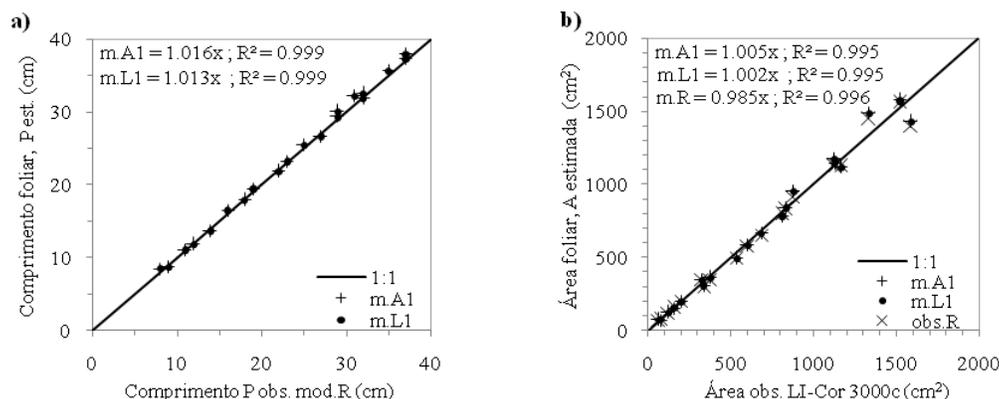


FIGURA 4. Relação entre valores observados e estimados: a) de comprimento foliar (P) da mamoneira pelo modelo acessório (m.A1) e laser (m.L1) em comparação ao modelo padrão de uso da régua (m.R); e b) desses para estimativa de área foliar (A) em comparação ao padrão e escâner LI-Cor 3000c (m.P).

Da mesma forma, na Figura 4 (b), observa-se a grande acurácia dos modelos m.A1, m.L1 e m.R na mensuração de área foliar (A) em relação à mensuração direta pelo método padrão de escaneamento (m.P), resultante de uma alta aproximação da reta 1:1, coeficientes de determinação (R^2) superiores a 99% e coeficientes angulares da equação linear próximo da unidade para coeficientes do intercepto-y nulos.

CONCLUSÕES

- 1) Os modelos e protótipos acessórios da câmera digital comum desenvolvidos para estabelecer a escala de imagens e as dimensões foliares diretamente no campo, por amostragem destrutiva, foram satisfatórios e de grande potencial de uso alternativo, apesar de prescindir de mais aperfeiçoamentos e estudos, sobretudo para aplicações em amostragem não-destrutiva;
- 2) Os protótipos acessórios testados tiveram excelentes desempenhos, precisão e acurácia na mensuração das dimensões foliares, sendo as medidas de área foliar quase que idênticas às obtidas pelo modelo padrão recomendado o qual possui como desvantagens o seu uso restrito a instalações cobertas de laboratórios e a mensuração exclusiva da área foliar escaneada.

AGRADECIMENTOS: À FAV/UnB, ao DEG/UFLA, à CAPES, ao CNPq e à FAPEMIG pela transferência de conhecimentos e, ou disponibilização de recursos.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, P. E. P.; KLAR, A. E.; GOMIDE, R. L. Estimativa da evapotranspiração máxima do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) em função do índice de área foliar e da evaporação da água do tanque Classe A. **Rer. Bras. de Agromet.**, Santa Maria, v. 5, n. 2, p. 183-187, 1997.
- ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 297 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- BELTRÃO, N. E. de M. **Crescimento e desenvolvimento da mamoneira (*Ricinus communis* L.)**. Campina Grande: Embrapa-CNPA, 2002. (Comunicado Técnico, 146).
- BELTRÃO, N. E. de M. et al. Fitologia. In: AZEVEDO, D. M. P. de; LIMA, E. F. (Ed.). **O agronegócio da mamona no Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2001. Cap. 2, p. 37-62.
- BENINCASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas: noções básicas**. 2. ed. Jaboticabal: FUNEP, 2003. 41 p.
- BERGAMASCHI, H. **Fenologia**. Porto Alegre: UFRGS, 2004. (Texto Didático).
- BRÉDA, N. J. J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 54, n. 392, p. 2043-2417, Nov. 2003.
- BRITO, J. L. N. e S.; COELHO FILHO, L. C. T. **Fotogrametria digital**. Rio de Janeiro: EdUERJ, 2007. 196 p.
- DOORENBOS, J.; Kassam, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193 p. (FAO, Irrigation and Drainage Paper, 33).

DOORENBOS, J.; PRUITT, J. O. **Crop water requirement**. Rome: FAO, 1977. 179 p. (Irrigation and Drainage Paper, 24).

JORGE, L. A. de C.; SILVA, D.J.C.B. . AFSoft: **Manual de utilização**. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2009. v. 1. 20p.

MARCON, M. et al. Estimation of total leaf area in perennial plants using image analysis. **Rev. Bras. de Eng. Agr. e Amb.** v.15, n.1, p.96-101, 2011.

MEHL, H. U. **Modelagem da exposição da superfície do solo decorrente do escoamento superficial em sistema plantio direto**. 2003. 107 p. Doutorado (Doutorado em Engenharia Agrícola) –Universidade Federal de Viçosa, 2003.

MONICO, J.F.G et al. Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada. **Bol. Ciênc. Geod.**, sec. Comunicações, Curitiba, v. 15, no 3, p.469-483, jul-set, 2009.

PEIXOTO, C. P. et al. Análise quantitativa do crescimento de plantas: conceitos e práticas. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 7, n. 13, p. 51-76, 2011.

PEIXOTO, C. P. et al. Índices fisiológicos de cultivares de mamoneira nas condições agroecológicas do recôncavo baiano. **Magistra**, Cruz das Almas, v. 22, p. 168-177, 2010.

PROCÓPIO, S. O. et al. Desenvolvimento foliar das culturas da soja e do feijão e de plantas daninhas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 2, p. 207-211, 2003.

REISS, M. L. L., TOMMASSELLI, A. M. G. Orientação de Imagens Sem Pontos de Apoio para Mensuração de Superfícies Planas. **Bol. de Ciênc. Geod.**, 9, 121-139. 2003

RIOS, G. F. A. et al. Ajuste de modelos de estimativa da área foliar da mamona com o uso de medidas simples. In: XXI Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, 21, 2011, Petrolina. **Anais...** Petrolina: CONIRD, 2011a.

RIOS, G. F. A. et al. Avaliação de modelos de estimativa da área foliar da mamona com o uso de medidas simples. In: XXI Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, 21, 2011, Petrolina. **Anais...** Petrolina: CONIRD, 2011b.

RIOS, G. F. A. et al. Estimativa da área foliar da mamoneira por equações e medidas simples obtidas em campo. In: XXI Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, 21, 2011, Petrolina. **Anais...** Petrolina: CONIRD, 2011c.

RIOS, G. F. A. et al. Método e modelos de estimativa de crescimento e desenvolvimento da cultura da alface. In: X Congresso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola - CLIA e XLI Congresso Bras. de Engenharia Agrícola, 41, 2012, Londrina. **Anais...** Londrina: CONBEA, 2012a.

RIOS, G. F. A. et al. Crescimento e desenvolvimento vegetativo da cultura da alface sob diferentes potenciais de armazenamentos de água e irrigação. In: X Congresso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola - CLIA e XLI Congresso Bras. de Engenharia Agrícola, 41, 2012, Londrina. **Anais...** Londrina: CONBEA, 2012b.

RIOS, G. F. A. et al. Espacialização da umidade e densidade no perfil do solo cultivado com feijão-de-metro sob manejos da irrigação. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, p. 1047, 2013.

SANTOS, W. F. et al. Elaboration and Validation of a Diagrammatic Scale for Epidemiological Studies of Cercospora Leaf Spot of Castor Bean. *Journal of Phytopathology*, v.158, p.403 - 408, 2010.

SEVERINO, L. S. et al. método para determinação da área foliar da mamoneira. **Rev. Bras. de Oleag. e Fibr.**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 753-762, 2004.

SEVERINO, L. S. et al. Método para determinação da área foliar da mamoneira. **Embrapa Algodão. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, 55. Campina Grande, 2005. 20p.

SILVA, L.C. et al. Um método simples para se estimar área foliar de plantas de gergelim (*Sesamum indicum*). **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**. Campina Grande, PB. v. 6, n. 1, p. 491-496, jan-abr. 2002.

SILVA, N.F. et al. Modelos para estimar a área foliar de abóbora por meio de medidas lineares. **Revista Ceres** v. 45, n. 259, p. 287-291, 1998.

STEDUTO, P. et al. *AquaCrop*-the FAO crop model to simulated yield response to water: concepts and underlying principles. **Agronomy Journal**, Madison, v. 101, p. 426-437, 2009.

VALENTE, A. C. **Análise comparativa de compressão de imagens fisheye, retilíneas e panorâmicas**. Universidade de Brasília Faculdade de Tecnologia. Trabalho de graduação, Brasília, 3 de setembro de 2010.

WATSON, D. J. Comparative physiological studies on the growth of field crops. 1. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. **Annals of Botany**, London, v. 11, p. 41 76, 1947.