

USO DE CÂMERA DIGITAL COMUM PARA MENSURAÇÃO DE PLANTAS NO CAMPO DE PRODUÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO AGRÍCOLA*

Gervásio F. A. Rios¹, Wendy F. Ataíde², Geraldo B. G. Júnior³, José A. da Mata⁴, Luiz G. de Carvalho⁵

* Parte da patente e PI1020120335379 solicitada ao INPI/UFLA

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

² Eng. Agrícola e Ambiental, Doutorando em Agronomia, Universidade de Brasília FAV/UnB

³ Eng. Agrônomo, Universidade Federal de Viçosa UFV, Biopalma da Amazônia S.A./ Vale S.A.

⁴ Arquiteto e Urbanista, Centro Universitário Metodista Izabela Hendrix, INTERTECHNE

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 neste trabalho apresentar uma metodologia para determinação da escala fotogramétrica de imagens obtidas em câmara digital comum sem a necessidade de referência fixa de escala no espaço objeto; a metodologia foi aplicada em situações do meio agrícola em que o objeto a ser mensurado compõe-se de superfícies planas e; nesse contexto, visa estimar a cobertura do solo, biomassa, estádios fenológicos, monitoramento da 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 de um protótipo laser de escala (E, modelo m.L1), de vários apontadores laseres, acoplado a uma câmera digital marca Olympus (mod. FE340); foram realizados vários ensaios específicos para estimativa, calibração e validação de desempenho dos parâmetros (β , X_o , d') do protótipo (m.L1) e de modelos funcionais vinculados (m.1, 2 e 3), dependentes da distância (X) da imagem (m.1), do referencial homógrafo (d') de um (m.2) ou mais pares de lasers (m.3) em relação ao padrão de grade (m.G). Concluiu-se que os parâmetros do protótipo e modelos tiveram acurácia e desempenho satisfatórios, não recomendado sua utilização a uma distância da câmera inferior a 0,4 m.

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: The objective of this work presents a methodology for determination of photogrammetric scale of images obtained in common digital camera without the need for fixed reference scale in the object space; the methodology has been applied in situations of agricultural environment in which the object to be measured is composed of flat surfaces and; in this context, aims to estimate the ground cover, biomass, phenological stadiums, monitoring of 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 a laser scale prototype (E, m.L1 model), of several lasers pointers, coupled to an Olympus digital camera (model FE340); several specific assays were performed for estimation, calibration and validation performance parameters (β , X_o , d') of the prototype (m.L1) and related functional models (m.1, 2 and 3) dependent on the distance (X) of the image (m.1), of the referential homograph (d') of a (m.2) or more pairs of lasers (m.3) compared to the standard model grid (m.G). It was concluded that the parameters of the prototype and models have had accuracy and satisfactory performance, not recommending their use at a distance of less than 0.4 m camera.

KEYWORDS: Digital photogrammetry, Homography, Laser, Leaf area, Smart Measure.

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, o protótipo acoplado à câmera fotográfica digital comum e modelos vinculados 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 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; Jorge & Silva, 2009; Reiss & Tommasselli, 2003; Valente, 2010; Reiss, 2002); b) à mensuração de área foliar (Severino et al, 2004 e 2005; Silva et al., 1998 e 2002); c) à estimativa do Índice de Área Foliar (Marcon et al., 2011; Watson, 1947); d) à estimativa do Índice de Área Foliar e análise quantitativa do crescimento/ desenvolvimento (Beltrão, 2002; Benincasa, 2003; Bréda, 2003; Peixoto et al., 2011; Procópio et al., 2003); 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 (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; Monico et al., 2009; Rios et al. 2013).

Nesse contexto, propôs-se com este estudo, alcançar os seguintes objetivos: a) desenvolver uma metodologia cujo protótipo do dispositivo a laser acoplado à câmera digital comum tem por finalidade a determinação da escala fotogramétrica de imagens obtidas de objetos-alvo de tamanhos, amostragem não-destrutiva e situações de ambientes variados, ligados à produção e, ou pesquisas de experimentação agrícola; b) fazer a estimativa, calibração e validação de desempenho dos parâmetros dos modelos protótipos e mais três modelos funcionais associados, dependentes da distância da imagem-objeto, do referencial homógrafo de um ou mais pares de lasers em relação ao modelo padrão.

MATERIAL E MÉTODOS

O dispositivo laser funciona acoplado a uma câmera fotográfica digital ou analógica comum para auxiliar na determinação da escala da fotografia digitalizada nas mais variadas situações de tomada. Esse dispositivo projeta na cena imageada um padrão de luz estruturada (na forma de gride ou referência de escala) composto de feixes lasers projetados na cena e cujas medidas, em pixel, juntamente com as medidas do padrão de referência conhecido (em metro), são processadas e compõem a escala da imagem (em pixel/metro), conforme ilustração da Figura 1.

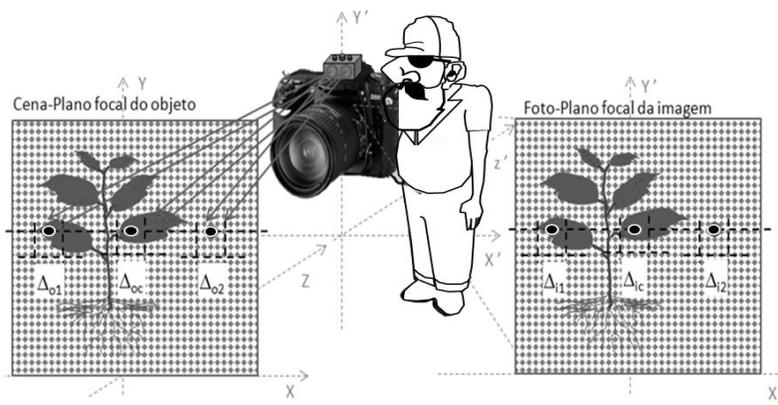


FIGURA 1. Ilustração do funcionamento do invento acoplado à câmera fotográfica.

Com o uso de feixes lasers projetados na forma pontual existem basicamente duas configurações ou modelos: uma em que de cada fonte apenas um feixe pontual é projetado (m.L1), e outra, em que três feixes de cada fonte são projetados (m.L3). Na configuração mais simples (m.L1) em que apenas um par de feixes pontuais laser são projetados, ambas as projeções são orientadas na horizontal e em paralelo entre si e com o eixo óptico de profundidade da câmera para formar dois pontos luminosos em um dos planos do objeto imageados de distância associada. A outra configuração complementar semelhante (m.L3), porém, de maior abrangência da parte periférica da cena imageada (Figura 1), é obtida adicionando em cada fonte emissora e ao plano de projeção mais dois feixes pontuais a Laser, um de cada lado da fonte (externo e interno). Por simetria, o mesmo é válido para os feixes externos e internos de outra fonte adjacente. Em cada fonte é formado o ângulo de abertura conhecida em relação ao feixe central tanto pelo lado do feixe pontual externo quanto pelo lado interno, ambos de modo simétrico e idêntico. Esse ângulo será regulável em relação ao feixe central ou eixo óptico por ajustadores de posição situados sobre as fontes na plataforma de tal forma a manterem paralelos o feixe externo de uma fonte com o interno da outra, e vice-versa. Esse ângulo pode ser no máximo a metade do ângulo de abertura da câmera.

Assim, entre cada par de feixes pontuais paralelos (um de cada fonte), coplanares e projetados horizontalmente, formam-se os seguimentos ao centro e nas laterais da cena imageada. Esses segmentos projetados possuem dimensões reais fixas e determinadas que, após processamento

computacional, servem de base para obtenção homográfica da escala da imagem e, ou sua relação com as dimensões da imagem, Figura 1, independente da distância de registro da cena.

A projeção de feixes lasers na forma laminar, ou seja, linha formada por inúmeros pontos a laser (a semelhança dos leitores de códigos de barra), seguem as mesmas características da projeção na forma pontual, podendo ter disposição de dois ou mais fontes emissoras dos feixes também dispostas na vertical, isto é, uma acima da outra na cena imageada, com projeções de duas ou mais linhas lasers horizontais paralelas. Na Figura 2 abaixo é apresentado o protótipo dispositivo laser calibrado e utilizado em trabalhos de pesquisa. Ressalta-se que pensar da potencialidade de uso de um ou mais pares de lasers (Figura 1) o protótipo desse último tipo ainda não foi construído.

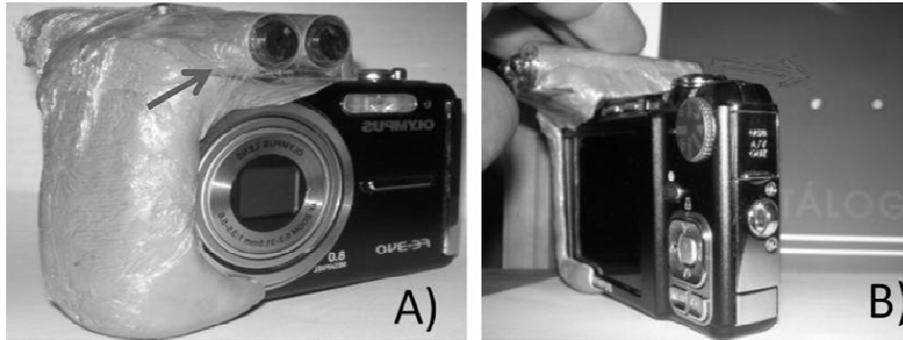


FIGURA 2. Ilustração de um protótipo m.L1 indicado com setas as fontes do par de lasers (A) e suas projeções (pontos claros) na parede (B).

Modelos de medida pelo protótipo-laser

Os métodos de medida do protótipo laser se referem aos modelos de determinação da escala da imagem (E , em pixel/cm) atendidos alguns pressupostos e observações comuns: 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 analisados cinco modelos para a obtenção da escala da imagem (E , em pixel/cm) pelo protótipo laser. Os três primeiros (m.1, m.2 e m.3) foram baseados na estimativa de uma função específica de escala. Os dois demais modelos (m.L e m.G) basearam-se na estimativa direta da escala com base apenas na medida homográfica da imagem (y_i ou y'_i , em pixel) correspondente à projeção fixa do referencial de medida conhecida (d ou d' , em cm) do par de lasers (m.L1); ou conforme o uso de uma grade de 30 x 30 cm (m.G), circunscrita às plantas de alface imageadas a uma altura média de 100 cm, adotado nesse estudo, como modelo padrão de referência. Esses modelos são descritos a seguir.

Função de escala com a distância (Modelo-1)

O modelo m.1 é a função da escala estimada variável com a distância de tomada do objeto-imagem. A função da escala da imagem ($E = f(X)$, em pixel/cm), variável com a distância de tomada do plano do objeto imagem (X , em cm) para um protótipo-laser específico, pode ser ajustada por regressão mediante um experimento de simples calibração e o levantamento de medida dos pares ordenados ($X_i; E_i = f(X_i)$), tal que $E_i = y'_i/d'$ para o par de lasers pouco paralelos ou $E_i = y_i/d$ para lasers perfeitamente paralelos, conforme o modelo m.L1. 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) e uma função bem ajustada. Uma das alternativas úteis de uso desse modelo 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.

Função de escala com a projeção (Modelo-2)

O modelo m.2 é a função de escala estimada variável com o tamanho do referencial homográfico projetado (de preferência) no centro da cena imageada por um só par de lasers de um protótipo específico (Figura 2, protótipo modelo m.L1). Essa função foi ajustada por regressão mediante um experimento de simples calibração e levantamento de medidas dos pares ordenados ($y'i$; $E_i = f(y'i)$), tal que $E_i = y'i/d'$ para o par de lasers pouco paralelos ou $E_i = y_i/d$ para lasers perfeitamente paralelos pode ser ajustada, com a escala da imagem ($E = f(y)$, em pixel/cm) variável com o tamanho (y_i ou $y'i$, em pixel) do referencial fixo (d ou d' em cm), independente da distância X_i de tomada da cena imageada. A aplicação desse modelo se justifica pela praticidade de se estimar a escala de determinada fotografia digital pelo dispositivo protótipo-laser (m.L1), sob as mesmas configurações em que foi ajustado o modelo.

Função de escala média com as projeções (Modelo-3)

Quanto ao modelo m.3 a função de escala média é variável com o tamanho do referencial homográfico projetado na cena imageada por mais de um par de lasers de um protótipo específico, particularmente de três pares de lasers (m.L3), conforme Figura 1. Essa função pode ser ajustada por regressão mediante um experimento de simples calibração e levantamento de medidas dos pares ordenados dos três pares projetados (\bar{y}_i ; $\bar{E}_i = f(\bar{y}_i)$), tal que $\bar{E}_i = \text{média}(y'i/d'i)$ para os pares de lasers pouco paralelos ou $\bar{E}_i = \text{média}(y_i/d_i)$ para os pares de lasers perfeitamente paralelos, conforme o modelo m.L3. A aplicação desse modelo se justifica pela maior representatividade possível da escala média no plano da imagem (com freqüentes distorções de suas margens em razão da lente) e pela praticidade de estimá-la pelo dispositivo protótipo-laser sob as mesmas configurações em que foi ajustado o modelo. Nesse caso, basta medir diretamente na imagem o tamanho médio da homógrafa (\bar{y}_i ou \bar{y}'_i , em pixel) correspondente à média das projeções dos pares de lasers (d_i ou d'_i , em cm) e entrar com esse valor na função para proceder com as conversões das medidas digitais de interesse para o sistema métrico. A estimativa da escala média por esse modelo foi obtida dos ensaios de calibração realizados com uma régua graduada (em mm) fixada numa parede e no centro da cena imageada. No centro da régua foi projetado o par de lasers central do protótipo ($d'i$) de medidas homógrafas desse referencial ($y'i$) e de medidas de 10 cm nas partes marginal ($y'i3$) e intermediária ($y'i2$) da régua e, ou imagem obtida; simulando assim, as referências de mais dois pares de lasers projetados na periferia da imagem (Figura 1). Adicionalmente o uso desse dispositivo com pares de lasers distribuídos por toda a extensão da cena e, ou imagem se justifica em aplicações específicas que requeiram maior rigor nas medidas, considerando-se a projeção de referência e sua homógrafa como um modelo matricial ($[y_i] \times [d_i]$), podendo inclusive ser utilizado para ortorretificação de imagem e método de calibração dos fatores internos e externos de câmeras digitais.

Função direta de escala com a projeção do modelo simples (m.L1)

A estimativa da escala no m.L1 pode ser diretamente calculada caso o par de lasers forem perfeitamente paralelos. Caso não existam condições práticas para construir o dispositivo laser com seu par de feixes perfeitamente paralelos, e sim como ocorreu nesse trabalho (Figura 2), condições suficientes para torná-los o mais paralelo possível (com pequena divergência entre eles), e nesse caso, a escala foi obtida pela razão entre a homógrafa ($y'i$, em pixel) e seu correspondente corrigido ($E = y'i/d'$, pixel/cm). Dessa forma, para esse caso existe a necessidade de fazer calibração e validação de alguns parâmetros via teste ou ensaios repetitivos, conforme foi feito e será descritos a seguir.

Calibração do protótipo e estimativa de seus parâmetros

A calibração do protótipo foi necessária em razão do uso de lasers comuns de fabricação grosseira e da disponibilidade de instrumentos adequados para se estabelecerem fixos o paralelismo entre par de lasers ou a medida do seguimento (d) formado entre os seus centros de projeção em todas as distancias testadas a partir da cena inicial (X_o), a cada 10 cm entre o projetor laser e o

objeto fotografado (X_1, X_2, \dots, X_i , em cm) até o máximo de 600 cm, considerando o eixo mediano da projeção laser colinear ao eixo ótico da câmera, Figura 3 (a e b).

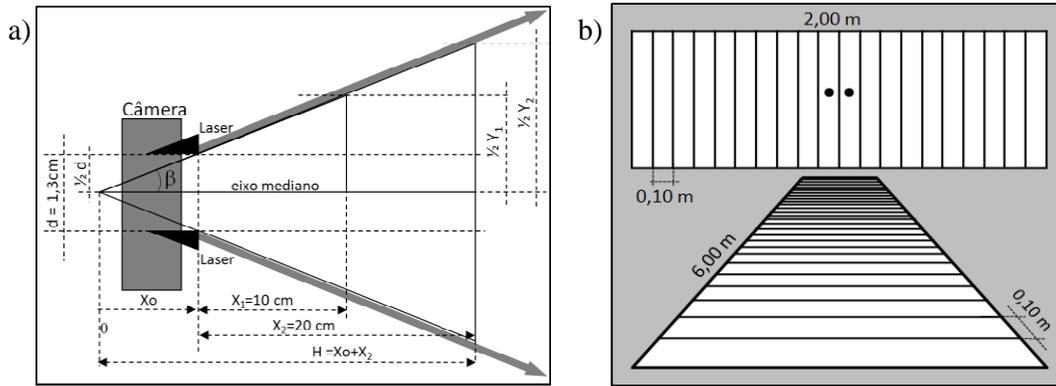


FIGURA 3. a) Ilustração geométrica do desvio de projeção paralela do par de lasers caracterizado pelo semi-ângulo beta (β) entre os lasers e o eixo mediano, distância inicial entre o início da projeção do par de lasers e o vértice entre eles (X_0); b) Ilustração da forma de calibração experimental do paralelismo entre as projeções lasers, em perspectiva.

Esse procedimento visou determinar: a) o semi-ângulo beta médio ($\bar{\beta}$); b) a distância inicial (X_0) formada entre o seguimento inicial ($d=1,3$ cm) e o vértice da projeção dos lasers e; c) o seguimento estimado (d') para todas as distâncias de tomada da foto (X_1, X_2, \dots, X_i) a partir do vértice H ($X_0+X_1, X_0+X_2, \dots, X_0+X_f$), conforme ilustrado na Figura 3(a e b), baseando-se nas respectivas Equações 1, 2, 3.

$$\bar{\beta} = \tan^{-1}(\tan \bar{\beta}) \quad (1)$$

$$\tan \bar{\beta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tan(\beta_i) \equiv \text{Média}(\tan(\beta_i)) \quad (1a)$$

$$\tan(\beta_i) = \frac{1/2(Y_{i+1} - Y_i)}{(X_{i+1} - X_i)} \quad (1b)$$

$$X_0 = \frac{1/2d}{\tan(\bar{\beta})} \quad (2)$$

$$d' = 2H \tan(\bar{\beta}) \equiv H \tan(\bar{\alpha}) \quad (3)$$

$$H = X_0 + X_f \quad (3a)$$

$$\bar{\alpha} = 2\bar{\beta} \quad (3b)$$

em que,

$\bar{\beta}$ é o semi-ângulo beta médio estimado pelo inverso (arco-tangente) da tangente média ($\tan^{-1}(\tan \bar{\beta})$) dos valores tangentes ao feixe laser a cada 10 cm de leituras tomadas às distâncias X_i ($\tan(\beta_i)$); Y_{i+1} e Y_i são as respectivas medidas reais da projeção (em cm) do seguimento d' (em cm) tomado da imagem a cada X_{i+1} e X_i (em cm), respectivamente; d' é o seguimento de projeção do seguimento d (formado pelos centros de projeção inicial do par de lasers) e estimado para cada distância de tomada da foto a partir da distância inicial de projeção até o vértice entre os lasers (X_0) ou nas demais distâncias posteriores a partir do vértice H ($X_0+X_1, X_0+X_2, \dots, X_0+X_f$, em cm); X_i é a medida de distância (cm) entre a projeção inicial do par de lasers (X_0) e o objeto fotografado a cada 10 cm, tomada até 600 cm de X_0 ; H é a distância estimada entre o vértice e a projeção do par de lasers (d') sobre o objeto fotografado a cada 10 cm (em cm); X_f é a medida de distância X_i (em cm) de tomada das fotos do experimento da alface, no caso, feitas a 100 cm de X_0 ; β é semi-ângulo de α formado no vértice entre os feixes lasers de cada par (em rad).

Na estimativa de beta médio ($\bar{\beta}$) foram excluídos do cálculo valores extrapolados (outliers) de tangentes ($\tan(\beta_i)$) tomadas a cada 10 cm de distâncias (ΔX_i).

Validação e desempenho dos modelos

A validação e avaliação do desempenho foram feitas para os modelos m.1, m.2, m.3 e m.L assumindo como padrão o modelo do uso da grade m.G. As funções dos modelos m.1, m.2 e m.3

foram ajustadas por regressão dos dados obtidos do experimento de calibração (X_i ; $y_i(d'i)$ e $d'i$, $y_i2(10\text{ cm})$ e $y_i3(10\text{ cm})$, esse três últimos ao centro, ao meio e na margem da imagem), conforme já mencionado, e a avaliação de desempenho e validação desses e do modelo do protótipo laser calibrado (m.L1) foram feitas com base nos dados testes (1 e 2) de duas avaliações (aos 7 e 14DAT, dias após transplante). Nos testes 1 e 2 foram obtidas de 60 plantas de 20 parcelas (3 plantas/parcela) as homógrafas $y(d')$ e $y(L)$ dos parâmetros do m.L1 ($d'=5,944\text{ cm}$ segundo calibração) e m.G ($L=30\text{ cm}$) das respectivas imagens tomadas de uma altura fixa média de 100 cm, à semelhança do observado para uma única parcela na Figura 4 (A e B). Nessa Figura 4 (C) também está indicado o processo simplificado de análise e binarização das fotografias digitais para obtenção das medidas de interesse que foram realizadas aplicando-se o Software livre ImageJ®.

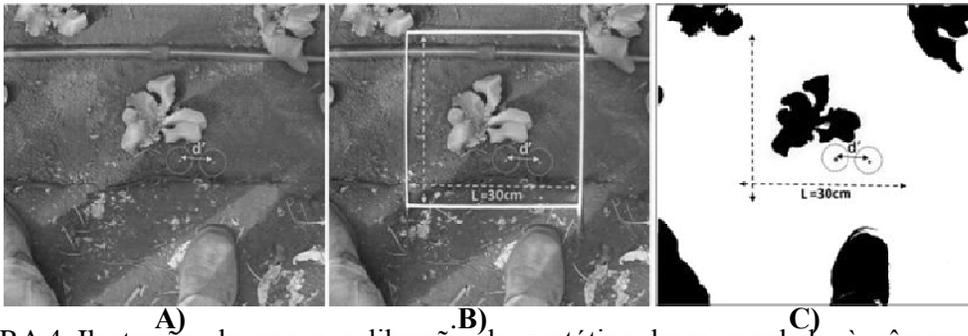


FIGURA 4. Ilustração do uso e calibração do protótipo laser acoplado à câmera (m.L1) para obtenção da escala (pixel/cm) e mensuração das dimensões da área de projeção da planta de alface; com uso de um par de lasers paralelo de referência d' (A); com uso de um quadrado de referência (grade) de 30 x 30 cm (B); e o uso dessas referências na imagem binarizada e processada no software ImageJ® (C).

Dessa forma, utilizando-se dos dados dos testes 1 e 2 a validação e avaliação do desempenho dos modelos em comparação ao padrão (m.G) foram feitas supondo serem semelhantes às escalas obtidas das imagens por cada modelo, visto que foram tomadas com o protótipo calibrado aproximadamente da mesma distância ($X_f = 100\text{ cm}$). Assim, depois de obtidas as estimativas de escala da imagem (E) pelas respectivas funções com base na distância de tomada da imagem (X_f) para o m.1; na média das escalas obtidas das homógrafas (y_i) do parâmetro referência (d') de todas as imagens para o m.L1 $\bar{E} = \text{média}(Y_i/d')$, e na média das homógrafas (y_i) do referencial (d') para os modelos m.2 e m.3, foram determinados os parâmetros de tendência e precisão dos resultados conforme Severino et al. (2005) e Monico et al. (2009). Esses parâmetros de acurácia do equipamento foram para as medidas de precisão relativa aos erros aleatórios (dispersão ou incerteza): o intervalo de confiança ao nível de 95% de probabilidade (Int.c95%) ou margem de desvio da média (MDM.95%) e o coeficiente de variação dos desvios em relação à média (CV%); e para as medidas de tendência relativa aos erros sistemáticos (viés ou discrepância): o desvio percentual entre valor estimado (E) e observado ($D\% = 100 * (E - O) / O$), o desvio médio percentual da média (DM%) estimada pelo modelo em relação à média observada padrão m.G ($DM\% = 100 * (ME - MO) / MO$); ou para ambos, o coeficiente de variação percentual dos desvios do modelo (Di) em relação à média do modelo padrão m.G ($CV\% * = \text{Desvio Padrão}(Di) / MO$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de calibração, validação e desempenho do dispositivo protótipo e modelos das funções de escala com um (m.1 e m.2) ou mais pares de laser (m.3), dependentes da distância de tomada da imagem (X_i), da homógrafa simples ($Y'i$) e média (\bar{Y}) do referencial laser (d'), respectivamente, foram discutidas conforme as Figuras 5 e 6 e Tabelas 1 e 2.

Calibração, validação e desempenho de protótipos

Na Figura 5a observa-se que a distorção variou muito significativamente (de forma logarítmica) até a distância de 0,4 m e a partir desse valor estabilizou-se com médias de distorção de -2,8 e 9,7 pixels para o meio e margem do seguimento médio da largura da imagem (1920/2 pixel), respectivamente, tendo sido considerado nulo a distorção no centro radial da imagem.

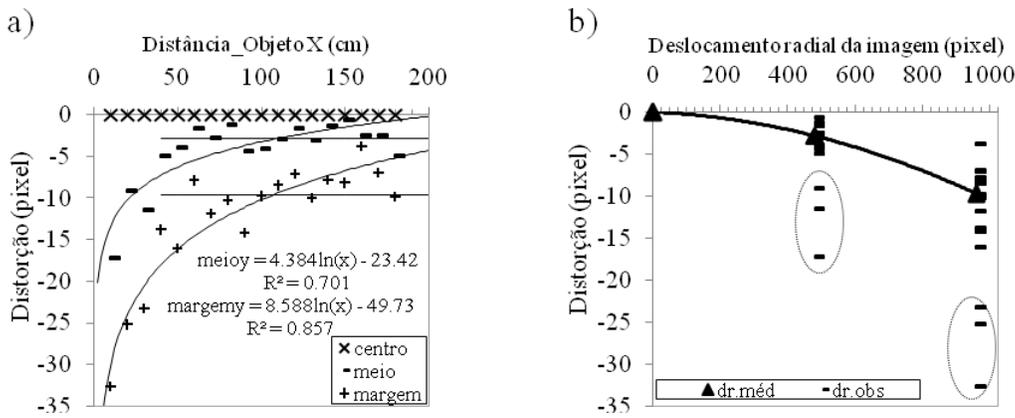


FIGURA 5. a) curvas de distorção do conjunto câmera-protótipo-laser com a tomada distância objeto da imagem (X) em 3 posições a partir do centro da imagem (centro, meio e margem) e; b) curva de distorção média da largura da imagem com o deslocamento radial da largura da imagem (Distância_imagem Y'i) obtida dos dados observados no intervalo $0,4 \leq X \leq 1,8$ m.

Adicionalmente, observa-se ainda que a distorção variou de forma quadrática com o deslocamento radial da largura da imagem (Y'i), mais significativamente entre -2,8 a 9,7 pixels a partir do meio para as margens ($480 < Y'i < 960$ pixel), ressaltando-se que essa curva média foi estimada para dados obtidos entre 0,4 e 1,8 m de profundidade da cena imageada (Figura 5b). Com isso, para se obter maior precisão é indicado que o objeto a ser mensurado ocupe a região central da imagem (4/16 de área) e a uma distância (profundidade) superior a 0,4 m.

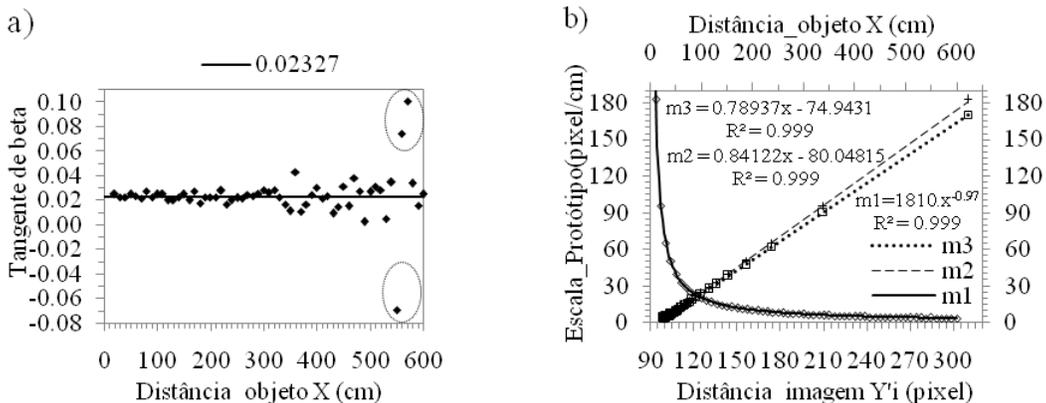


FIGURA 6. Tangente média obtida dos dados observados do conjunto câmera-protótipo-laser (0,02327) e; Curvas dos modelos mod.1, mod.2 e mod.3 do protótipo-laser variável com a tomada da distância objeto da imagem (X), com a homógrafa simples (Y'i) e média (\bar{Y}) do referencial laser (d'), respectivamente.

Na Figura 6a observa-se que os dados de tangente do semi-ângulo (beta), excluídas as extrapolações (outliers), pouco variou com a distância de tomada da imagem com média de 0,2327, com margem de desvio médio de $\pm 0,0014$ ao nível de 95% de probabilidade e coeficiente de variação de 22,24%. Com base nesse parâmetro foi possível estimar os demais (β , X_0 e d') observados (Tabelas 1 e 2). Nessa Figura 6b também são observados as funções estimadas dos modelos m.1, m.2 e m.3, destacando-se o excelente ajuste potencial (R^2) de escala (E) com a distância de tomada da imagem (X) no m.1 e linear com a homógrafa (Y'i) do referencial (d') nos m.2 e m.3. Esses modelos de estimativa de escala foram comparados, validados e aquilatados segundo os parâmetros de desempenho observados para os testes 1 e 2, obtendo-se resultados semelhantes nos dois testes, conforme as respectivas Tabelas 1 e 2.

TABELA 1. Parâmetros característicos do protótipo (β , X_f , X_o , d , e d'), escala média (E) e as medidas de desempenho (D%, Média, Desvio Padrão, CV%, MDM.95%, CV%* e DM%) dos modelos (m.1, 2, 3, L1 e G) em relação ao padrão (m.G), testes 1 e 2*.

Testes 1 e 2 das Avaliações 1 e 2*							
modelos	β	X_f	X_o	d	d'	E	D%
	(graus)		(cm)			(Pixel/cm)	(%)
m.1	1,33	100	28	1,3	5,944	20,78(20,78)	-0,78(2,73)
m.2	1,33	100	28	1,3	5,944	21,04(19,64)	0,53(-2,91)
m.3	1,33	100	28	1,3	5,944	19,92(18,60)	-4,85(-8,04)
m.L1	1,33	100	28	1,3	5,944	20,22(19,94)	-3,42(-1,45)
m.G	-	-	-	30,0	-	20,93(20,23)	0,00(0,00)
Escala da imagem (E)							
modelos	Média (pixel/cm)	DesvioP. (pixel/cm)	CV% (%)	MDM.95% (pixel/cm)	CV%* (%)	DM% (%)	
m.L	20,22(19,94)	0,14(0,17)	0,69(0,85)	$\pm 0,04(\pm 0,04)$	2,52(2,31)	-3,42(-1,45)	
m.G	20,93(20,23)	0,63(0,73)	2,92(3,60)	$\pm 0,16(\pm 0,18)$	-	-	
Homógrafa (yi) do referencial dos modelos (d' ou 30 cm)							
modelos	Média (pixel)	DesvioP. (pixel)	CV% (%)	MDM.95% (pixel)	CV%* (%)	DM% (%)	
m.L1	120,17(118,51)	0,83(1,00)	0,69(0,85)	$\pm 0,21(\pm 0,25)$	-	-	
m.G	627,99(606,89)	18,75(21,87)	2,99(3,60)	$\pm 4,74(\pm 5,53)$	-	-	

valores entre parênteses referem-se ao teste 1; 1) β - é o semi-ângulo médio do ângulo α formado entre os feixes do par de lasers do protótipo; 2) X_f - é a distância fixa da medida (X_i) de tomadas das imagens a partir de "Xo" no experimento com a alface; 3) X_o - é a distância fixa estimada da projeção inicial do par de lasers a partir do vértice; 4) d' - é o seguimento de desvio da projeção inicial d (formado na projeção inicial do par de lasers em X_o); 5) y_i - é a medida digital da projeção (em pixel) correspondente ou homografia do seguimento referencial do modelo padrão m.G ($L = 30$ cm) ou m.L1 (d ou d' , em cm) tomada da imagem a cada profundidade X_i (no caso foram 60 dados y_i de 60 imagens tomada a partir de $X_i = X_f$ de 100 cm, de 10 em 10cm); 6) D% - é o desvio percentual entre valor estimado e observado; 7) CV% - é o coeficiente de variação dos desvios em relação à média; 8) MDM.95% - é a margem de desvio da média ao nível de 95% de probabilidade; 9) CV% - é o coeficiente de variação percentual dos desvios do modelo em relação à média do modelo padrão m.G; 10) DM% - é o desvio médio percentual da média estimada pelo modelo em relação à média observada padrão m.G.

Segundo essas análises os modelos revelaram alta acurácia, com medidas de tendência (discrepância) das estimativas muito baixa, com D% (em valor absoluto) menor que 2,74%, 2,92%, 8,05% e 3,42% para os modelos m.1, m.2, m.3 e m.L1 tendo-se como referência o modelo padrão (m.G), destacando-se o m.2 no teste 1 e o m.L1 no teste 2, conforme Tabelas 1 e 2. Com relação às medidas de precisão o modelo m.L1 teve alta precisão, assim como os demais modelos m.1, m.2 e m.3, tendo-se por base os baixos valores de desvio da média com CV% de até 0,85% e MDM95% de $\pm 0,04$ pixel/cm para o m.L1 e CV% de até 3,60% e MDM95% de $\pm 0,04$ pixel/cm para o m.G. Ressalta-se que a maior discrepância do mod.3 entre os modelos funcionais possivelmente ocorreu em razão do grau de distorção da lente da câmera, Figura 5b.

Assim, o desenvolvimento e uso desses dispositivos em estudos futuros poderão abrir muitas possibilidades de aplicação em pesquisas e levantamentos de dados a um baixo custo, tais como: na agricultura de precisão com o dispositivo laser sendo acoplado ao trator, veículos aéreo não tripulado (Vant ou Drone); na estimativa de fatores internos e externos da câmera visando sua calibração e modelagem específica, como é o caso da ortorretificação de imagens, e; também com potencial em pesquisas de levantamento de dados biométricos de animais silvestres de difícil acesso com o auxílio de armadilhas fotográficas entre outras muitas possibilidades de uso.

CONCLUSÕES

- 1) Os modelos e dispositivo protótipo desenvolvidos para estabelecer escala de imagens foram satisfatórios, e apesar de terem sido construídos e calibrados de forma simples a um baixo custo e com alta acurácia, não fazem prescindir de mais aperfeiçoamentos e estudos;
- 2) Os modelos e protótipos tiveram excelentes desempenhos e os parâmetros de calibração do protótipo laser e seus modelos funcionais foram estimados e ajustados adequadamente, não sendo indicado, entretanto, a utilização do dispositivo a uma distância muito próxima da câmera.

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-CNPQ, 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.