

Estimação da área foliar de feijão guandu por dimensões foliares

Leaf area estimation of pigeonpea by leaf dimensions

Alberto Cargnelutti Filho^I Marcos Toebe^{II} Bruna Mendonça Alves^{II} Cláudia Burin^{II}

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi modelar e identificar os melhores modelos para a estimação da área foliar de feijão guandu, determinada por fotos digitais em função do comprimento, ou da largura e/ou do produto comprimento vezes largura do limbo do folíolo central da folha. Foram conduzidos dois experimentos com a cultura de feijão guandu. No primeiro experimento, foram realizadas coletas de 200 folhas aos 45, 52, 59, 65, 72, 79, 86, 94, 100, 106 e 114 dias após a emergência (DAE), totalizando 2.200 folhas. No segundo experimento, foi realizada uma coleta de 220 folhas aos 69 DAE. Nessas 2.420 folhas, foram mensurados o comprimento (CFC) e a largura (LFC) e calculado o produto do comprimento vezes a largura (CFC×LFC) do limbo do folíolo central. A seguir, determinou-se a área foliar de cada folha (soma da área foliar dos folíolos esquerdo, central e direito), por meio do método de fotos digitais (Y). Posteriormente, foram separadas, aleatoriamente, 90% das folhas do primeiro experimento (1.980 folhas), para a geração de modelos do tipo quadrático, potência e linear, de Y em função do CFC, da LFC, e/ou do CFC×LFC. Os 10% das folhas restantes do primeiro experimento (220 folhas) e as 220 folhas coletadas no segundo experimento foram usadas, separadamente, para a validação dos modelos. Em feijão guandu, os modelos do tipo quadrático ($\hat{Y}=0,4295+1,5895x+0,0011x^2$, $R^2=0,9710$), potência ($\hat{Y}=1,6591x^{0,9983}$, $R^2=0,9769$) e linear ($\hat{Y}=-1,3555+1,6858x$, $R^2=0,9708$), de Y em função do CFC×LFC, são adequados para a estimação da área foliar e o linear, pode, preferencialmente, ser utilizado.

Palavras-chave: *Cajanus cajan* (L.) Millsp., fotos digitais, modelagem, método não-destrutivo.

ABSTRACT

The objective of this research was to model and identify the best models to estimate the leaf area of pigeonpea determined by digital photos with the length or width and/or the product length width of the central leaflet limb of the leaf. Two trials were carried

with the culture of pigeonpea. In the first experiment, samples from 200 leaves were taken at 45, 52, 59, 65, 72, 79, 86, 94, 100, 106 and 114 days after emergence (DAE), totaling 2,200 leaves. In the second experiment, a sample from 220 leaves was collected at 69 DAE. In these 2,420 leaves, were measured the length (CFC) and width (LFC) and calculated the product length width (CFC×LFC) of the central leaflet. Then, was determined the leaf area of each leaf (sum the leaf area of the leaflets left, center and right) by the method of digital photos (Y). After, were separated, randomly, 90% of the leaves from the first experiment (1,980 leaves), to build models of quadratic type, potency and linear for Y function of the CFC, LFC and/or CFC×LFC. The remaining 10% of the leaves from the first experiment (220 leaves) and the 220 leaves collected in the second experiment, separately, were used to validate the models. In pigeonpea, the quadratic model ($\hat{Y}=0.4295+1.5895x+0.0011x^2$, $R^2=0.9710$), the potency model ($\hat{Y}=1.6591x^{0.9983}$, $R^2=0.9769$) and the linear model ($\hat{Y}=-1.3555+1.6858x$, $R^2=0.9708$), of Y as a function of CFC×LFC are adequate for estimation of the leaf area and linear, may preferably be used.

Key words: *Cajanus cajan* (L.) Millsp., digital photos, modeling, non-destructive method.

INTRODUÇÃO

O feijão guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.) pertence à família Fabaceae, é uma cultura anual ou semiperene, tem porte arbustivo ereto e mede de 2 a 3m de altura. É utilizado como adubo verde, devido ao elevado potencial produtivo de massa seca para a cobertura do solo (FERNANDES et al., 1999). O cultivo de feijão guandu, consorciado com hortaliças, em sistema de aleias, permite um aporte de 283kg ha⁻¹ de N e de 23kg ha⁻¹ de P, em

^IDepartamento de Fitotecnia, Centro de Ciências Rurais (CCR), Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil. E-mail: alberto.cargnelutti.filho@gmail.com. Autor para correspondência.

^{II}Programa de Pós-graduação em Agronomia, UFSM, Santa Maria, RS, Brasil.

apenas cinco meses de cultivo, garantindo produção orgânica comparável à produção convencional de hortaliças (ALVES et al., 2004).

A quantificação da área foliar de uma cultura é importante em estudos de crescimento, uma vez que a fotossíntese realizada depende da interceptação da energia luminosa pelo dossel e da sua conversão em energia química (FAVARIN et al., 2002). Para a quantificação da área foliar, existem métodos diretos e indiretos de estimativa da área foliar. Os métodos diretos, em geral, necessitam da coleta de folhas ou de biomassa, sendo destrutivos e demorados. Já a maioria dos métodos indiretos baseia-se na estimativa da área foliar em função de dimensões lineares das folhas. Para isso, em algumas folhas coletadas são mensuradas as dimensões lineares (comprimento, ou largura e/ou produto do comprimento vezes a largura) e determinada a área foliar real e, posteriormente, são gerados e validados modelos de estimativa da área foliar em função dessas dimensões lineares. Com base nesses modelos, é possível mensurar dimensões lineares das folhas no campo e estimar a área foliar, em diferentes fases de crescimento e desenvolvimento, sem a necessidade de destruição das plantas.

Para que os modelos de estimativa da área foliar gerados sejam adequados, é necessário que as dimensões lineares e a área foliar real sejam corretamente mensuradas. Para a mensuração das dimensões lineares, usa-se, em geral, régua milimetrada. Já o uso do integrador de área foliar LI-COR® (LI-COR 3100, 1996) é considerado o método padrão para a determinação da área foliar real, em substituição ao método de discos foliares. No entanto, em trabalhos na cultura de cafeeiro e em folíolos íntegros e danificados de soja, TAVARES JÚNIOR et al. (2002) e ADAMI et al. (2008) verificaram que a determinação da área foliar real por processamento de imagens digitais (fotos digitais) é adequada e apresenta resultados similares ao método LI-COR®, podendo substituí-lo. De acordo com os autores, as principais vantagens da utilização de fotos digitais são o custo inferior ao uso do integrador de área foliar LI-COR® e a elevada precisão na determinação da área foliar.

Modelos que relacionam a área foliar determinada por fotos digitais com dimensões lineares da folha (comprimento, ou largura e/ou produto comprimento vezes largura) foram gerados e validados nas culturas de crambe (TOEBE et al., 2010), feijão de porco (TOEBE et al., 2012), mucuna cinza (CARGNELUTTI FILHO et al., 2012a) e nabo forrageiro (CARGNELUTTI FILHO et al., 2012b). Em função da forma da folha ser uma

característica morfológica específica, dependente da relação entre o comprimento e a largura e da quantidade de recortes na borda do limbo foliar, é necessária a geração de modelos específicos de estimativa da área foliar para cada espécie vegetal (PINTO et al., 2008). Assim, o objetivo deste trabalho foi modelar e identificar os melhores modelos para a estimativa da área foliar de feijão guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.), determinada por fotos digitais em função do comprimento, ou da largura e/ou do produto comprimento vezes largura do limbo do folíolo central da folha.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram conduzidos dois experimentos com a cultura de feijão guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.), cultivar 'BRS Mandarin', em uma área experimental de 1.848m², localizada no Departamento de Fitotecnia, da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Estado do Rio Grande do Sul, a 29°42'S, 53°49'W, e a 95m de altitude. No primeiro experimento, a semeadura foi realizada a lanço, no dia 26/01/2012, com emergência das plantas em 31/01/2012. A densidade no momento da última avaliação foi de 117.778 plantas ha⁻¹. No segundo experimento, a semeadura foi realizada em linhas, com espaçamento de 0,50m entre linhas, no dia 20/11/2012, com emergência das plantas em 01/12/2012. A densidade, no momento da avaliação, foi de 170.000 plantas ha⁻¹. A adubação de base nos dois experimentos foi de 40kg ha⁻¹ de N, 160kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 160kg ha⁻¹ de K₂O.

No primeiro experimento, durante o crescimento da cultura até o início do florescimento, foram realizadas 11 coletas de 200 folhas cada. Essas coletas foram realizadas aos 45, 52, 59, 65, 72, 79, 86, 94, 100, 106 e 114 dias após a emergência, totalizando 2.200 folhas. Particularmente, neste estudo, embora as medições tenham sido realizadas no tempo, foram em distintas plantas e folhas e, assim, foram consideradas como independentes. Adicionalmente, o foco do estudo foi construir modelos para estimar a área foliar de feijão guandu em função das dimensões foliares, independentemente da fase de desenvolvimento da cultura. No segundo experimento, foi realizada uma coleta de 220 folhas aos 69 dias após a emergência. Nos dois experimentos, em cada planta amostrada, foram coletadas, aleatoriamente, algumas folhas dos terços inferior, médio e superior, a fim de obter amostra representativa do dossel das plantas. Foram coletadas apenas folhas expandidas. Considerou-se folha expandida quando os folíolos da folha do nó

superior à folha coletada não mais se tocavam. Em cada folha, composta de três folíolos (esquerdo, central e direito), foram mensurados o comprimento (CFC) e a largura (LFC) do limbo do folíolo central (Figura 1A), com régua milimetrada. Posteriormente, foi calculado o produto do comprimento vezes a largura ($CFC \times LFC$) do limbo do folíolo central. Em seguida, foi determinada a área foliar real de cada uma das 2.420 folhas (2.200 do primeiro e 220 do segundo experimento), por meio de fotos digitais. Para isso, cada folha foi colocada sob vidro transparente e, em seguida, fotografada com câmera digital da marca Casio, modelo Exilim EX-ZS5®, disposta numa base

perpendicular a 50 cm de distância em relação à folha, usando resolução de três megapixels. Essas 2.420 fotos (imagens) foram processadas, individualmente, com o programa Sigma Scan Pro v.5.0® (JANDEL SCIENTIFIC, 1991) para a determinação da área foliar (soma da área foliar dos folíolos esquerdo, central e direito) de cada folha, por meio do método de fotos digitais (Y).

De cada uma das 11 coletas, realizadas no primeiro experimento, foram separadas, aleatoriamente, 90% das folhas (180 folhas) para a geração de modelos e 10% das folhas (20 folhas) para a validação dos modelos. Assim, 1.980 folhas foram

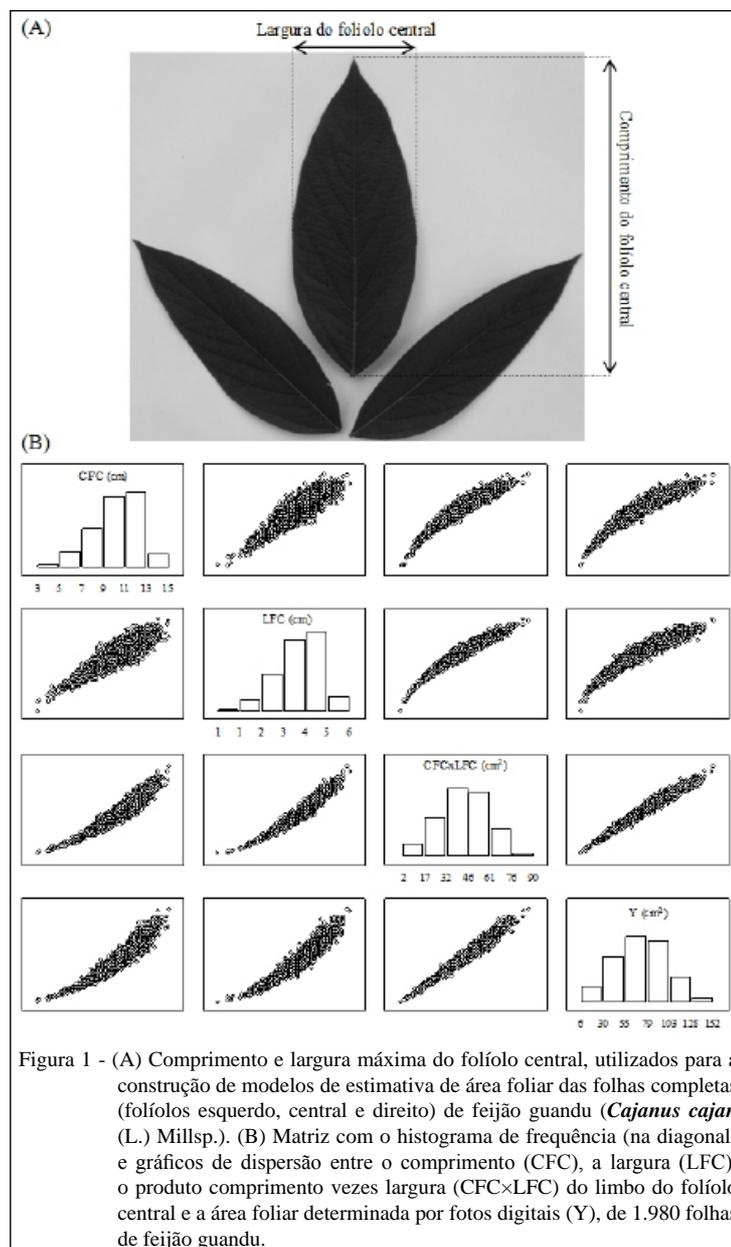


Figura 1 - (A) Comprimento e largura máxima do folíolo central, utilizados para a construção de modelos de estimativa de área foliar das folhas completas (folíolos esquerdo, central e direito) de feijão guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.). (B) Matriz com o histograma de frequência (na diagonal) e gráficos de dispersão entre o comprimento (CFC), a largura (LFC), o produto comprimento vezes largura ($CFC \times LFC$) do limbo do folíolo central e a área foliar determinada por fotos digitais (Y), de 1.980 folhas de feijão guandu.

usadas neste estudo, para a geração de modelos de estimação da área foliar em função das dimensões lineares e 220 folhas foram usadas para a validação desses modelos. Além disso, os modelos também foram validados com as 220 folhas coletadas no segundo experimento.

Com os dados do CFC, da LFC, do CFC×LFC e de Y das 1.980 folhas separadas, foram calculados os valores mínimo, médio e máximo, o coeficiente de variação, a curtose, a assimetria e verificada a normalidade, por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov. Também foram feitos histogramas de frequência e gráficos de dispersão entre CFC, LFC, CFC×LFC e Y. Posteriormente, com as 1.980 folhas, modelou-se a área foliar determinada por fotos digitais (Y) em função do CFC, ou da LFC e/ou do CFC×LFC, por meio dos modelos: quadrático ($Y=a+bx+cx^2$), potência ($Y=ax^b$) e linear ($Y=a+bx$), totalizando nove modelos (três modelos × três variáveis independentes). Nesses modelos, x representa a dimensão linear da folha (CFC, LFC ou CFC×LFC). Com os dados do CFC, da LFC, do CFC×LFC e de Y das 220 folhas do primeiro e das 220 folhas do segundo experimento, usadas para a validação dos modelos, foram calculados os valores mínimo, médio e máximo e o coeficiente de variação.

A validação dos nove modelos de estimação da área foliar foi realizada com base nos 220 valores estimados pelo modelo (\hat{Y}_i) e os 220 valores observados (Y_i). Essa validação foi realizada com base em dois conjuntos de dados, ou seja, com os dados de 220 folhas coletadas no primeiro experimento e com 220 folhas coletadas no segundo experimento. Em cada modelo, foi ajustada uma regressão linear simples ($\hat{Y}_i=a+bY_i$) da área foliar estimada pelo modelo (variável dependente), em função da área foliar observada (variável independente). Foram testadas as hipóteses $H_0: a=0$ versus $H_1: a\neq 0$ e $H_0: b=1$ versus $H_1: b\neq 1$, por meio do teste t de Student a 5% de probabilidade. A seguir, foram calculados os coeficientes de correlação linear de Pearson (r) e de determinação (R^2) entre \hat{Y}_i e Y_i . Ainda, para cada modelo, foi calculado o erro absoluto médio (EAM), a raiz do quadrado médio do erro (RQME) e o índice d de Willmott (WILLMOTT, 1981), conforme equações descritas em CARGNELUTTI FILHO et al. (2012a,b) e TOEBE et al. (2012), considerando, em cada experimento, n=220 folhas.

Para a escolha dos melhores modelos de estimação da área foliar de feijão guandu, em função do CFC, ou da LFC e/ou do CFC×LFC do limbo do folíolo central, foram usados os seguintes critérios: coeficiente linear não diferente de zero,

coeficiente angular não diferente de um, coeficientes de correlação linear de Pearson e de determinação mais próximos de um, erro absoluto médio e raiz do quadrado médio do erro mais próximo de zero, e índices d de Willmott mais próximo a um. As análises estatísticas foram realizadas com auxílio do aplicativo Microsoft Office Excel® e do software Statística 7.0® (STATSOFT, 2005).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

De maneira geral, em relação ao CFC, à LFC, ao CFC×LFC e à área foliar determinada por fotos digitais (Y), os valores mínimos e máximos, as médias e os coeficientes de variação foram semelhantes entre as 11 coletas (Tabela 1). Portanto, as inferências podem ser realizadas a partir do total de folhas das 11 coletas. Assim, em média, os 1.980 folíolos centrais das folhas de feijão guandu, usados para a construção dos modelos, apresentaram comprimento de 10,21cm ($3,30\leq CFC\leq 14,70$) e largura de 4,11cm ($0,50\leq LFC\leq 6,30$). A área foliar real (Y), obtida pela soma das áreas dos folíolos esquerdo, central e direito de cada folha, foi em média de 72,10cm² ($4,93\leq Y\leq 153,13$).

Em relação à variabilidade dos dados, foram constatados menores coeficientes de variação para as dimensões lineares CFC e LFC (CV=18,96 e 22,39%, respectivamente) e maior variabilidade para CFC×LFC e Y (CV=36,86 e 38,11%, respectivamente). Nas culturas de mucuna cinza (CARGNELUTTI FILHO et al., 2012a) e de feijão de porco (TOEBE et al., 2012), também foi verificada maior variabilidade para CFC×LFC e Y em relação às dimensões CFC e LFC. Em função das 11 coletas de folhas para a geração de modelos terem sido realizadas durante diferentes fases do crescimento e desenvolvimento da cultura, do número expressivo de folhas coletadas (n=1.980 folhas) e da elevada amplitude entre os valores mínimos e máximos das dimensões lineares e da área foliar, pode-se inferir que esse banco de dados é adequado para modelar a área foliar. A validação dos modelos com base em dois experimentos conduzidos em épocas, com densidades de plantas (117.778 e 170.000 plantas ha⁻¹) e com sistemas de semeadura (lanço e linha) distintos, possibilita investigar o uso desses modelos em diferentes condições experimentais.

De maneira geral, em relação as 11 coletas e ao total das coletas utilizadas para a geração de modelos, os dados das dimensões lineares CFC e LFC apresentaram ajustes à distribuição normal inferiores aos dados de CFC×LFC e Y, de acordo

Tabela 1 - Mínimo, média, máximo, coeficiente de variação (CV), curtose, assimetria e valor-p do teste de kolmogorov-Smirnov para o comprimento (CFC), a largura (LFC), o produto comprimento vezes largura (CFC×LFC) do limbo do folíolo central e a área foliar determinada por fotos digitais (Y), em 11 coletas de 180 folhas cada e no total (1.980 folhas) de feijão guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.).

Estatística	Coletas, em dias após a emergência (DAE)											Total
	45	52	59	65	72	79	86	94	100	106	114	
----- CFC - comprimento do limbo do folíolo central, em cm -----												
Mínimo	6,30	3,30	4,30	6,10	3,30	4,60	4,30	5,70	5,40	4,20	3,50	3,30
Média	10,34	9,42	10,97	10,23	10,25	10,23	10,22	10,35	10,14	10,20	10,00	10,21
Máximo	13,90	13,70	14,70	14,40	13,50	13,00	13,80	13,50	13,90	14,70	13,80	14,70
CV(%)	19,69	23,39	18,37	16,16	17,99	15,90	20,26	18,18	17,48	18,33	19,57	18,96
Curtose ⁽¹⁾	1,91*	2,27*	3,40 ^{ns}	2,63 ^{ns}	3,61 ^{ns}	4,09*	2,99 ^{ns}	2,58 ^{ns}	2,76 ^{ns}	2,98 ^{ns}	3,31 ^{ns}	2,88 ^{ns}
Assimetria ⁽²⁾	-0,44*	-0,12 ^{ns}	-0,72*	-0,04 ^{ns}	-0,78*	-1,00*	-0,78*	-0,52*	-0,42*	-0,31 ^{ns}	-0,59*	-0,51*
Valor-p	0,00	0,65	0,16	0,88	0,25	0,14	0,02	0,14	0,26	0,32	0,63	0,00
----- LFC - Largura do limbo do folíolo central, em cm -----												
Mínimo	2,10	1,00	1,00	2,50	0,50	1,80	1,50	2,00	1,70	1,10	1,10	0,50
Média	4,08	3,55	4,13	3,80	4,19	4,27	4,23	4,33	4,31	4,22	4,12	4,11
Máximo	5,90	5,90	6,30	5,10	5,70	5,70	6,00	5,90	6,00	6,20	5,90	6,30
CV(%)	24,68	30,03	22,30	17,29	19,73	18,41	22,74	20,82	19,19	20,77	22,90	22,39
Curtose ⁽¹⁾	1,86*	2,35 ^{ns}	3,60 ^{ns}	2,17*	5,42*	4,09*	3,25 ^{ns}	2,78 ^{ns}	3,56 ^{ns}	3,50 ^{ns}	3,06 ^{ns}	2,94 ^{ns}
Assimetria ⁽²⁾	-0,04 ^{ns}	0,20 ^{ns}	-0,39*	0,09 ^{ns}	-1,11*	-1,01*	-0,72*	-0,68*	-0,79*	-0,43*	-0,58*	-0,48*
Valor-p	0,15	0,62	0,40	0,16	0,01	0,00	0,07	0,02	0,03	0,33	0,20	0,00
----- CFC×LFC - produto do comprimento vezes a largura do folíolo central, em cm ² -----												
Mínimo	14,08	3,30	4,30	15,25	1,65	9,20	6,45	11,40	9,18	4,62	3,85	1,65
Média	43,99	35,62	46,96	39,83	44,27	44,77	45,09	46,32	45,04	44,54	42,88	43,57
Máximo	76,72	79,65	87,00	72,00	75,81	70,11	82,80	76,95	79,80	91,14	81,42	91,14
CV(%)	40,21	49,98	36,27	31,54	32,65	29,45	37,50	34,86	32,80	35,92	38,00	36,86
Curtose ⁽²⁾	1,77*	2,40 ^{ns}	2,64 ^{ns}	2,36 ^{ns}	2,93 ^{ns}	3,21 ^{ns}	2,50 ^{ns}	2,27*	2,62 ^{ns}	2,75 ^{ns}	2,46 ^{ns}	2,43*
Assimetria ⁽³⁾	-0,01 ^{ns}	0,51*	0,01 ^{ns}	0,28 ^{ns}	-0,33 ^{ns}	-0,60*	-0,31 ^{ns}	-0,30 ^{ns}	-0,24 ^{ns}	0,18 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	-0,06 ^{ns}
Valor-p	0,08	0,19	0,96	0,40	0,70	0,20	0,23	0,23	0,77	0,36	0,91	0,06
----- Y - área foliar (soma da área foliar dos folíolos esquerdo, central e direito), em cm ² -----												
Mínimo	22,02	6,55	10,72	23,03	4,93	13,85	10,41	17,67	13,27	7,90	7,97	4,93
Média	76,86	58,55	80,31	66,27	72,81	74,33	72,42	75,92	73,18	72,69	69,79	72,10
Máximo	141,26	128,19	150,40	123,33	125,10	122,29	133,25	134,01	134,84	153,13	132,43	153,13
CV(%)	42,30	50,99	37,23	33,51	33,97	30,45	38,55	35,43	34,09	36,71	38,33	38,11
Curtose ⁽¹⁾	1,79*	2,34 ^{ns}	2,49 ^{ns}	2,42 ^{ns}	2,59 ^{ns}	3,06 ^{ns}	2,40 ^{ns}	2,29*	2,60 ^{ns}	2,78 ^{ns}	2,49 ^{ns}	2,41*
Assimetria ⁽²⁾	-0,01 ^{ns}	0,56*	0,07 ^{ns}	0,34 ^{ns}	-0,32 ^{ns}	-0,43*	-0,19 ^{ns}	-0,25 ^{ns}	-0,12 ^{ns}	0,26 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	0,03 ^{ns}
Valor-p	0,08	0,06	0,84	0,29	0,70	0,60	0,51	0,23	0,82	0,32	0,98	0,16

⁽¹⁾ * Curtose difere de três, pelo teste t, em nível de 5% de probabilidade de erro. ^{ns} Não-significativo.

⁽²⁾ * Assimetria difere de zero, pelo teste t, em nível de 5% de probabilidade de erro. ^{ns} Não-significativo.

com a curtose, a assimetria e ao valor-p o teste de kolmogorov-Smirnov. Os dados de CFC (três casos) e LFC (cinco casos) que não se ajustaram à distribuição normal ($P \leq 0,05$), por meio do teste de kolmogorov-Smirnov, estiveram associados à assimetria negativa, o que indica menor ocorrência de valores pequenos em relação a valores grandes (Figura 1B e Tabela 1). Embora, em relação ao CFC×LFC e à Y, houve seis casos com curtose diferente de três ($P \leq 0,05$) e quatro casos com assimetria diferente de zero ($P \leq 0,05$), o valor-p do teste de kolmogorov-Smirnov foi superior a 0,05 em todos os casos, revelando bom ajuste

dos dados de CFC×LFC e Y à distribuição normal. Portanto, em relação à normalidade, pode-se inferir que o banco de dados é adequado para a geração de modelos de estimação de área foliar de feijão guandu.

Os gráficos de dispersão indicam padrões de associação não lineares entre CFC e Y e entre LFC e Y e lineares entre CFC×LFC e Y (Figura 1B). Por isso, os modelos do tipo potência apresentaram os melhores ajustes para a estimação da área foliar em função do CFC ou da LFC ($R^2 = 0,9403$ e $0,9266$, respectivamente) (Tabela 2), em relação aos modelos quadrático e linear. Já os três modelos (quadrático,

Tabela 2 - Modelos para a determinação da área foliar obtida por fotos digitais (Y), utilizando o comprimento (CFC), a largura (LFC) e o produto comprimento vezes largura (CFC×LFC) do limbo do folíolo central como variáveis independentes (x) e o coeficiente de determinação (R²) de cada modelo, com base em 1.980 folhas de feijão guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.).

Modelo	Variável independente (x)	Equação	Coefficiente de determinação
1) Quadrático	CFC	$Y = -9,6411 + 1,4922x + 0,6155x^2$	0,9098
2) Quadrático	LFC	$Y = -6,6882 + 7,8470x + 2,6213x^2$	0,9069
3) Quadrático	CFC×LFC	$Y = 0,4295 + 1,5895x + 0,0011x^2$	0,9710
4) Potência	CFC	$Y = 0,4831x^{2,1339}$	0,9403
5) Potência	LFC	$Y = 6,0692x^{1,7726}$	0,9266
6) Potência	CFC×LFC	$Y = 1,6591x^{0,9983}$	0,9769
7) Linear	CFC	$Y = -65,3048 + 13,4543x$	0,8984
8) Linear	LFC	$Y = -44,0710 + 28,2566x$	0,8957
9) Linear	CFC×LFC	$Y = -1,3555 + 1,6858x$	0,9708

potência e linear) de estimação da área foliar com base no CFC×LFC apresentaram ajustes similares entre si ($0,9708 \leq R^2 \leq 0,9769$) e superiores aos modelos gerados com base no CFC ou na LFC.

Na validação dos modelos com base em 220 folhas coletadas no primeiro experimento (11 coletas de 20 folhas no período de 45 a 114 DAE), verificou-se que apenas o modelo quadrático da área foliar (Y), em função de CFC×LFC, não apresentou coeficiente linear diferente de zero (Tabela 3). Em todos os modelos gerados, o coeficiente angular diferiu de um. Embora a hipótese de nulidade para o coeficiente angular tenha sido rejeitada nos nove modelos, os três modelos (quadrático, potência e linear) de estimação da área foliar em função de CFC×LFC apresentaram os coeficientes lineares mais próximos a zero e os coeficientes angulares mais próximos a um. Ainda, esses mesmos três modelos apresentaram maiores valores de coeficientes de correlação de Pearson e de determinação, menores escores de erro absoluto médio e de raiz do quadrado médio do erro e índice d de Willmott mais próximo a um.

Na validação realizada com base nas 220 folhas coletadas aos 69 DAE, no segundo experimento, verificou-se que os três modelos (quadrático, potência e linear) de estimação da área foliar, em função de CFC×LFC, foram os únicos que apresentaram os coeficientes lineares e angulares não diferentes de zero e um, respectivamente (Tabela 3). Assim como na validação realizada com dados do primeiro experimento, esses modelos também apresentaram maiores valores de coeficientes de correlação de Pearson e de determinação, menores escores de erro absoluto médio e de raiz do quadrado médio do erro e índice d de Willmott mais próximo a um. Portanto, os modelos de estimação da área foliar de feijão guandu, em função do produto do comprimento vezes largura do limbo do folíolo central, devem ser

preferencialmente utilizados, em relação aos modelos com base no comprimento ou na largura do limbo do folíolo central.

Modelos de estimação da área foliar em função de dimensões lineares das folhas foram gerados para outras espécies da família Fabaceae. Em feijão de vagem, QUEIROGA et al. (2003) verificaram que o modelo potência, com base na LFC, é adequado para a estimação da área foliar (soma dos folíolos esquerdo, central e direito) com elevada precisão ($R^2=0,9800$). Em mucuna cinza (CARGNELUTTI FILHO et al., 2012a) e em feijão de porco (TOEBE et al., 2012), os melhores ajustes dos modelos (quadrático, potência e linear) de estimação da área foliar foram obtidos em função do CFC×LFC. No entanto, os autores também sugeriram a utilização alternativa do modelo tipo potência com base na LFC, devido ao bom ajuste do modelo para mucuna cinza ($R^2=0,9886$) e feijão de porco ($R^2=0,9757$), e por necessitar da mensuração de apenas uma variável a campo (LFC).

Para a estimação da área foliar de feijão guandu, recomenda-se a utilização de modelos do tipo quadrático ($\hat{Y}=0,4295+1,5895x+0,0011x^2$, $R^2=0,9710$), potência ($\hat{Y}=1,6591x^{0,9983}$, $R^2=0,9769$) e linear ($\hat{Y}=-1,3555+1,6858x$, $R^2=0,9708$), que consideram o produto do comprimento vezes a largura do limbo do folíolo central, devido à maior precisão nas estimativas de área foliar. Em função do padrão de associação linear, existente entre CFC×LFC e Y (Figura 1B) e considerando o bom ajuste do modelo linear ($\hat{Y}=-1,3555+1,6858x$, $R^2=0,9708$) (Tabela 2) associado aos bons indicadores de validação (Tabela 3) e a simplicidade da aplicação desse modelo, recomenda-se a sua utilização para a estimação da área foliar de feijão guandu, sendo Y a área foliar (soma dos folíolos esquerdo, central e direito) e x o produto do comprimento vezes a largura do limbo do folíolo central (CFC×LFC).

Tabela 3 - Mínimo, média, máximo e coeficiente de variação (CV) para o comprimento (CFC, em cm), a largura (LFC, em cm), o produto comprimento vezes largura (CFC×LFC, em cm²) do limbo do folíolo central e a área foliar determinada por fotos digitais (Y, em cm²) em 220 folhas de feijão guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.). Validação dos nove modelos com base nos indicadores: coeficientes linear (a), angular (b), de correlação linear de Pearson (r) e de determinação (R²), erro absoluto médio (EAM), raiz do quadrado médio do erro (RQME) e índice d de Willmott, calculados com base nas áreas foliares observadas e estimadas de 220 folhas de feijão guandu avaliadas no primeiro e no segundo experimentos.

Estatística	Primeiro experimento ⁽¹⁾				Segundo experimento ⁽²⁾			
	CFC	LFC	CFC×LFC	Y	CFC	LFC	CFC×LFC	Y
Mínimo	4,10	0,90	3,69	10,89	3,10	1,00	3,10	5,30
Média	10,19	4,05	42,76	70,90	9,58	3,51	35,42	58,10
Máximo	14,50	6,30	88,20	149,94	13,20	5,20	67,60	111,09
CV(%)	19,04	22,42	37,59	38,71	23,06	25,23	41,36	41,66
Modelo	Variável Independente (x)	a ⁽³⁾	b ⁽⁴⁾	r ⁽⁵⁾	R ²	EAM	RQME	d
Primeiro experimento ⁽¹⁾								
1) Quadrático	CFC	6,013 ^{ns}	0,926*	0,956*	0,915	6,062	8,049	0,977
2) Quadrático	LFC	7,131*	0,888*	0,947*	0,897	7,028	8,818	0,972
3) Quadrático	CFC×LFC	1,697 ^{ns}	0,973*	0,984*	0,969	3,536	4,792	0,992
4) Potência	CFC	4,315*	0,945*	0,956*	0,915	6,018	8,036	0,978
5) Potência	LFC	7,685*	0,872*	0,947*	0,898	7,062	8,891	0,971
6) Potência	CFC×LFC	3,215*	0,948*	0,984*	0,969	3,565	4,861	0,992
7) Linear	CFC	7,924*	0,899*	0,946*	0,897	6,797	8,840	0,972
8) Linear	LFC	8,206*	0,875*	0,937*	0,878	7,587	9,570	0,966
9) Linear	CFC×LFC	1,828*	0,971*	0,984*	0,969	3,574	4,812	0,992
Segundo experimento ⁽²⁾								
1) Quadrático	CFC	0,525 ^{ns}	1,094*	0,974*	0,950	7,065	8,863	0,970
2) Quadrático	LFC	3,863*	0,881*	0,976*	0,953	4,977	6,294	0,982
3) Quadrático	CFC×LFC	0,392 ^{ns}	0,998 ^{ns}	0,991*	0,982	2,540	3,252	0,996
4) Potência	CFC	0,792 ^{ns}	1,084*	0,974*	0,949	6,674	8,564	0,972
5) Potência	LFC	4,689*	0,862*	0,976*	0,954	5,150	6,574	0,980
6) Potência	CFC×LFC	1,004 ^{ns}	0,988 ^{ns}	0,991*	0,982	2,519	3,221	0,996
7) Linear	CFC	-5,346*	1,186*	0,965*	0,933	8,561	10,444	0,962
8) Linear	LFC	-3,23*	1,001 ^{ns}	0,97*	0,941	5,592	6,807	0,981
9) Linear	CFC×LFC	-0,402 ^{ns}	1,011 ^{ns}	0,991*	0,982	2,622	3,292	0,996

⁽¹⁾ Experimento com semeadura a lanço, no dia 26/01/2012, e com emergência das plantas em 31/01/2012. As 220 folhas foram obtidas em 11 coletas de 20 folhas cada.

⁽²⁾ Experimento com semeadura em linha, no dia 20/11/2012, e com emergência das plantas em 01/12/2012. As 220 folhas foram coletadas aos 69 dias após a emergência.

⁽³⁾ * Coeficiente linear difere de zero, pelo teste t, em nível de 5% de probabilidade de erro. ^{ns} Não-significativo.

⁽⁴⁾ * Coeficiente angular difere de um, pelo teste t, em nível de 5% de probabilidade de erro. ^{ns} Não-significativo.

⁽⁵⁾ * Coeficiente de correlação difere de zero, pelo teste t, em nível de 5% de probabilidade de erro. ^{ns} Não-significativo.

Extrapolações desses modelos, para estimação de área foliar de feijão de porco, cultivado em outras condições ambientais (local, tipo de solo, fertilidade do solo, clima, épocas e manejo da cultura), devem ser vistas com cautela. Portanto, preferencialmente, antes do uso desses modelos, sugere-se a sua validação com dados específicos do novo ambiente.

CONCLUSÃO

Em feijão guandu, os modelos do tipo quadrático ($\hat{Y}=0,4295+1,5895x+0,0011x^2$, $R^2=0,9710$),

potência ($\hat{Y}=1,6591x^{0,9983}$, $R^2=0,9769$) e linear ($\hat{Y}=1,3555+1,6858x$, $R^2=0,9708$) de Y, em função do produto do comprimento vezes a largura do limbo do folíolo central (CFC×LFC), são adequados para a estimação da área foliar determinada por fotos digitais. O modelo linear pode, preferencialmente, ser utilizado.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelas

bolsas concedidas. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS

- ADAMI, M. et al. Estimativa de área de folíolos de soja usando imagens digitais e dimensões foliares. **Bragantia**, v.67, p.1053-1058, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/brag/v67n4/30.pdf>>. Acesso em: 08 jun. 2012. doi: 10.1590/S0006-87052008000400030.
- ALVES, S.M.C. et al. Balanço do nitrogênio e fósforo em solo com cultivo orgânico de hortaliças após a incorporação de biomassa de guandu. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.1111-1117, 2004. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pab/v39n11/22583.pdf>>. Acesso em: 08 jun. 2012. doi: 10.1590/S0100-204X2004001100009.
- CARGNELUTTI FILHO, A. et al. Estimativa da área foliar de mucuna cinza por meio de método não destrutivo. **Ciência Rural**, v.42, p.238-242, 2012a. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/cr/v42n2/a4112cr5269.pdf>>. Acesso em: 08 jun. 2012. doi: 10.1590/S0103-84782012000200009.
- CARGNELUTTI FILHO, A. et al. Estimativa da área foliar de nabo forrageiro em função de dimensões foliares. **Bragantia**, v.71, p.47-51, 2012b. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/brag/v71n1/08.pdf>>. Acesso em: 08 jun. 2012. doi: 10.1590/S0006-87052012000100008.
- FAVARIN, J.L. et al. Equações para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, p.769-773, 2002. Disponível em: <http://webnotes.sct.embrapa.br/pdf/pab2002/junho/pab20_365.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2012.
- FERNANDES, M.F. et al. Fitomassa de adubos verdes e controle de plantas daninhas em diferentes densidades populacionais de leguminosas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, p.1593-1600, 1999. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pab/v34n9/7610.pdf>>. Acesso em: 08 jun. 2012.
- JANDEL SCIENTIFIC. **User's manual**. California, 1991. 280p.
- LI-COR®. **LI 3100 area meter instruction manual**. Lincoln, 1996. 34p.
- PINTO, A.C.R. et al. Modelos para estimativa da área foliar de *Curcuma alismatifolia* e *Curcuma zedoaria*. **Bragantia**, v.67, p.549-552, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/brag/v67n2/a33v67n2.pdf>>. Acesso em: 08 jun. 2012. doi: 10.1590/S0006-87052008000200033.
- QUEIROGA, J.L. et al. Estimativa da área foliar do feijão-vagem (*Phaseolus vulgaris* L.) por meio da largura máxima do folíolo central. **Horticultura Brasileira**, v.21, p.64-68, 2003. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/hb/v21n1/a13v21n1.pdf>>. Acesso em: 08 jun. 2012. doi: 10.1590/S0102-05362003000100013.
- STATSOFT. **Statistica 7.0 Software**. Tucksas, USA, 2005.
- TAVARES JUNIOR, J.E. et al. Análise comparativa de métodos de estimativa de área foliar em cafeeiro. **Bragantia**, v.61, p.199-203, 2002. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/brag/v61n2/18480.pdf>>. Acesso em: 08 jun. 2012. doi: 10.1590/S0006-87052002000200013.
- TOEBE, M. et al. Estimativa da área foliar de *Crambe abyssinica* por discos foliares e por fotos digitais. **Ciência Rural**, v.40, p.475-478, 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/cr/v40n2/a475cr2110.pdf>>. Acesso em: 08 jun. 2012. doi: 10.1590/S0103-84782010000200036.
- TOEBE, M. et al. Modelos para a estimativa da área foliar de feijão de porco por dimensões foliares. **Bragantia**, v.71, p.37-41, 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/brag/v71n1/aop_1041_12.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2012. doi: 10.1590/S0006-87052012005000010.
- WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, v.2, p.184-194, 1981.