ÍNDICE DE REFLETÂNCIA NA ESTIMATIVA DA ÁREA FOLIAR E BIOMASSA DAS FOLHAS EM FEIJÃO-COMUM

Arthur Vieira de Santana[1], Alexandre Bryan Heinemann[2], Luís Fernando Stone[2], Adriano Stephan Nascente[2]

[1]Universidade Federal de Goiás – UFG, Programa de Pós Graduação em Agronomia (Produção Vegetal), Goiânia, GO. [2]Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO. e-mail: artusantana@hotmail.com

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi determinar o IAF e a MSF em feijão-comum a partir do NDVI e correlacioná-los com a produtividade da cultura. Foram conduzidos dois experimentos em campo, em 17/05 e 03/07/2013, utilizando-se o delineamento experimental de blocos ao acaso, nos quais foram comparados quatro genótipos, Pérola, BAT 477, BRS Pontal e BRS Agreste. Os dados de NDVI foram obtidos com sensor radiométrico de campo e os dados das variáveis IAF e MSF por amostras destrutivas. A produtividade não apresentou diferença estatística entre os genótipos para as duas datas de semeadura, diferindo apenas entre as datas de semeadura, com maior valor na primeira. O IAF e a MSF estimados por meio do NDVI apresentaram desempenho satisfatório, com valores de coeficientes de qualidade dos ajustes similares. O NDVI, para as duas datas de semeadura, saturou-se a partir dos 50 dias após a emergência, devendo-se utilizar esse índice vegetativo principalmente na fase vegetativa da cultura. Por meio deste estudo concluiu-se que as variáveis biofísicas da cultura do feijão-comum, IAF e MSF, podem ser estimadas pelo NDVI, por meio de um modelo linear genérico. Tanto os IAF e MSF observados como os estimados por esse modelo correlacionaram-se positivamente com a produtividade do feijoeiro.

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris*; refletância; sensoriamento; indicadores biofísicos.

REFLECTANCE INDEX IN THE LEAF AREA INDEX AND LEAF DRY MATTER ESTIMATION IN COMMON BEAN

ABSTRACT

The objective of this study was to determine the leaf area index (LAI) and leaf dry matter (LDM) of common bean from the NDVI and correlated them to crop yield. Two experiments were conducted in the field in 5/17/2013 and 07/03/2013, using the experimental design of randomized blocks, in which four genotypes, Pérola, BAT 477, BRS Pontal and BRS Agreste, were compared. The acquisition of NDVI occurred with field radiometric sensor and crop data were obtained from destructive samples. LAI and LDM estimated from NDVI showed a good performance, which similar values of statistical coefficients. The NDVI, for both sowing dates, saturated from 50 days after emergence, and it should be used mainly for the crop vegetative stage. Yield showed a statistical difference only between sowing dates, showing higher value in the first one. Based on the results of this study, it was concluded that LAI and LDM can be estimated by NDVI using a linear regression model. IAF and LDM observed and those estimated by this model correlated positively with common bean yield.

Keywords: *Phaseolus vulgaris*; reflectance; sensing; biophysical indicators.

INTRODUÇÃO

O feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é um importante componente da dieta da população brasileira, e um dos principais componentes da dieta de programas de combate à fome (AIDAR, 2003). O Brasil é o terceiro maior produtor mundial dessa leguminosa, com produção total de 3,22 milhões de Mg na safra de 2014, sendo superado pela Índia (4,11 milhões de Mg) e Miamar (3,74 milhões de Mg) (FAOSTAT, 2016). A produtividade média brasileira do feijão-comum na safra 2015/2016 foi de 1.105 kg ha^{-1}, mas existem produtores alcançando produtividades de 3.500 kg ha^{-1} (CONAB, 2016). Dentre os fatores que afetam a produtividade da

cultura tem-se a variabilidade climática no território nacional.

Dada à importância econômica e social e à variabilidade na produtividade do feijoeiro, é relevante o desenvolvimento de metodologias que possibilitem o monitoramento das condições de desenvolvimento da cultura. As avaliações da produção de biomassa e índice de área foliar (IAF) são importantes, pois essas variáveis se correlacionam diretamente com a produtividade de grãos das culturas (FALQUETO et al., 2009; GROHS et al., 2009; CONCENÇO et al., 2011; ALVAREZ et al., 2012). Entretanto, em diversas culturas agrícolas, a quantificação de biomassa segue o protocolo da amostragem direta, que exige áreas amostrais representativas, além de ser altamente onerosa.

Para contornar esse problema e buscar formas alternativas para mensurar essas variáveis, surgem novas metodologias, como as baseadas em ferramentas de sensoriamento remoto (MENESES; MADEIRA NETTO, 2001). Assim, procuram-se estabelecer relações entre a radiação refletida pelo dossel da cultura e seus atributos biofísicos (MOREIRA, 2007; HOUBORG et al., 2015).

Em plantas sadias e adequadamente supridas de água e nutrientes existe relação linear positiva entre a radiação refletida pelo dossel e a produção de biomassa e grãos (MOREIRA, 2007). Além disso, importantes avanços na radiometria também têm permitido a identificação de estresses causados por falta de nutrientes, falta de água no solo e danos causados por doenças e insetos-pragas (SANCHES et al., 2014). Tais respostas permitem realizar o acompanhamento temporal e espacial das culturas, determinar o vigor das plantas e realizar previsões futuras de colheita.

Dentre os índices de refletância, o NDVI (*Normalized difference vegetation index,* índice de vegetação por diferença normalizada) é considerado um bom estimador de biomassa, sendo um dos mais conhecidos e utilizados para o monitoramento da vegetação (COLTRI et al., 2009; XIAO et al., 2015). Esse índice é o resultado da combinação das respostas das bandas espectrais do vermelho e do infravermelho. Por exemplo, Gitelson et al. (2014), estudando plantas de milho e soja (com estruturas foliares – C3 e C4 – e arquitetura do dossel diferentes), observaram alta relação entre o NDVI e a radiação fotossinteticamente ativa, a qual é responsável direta pelo rendimento das culturas.

Apesar do potencial de utilização do NDVI, praticamente não existem estudos sobre sua utilização na estimativa de biomassa e índice de área foliar em cultivares de feijão-comum. Assim, partiu-se das hipóteses de que o NDVI proporciona resultados semelhantes ao das medições dessas variáveis pelo método destrutivo e que elas possuem correlação positiva com a produtividade de grãos da cultura. O objetivo deste trabalho foi estimar o índice de área foliar e a massa da matéria seca de folha (MSF) do feijão-comum a partir do NDVI e correlacioná-los com a produtividade da cultura.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram conduzidos dois experimentos em campo, em 17/05 e 03/07/2013, no município de Santo Antônio de Goiás (latitude 16°40' S, longitude 49°15' W e altitude de 823 metros), que apresenta o tipo climático Aw (tropical de savana), com o inverno seco e o verão chuvoso e período de déficit hídrico de maio a outubro, segundo a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013). Os experimentos foram irrigados pelo sistema de aspersão convencional, seguindo recomendações de Steinmetz (1984) e Allen et al. (1998).

As temperaturas média, máxima e mínima do ar e a evapotranspiração de referência durante a condução do experimento são ilustradas na Figura 1.

O solo da área experimental é um Latossolo Vermelho ácrico, com as seguintes características físicas e químicas na camada superficial (0-0,2 m): textura argilosa; densidade do solo de 1,5 Mg m^{-3}; pH em água de 6,0; 17 g dm^{-3} de matéria orgânica; 5,7 mg dm^{-3} de P; 0,2 $cmol_c$ dm^{-3} de K; 2,1 $cmol_c$ dm^{-3} de Ca; 0,9 $cmol_c$ dm^{-3} de Mg; 3,9 $cmol_c$ dm^{-3} de acidez potencial; 6,4 $cmol_c$ dm^{-3} de CTC a pH 7,0 e saturação por bases de 50%.

Para ambos experimentos de campo utilizou-se o delineamento experimental de blocos ao acaso, com quatro repetições, em que foram comparados os genótipos de feijão-comum Pérola, BAT 477, BRS Pontal e BRS Agreste. As parcelas possuíam 36,0 m^2, com 10 linhas de 8,0 m, espaçadas de 0,45 m. Utilizou-se o sistema de semeadura direta em palhada de milheto (*Penissetum americanum*, L.).

Três dos genótipos, Pérola, BRS Pontal e BRS Agreste, são representativos da área de produção de feijão-comum no estado de Goiás para as safras de inverno e das águas. Os dois

primeiros genótipos apresentam ciclos semelhantes, 90 dias da emergência a maturação, pertencem ao grupo carioca e apresentam arquitetura semiprostada (TEIXEIRA et al., 2015). O BRS Agreste pertence ao grupo mulatinho e é considerado semiprecoce, com ciclo da emergência a maturação de 80 dias. O BAT 447 é uma cultivar mais antiga e muito utilizada em cruzamentos para desenvolvimento de novos genótipos pelo programa de melhoramento de feijão-comum. Essa cultivar é do grupo carioca, apresentando um ciclo de desenvolvimento semelhante ao da cv. Pérola. Entretanto, apresenta a arquitetura mais prostrada entre as cultivares utilizadas neste estudo.

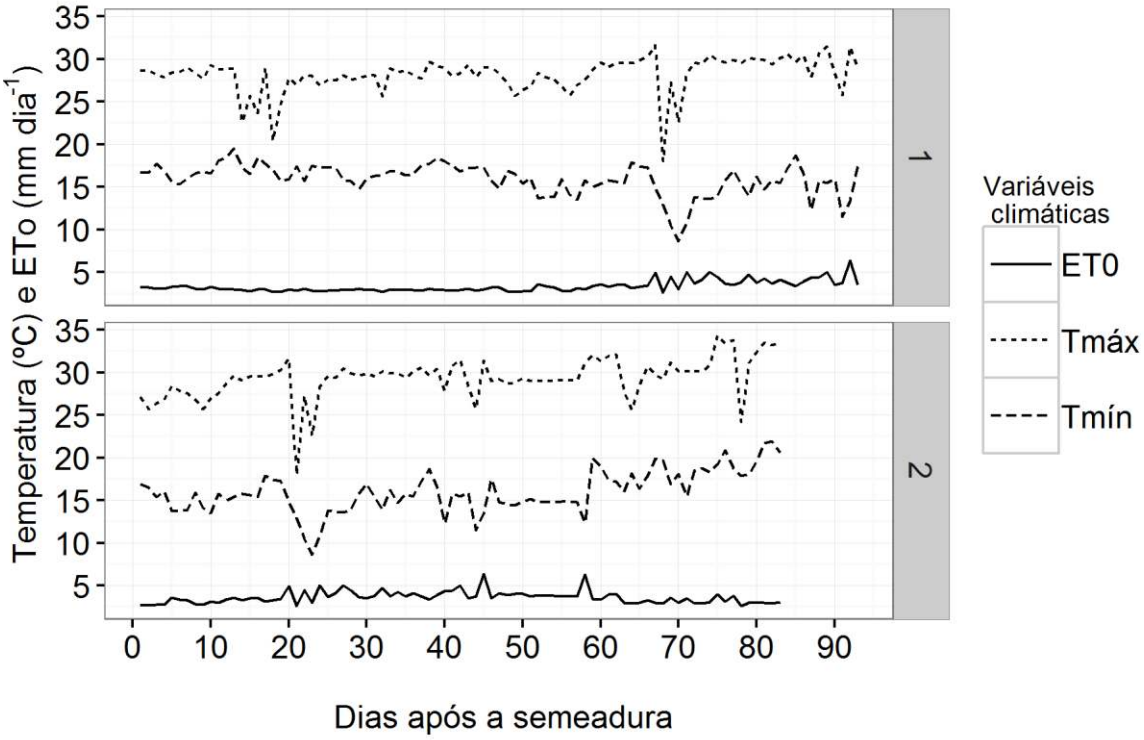


Figura 1. Temperaturas máxima (Tmáx) e mínima (Tmín) e evapotranspiração de referência (ETo) durante o desenvolvimento do estudo, 1) semeadura em 17/05/2013 e 2) semeadura em 03/07/2013

A utilização de duas épocas de semeadura teve o intuito de absorver os efeitos climáticos durante o período de semeadura da época de inverno no estado de Goiás, que se estende do início de maio até o final de junho, sendo considerada a principal época de produção de feijão no estado.

A semeadura foi realizada com semeadora-adubadora, com espaçamento entre linhas de 0,45 m. Utilizou-se população de 200 a 250 mil plantas por hectare. Concomitante à semeadura foi realizada a adubação de base, com aplicação de 20 kg ha^{-1} de N, 120 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 60 kg ha^{-1} de K_2O, utilizando-se o adubo formulado 5-30-15. Realizou-se duas adubações de cobertura, nos estádios V3 e V4, utilizando-se 30 kg ha^{-1} e 50 kg ha^{-1} de N, respectivamente.

Semanalmente, foram coletadas plantas em 1,0 m de linha e separadas as folhas. Essas folhas separadas foram passadas pelo integrador de área foliar fotoelétrico LI-COR, modelo LI-3100C, para a determinação da área das folhas. Após a determinação da área foliar, as folhas foram secas em estufa a 65°C para determinar a massa da matéria seca das folhas. A área foliar, expressa em m^2, foi dividida pela área de coleta (1,0 m de linha multiplicado pelo espaçamento de 0,45 m) para determinar o índice de área foliar. As leituras do NDVI também foram feitas semanalmente, por meio do equipamento Crop Circle, que faz a leitura da refletância em três faixas de ondas eletromagnéticas: 670 nm, 730 nm e infravermelho próximo.

Ao final do ciclo da cultura, a produtividade dos genótipos, para as duas datas de semeadura foi determinada considerando uma área útil por parcela de 5,40 m^2, sendo os dados submetidos à análise conjunta de variância e teste de média.

Para modelar a relação funcional entre as variáveis (IAF e NDVI, e MSF e NDVI) e predizer o valor das variáveis dependentes (IAF e MSF) a partir de um conjunto de dados, foi aplicado o método regressão linear simples pelo método dos mínimos quadrados ordinários. Inicialmente, a regressão linear foi aplicada para cada genótipo em cada uma das datas de semeadura. Posteriormente, reuniram-se os dados de cada genótipo nas duas datas e, por fim, reuniram-se todos os genótipos e as datas de semeadura, definido neste estudo como agrupamento de genótipos e datas de semeadura (AGD). Formaram-se assim 26 combinações de modelos de regressão. Dos 26 modelos de regressões, apenas cinco necessitaram de transformações dos conjuntos de dados (Tabela 1), devido ao fato de não apresentarem os pressupostos para a regressão linear: resíduos com distribuição normal e variância constante (homoscedasticidade). Para a transformação do conjunto de dados, utilizou-se o método de Box-Cox (PELTIER et al., 1998), que permite a análise de um conjunto de dados que apresentam resíduos com heterogeneidade de variâncias e não normalidade. Nos casos em que as transformações por Box-Cox não foram adequadas para satisfazer os pressupostos da regressão linear, utilizou-se o método de regressão linear robusta (RLR) (Tabela 1). A técnica RLR é um complemento à técnica clássica de mínimos quadrados, diferindo dos ajustes dos mínimos quadrados quando os pressupostos da regressão clássica, resíduos com distribuição de probabilidade normal, não são satisfeitos principalmente devido a observações atípicas ("outliers") (HUBERT et al., 2008).

O desempenho dos modelos de regressão foi avaliado de acordo com o coeficiente de determinação (R^2), a raiz do erro quadrático médio (RMSE) e o coeficiente de concordância de Willmott (d). O R^2 varia entre 0 e 1, e é uma medida da proporção da variabilidade em uma variável que é explicada pela variabilidade da outra. A RMSE é uma medida de precisão, sempre um valor positivo e valores próximo a zero indicam menor diferença entre os valores preditos e observados. O índice d varia de zero a um, sendo zero, nenhuma concordância e um, concordância perfeita. Ressalta-se que a classificação do desempenho baseou-se no indicador estatístico RMSE, e os demais indicadores servem apenas para dar suporte à classificação. Os modelos genéricos obtidos para IAF e MSF, por meio do agrupamento de genótipos e datas de semeadura (AGD), também foram testados considerando a correlação entre as variáveis IAF e MSF estimadas e observadas com a produtividade. Para isso, utilizou-se a correlação de Pearson com o objetivo de verificar se os valores de IAF e MSF preditos mantem a mesma correlação dos observados com a produtividade. As análises estatísticas neste estudo foram realizadas utilizando o programa estatístico R.

Tabela 1. Modelos que apresentaram transformação na análise estatística dos dados

Modelo	Variável Resposta	Data	Genótipo	Valor de λ	Transformação
Figura 3c	IAF	I	Pérola	-	log(Y)
Figura 4h	MSF	II	BRS Pontal	-	Regressão Robusta
Figura 5d	IAF		BRS Pontal	-	log(Y)
Figura 7a	IAF	I + II	AGD	0,20	$(Y^{\lambda}-1)/\lambda$
Figura 7b	MSF	I + II	AGD	0,65	$(Y^{\lambda}-1)/\lambda$

Y = variável resposta; λ = lambda calculado pela transformação Box-Cox; I = data de semeadura 17/05/2013; II = data de semeadura 03/07/2013; AGD= agrupamento de genótipos e datas de semeadura, todos os dados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Não houve diferença na produtividade entre as cultivares dentro de cada data de semeadura (Tabela 2). Por outro lado, constatou-se diferenças com relação às datas de semeadura, sendo que a primeira data proporcionou maiores produtividades para todos os genótipos. Como ambos os experimentos foram conduzidos de forma a minimizar os estresses biótico e abióticos, essa diferença na produtividade está diretamente relacionada às variáveis climáticas, principalmente às temperaturas máximas e mínimas (Figura 1).

Tabela 2. Produtividade de grãos do feijoeiro-comum em função da cultivar e da época de semeadura.

Data de Semeadura	Cultivar				Média
	BAT 477	BRS Agreste	Pérola	BRS Pontal	
	----------(kg ha^{-1})----------				
17/05/2015	2365aA	2754aA	2551aA	2757aA	2606
03/07/2013	2052aB	1973aB	1378aB	1918aB	1830
Média	2208	2364	1964	2337	2218

Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

Em ambas as datas de semeadura, o NDVI apresentou saturação aproximadamente aos 50 dias após a emergência (DAE, Figura 2). De acordo com Risso et al. (2012), em condição de elevado índice de área foliar o NDVI se satura, tornando-se pouco sensível à detecção de variações da biomassa verde. Gitelson et al. (2014) demonstraram, tanto para o milho quanto para a soja, que as melhores relações do NDVI com a índice de área foliar e com a radiação fotossinteticamente ativa ocorreram na fase vegetativa da cultura. Na fase reprodutiva, o NDVI pouco se alterou em função do incremento da área foliar. Com isso, pode-se inferir que também para o feijoeiro-comum a época de se obter a melhor relação entre o NDVI e o índice de área foliar é ao final da fase vegetativa.

Na primeira data de semeadura (17/05), após a saturação, o NDVI estabilizou-se em valores próximos a 0,85, e o IAF máximo médio foi de 3,94 aos 53 DAE, considerando os quatros genótipos. Já, para a segunda data de semeadura, o NDVI estabilizou-se em valores próximos a 0,80, após a saturação, o IAF máximo médio foi de 2,37, obtido aos 56 DAE, considerando também a média dos quatro genótipos.

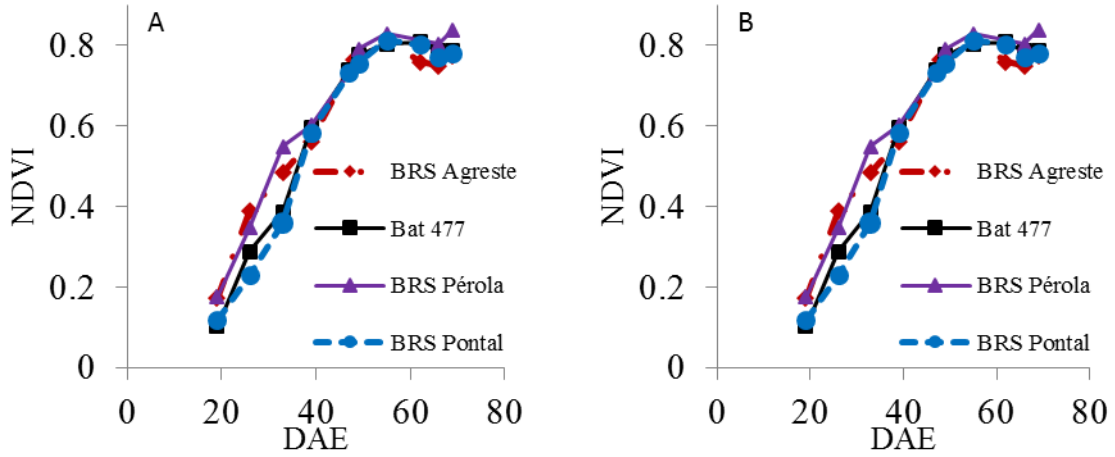


Figura 2. Comportamento do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em função dos dias após a emergência da cultura para a semeadura (DAE): 17/05/2015 (A) e 03/07/2013 (B).

O menor valor de IAF para a segunda data de semeadura (03/07) está relacionado às condições climáticas. Nessa data observou-se os menores valores de temperatura mínima, maior amplitude térmica diária e maior oscilação na ET_0 (Figura 1). Quando ocorre a saturação do NDVI, além da menor eficiência ao predizer o

incremento de biomassa da cultura, Risso et al. (2012) também relataram a dificuldade em se distinguir diferentes tipos de cobertura do solo, como ocorre entre as áreas de florestas e o cultivo de soja em pleno desenvolvimento no estado do Mato Grosso.

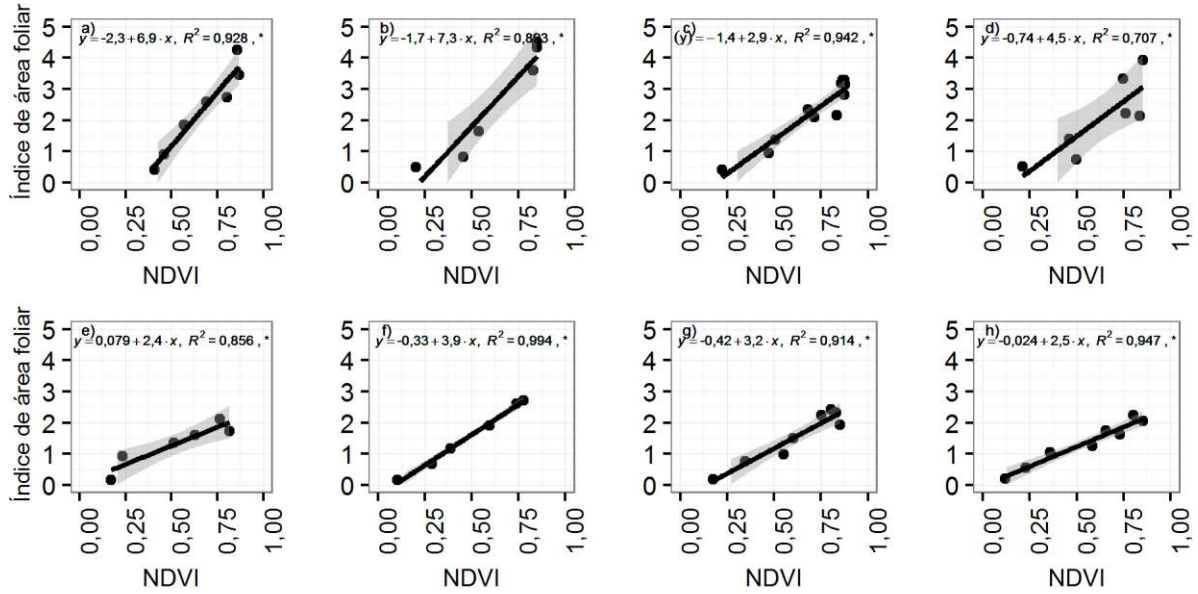


Figura 3. Regressões entre o índice de área foliar e o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) na data I- 17/05/2014 (painel superior - a, b, c e d) e II- 03/07/2014 (painel inferior - e, f, g e h), para os genótipos BRS Agreste (a e e), BAT 477 (b e f), Pérola (c e g) e BRS Pontal (d e h); (y) significa que a variável dependente foi transformada conforme Tabela 1; a faixa cinza representa o intervalo de confiança a 95%; * na equação representa valor de $p < 0,05$.

As regressões entre o índice de área foliar calculado pela amostragem das folhas e o NDVI dos quatro genótipos na primeira e segunda datas de semeadura tiveram qualidade similar, com tendência de melhores resultados para todos os genótipos na segunda data de semeadura (Figura 3 e Tabela 3). Há uma correlação linear entre o NDVI e as variáveis IAF e MSF (Figura 3). Na primeira data de semeadura (data I - 17/05/2013) o melhor ajuste foi com o genótipo Pérola (RMSE =0,31; d = 0,97 e R^2 = 0,94) e o de menor qualidade com o genótipo BRS Pontal (RMSE de 0,64; d = 0,91; R^2 = 0,70). Já na segunda data, para todos os indicadores de qualidade do ajuste, o melhor resultado foi para o genótipo BAT 477 (RMSE = 0,07; d = 1,00; R^2 = 0,99), esse também foi o melhor ajuste observado entre as duas datas para o IAF. O ajuste de menor qualidade na segunda data foi observado para o BRS Agreste (RMSE = 0,24; d = 0,96; R^2 = 0,85) (Tabela 3). Baseado nessas informações, observou-se que as cultivares mais prostradas (BAT 477 e Pérola) apresentaram o melhor ajuste para ambas as datas de semeadura. Essas cultivares, por apresentarem uma arquitetura mais prostrada, apresentam maior cobertura do solo em relação à cultivar BRS Agreste (arquitetura ereta) no início do ciclo de desenvolvimento da cultura. Isso pode ser observado na Figura 3, na dispersão dos pontos iniciais em relação à reta de regressão.

Tabela 3. Valores dos índices estatísticos da avaliação dos modelos de estimativa do índice de área foliar (IAF) e matéria seca da folha (MSF) para os diferentes genótipos nas datas de semeadura (I - 17/05/2014 e II - 03/07/2014)

IAF								
DT	GENÓTIPO	$\overline{O}$	$\overline{P}$	SDO	SDP	RMSE	d	R^2
I	BRS Agreste	2,31	2,31	1,36	1,31	0,34	0,98	0,92
I	BAT 477	3,22	3,22	1,94	1,83	0,59	0,97	0,89
I	Pérola	2,28	2,27	1,00	1,04	0,31	0,97	0,94
I	BRS Pontal	2,04	2,04	1,27	1,07	0,64	0,91	0,70
II	BRS Agreste	1,32	1,32	0,69	0,64	0,24	0,96	0,85
II	BAT 477	1,54	1,54	1,04	1,04	0,07	1,00	0,99
II	Pérola	1,55	1,55	0,83	0,79	0,23	0,98	0,91
II	BRS Pontal	1,34	1,34	0,71	0,69	0,15	0,99	0,94
MSF (kg.ha^{-1})								
DT	GENÓTIPO	$\overline{O}$	$\overline{P}$	SDO	SDP	RMSE	d	R^2
I	BRS Agreste	969	969	426	406	124	0,97	0,90
I	BAT 477	991	991	415	376	168	0,95	0,82
I	Pérola	969	969	429	391	168	0,95	0,83
I	BRS Pontal	751	751	304	245	174	0,88	0,64
II	BRS Agreste	512	512	218	156	143	0,82	0,51
II	BAT 477	788	788	396	385	85	0,99	0,94
II	Pérola	747	747	372	351	115	0,97	0,89
II	BRS Pontal	674	689	317	319	82	0,98	0,63

DT = data de semeadura; $\overline{O}$= média dos valores observados; $\overline{P}$= média dos valores preditos; SDO = desvio padrão dos valores observados; SDP = desvio padrão dos valores preditos; RMSE = raiz do erro quadrático médio; d = índice de concordância de Willmott; e R^2 = coeficiente de determinação

Para a estimativa da matéria seca de folha os melhores ajustes foram obtidos com os genótipos BRS Agreste (RMSE = 124; d = 0,97; R^2 = 0,90) na data de semeadura I e com o genótipo BRS Pontal na data II (RMSE = 82; d =0,98; R^2 = 0,63) (Figura 4 e Tabela 2).

Os menores valores obtidos para o desvio padrão da MSF (SD O e SD P, Tabela 3) observada e predita para os genótipos BRS Pontal na data I e BRS Agreste e Pérola na data II resultaram em maior discordância entre os seus valores de d e R^2. Segundo Willmott (1981), o coeficiente de determinação (R^2) superestima o erro quando há menor magnitude do desvio padrão dos valores observados ou preditos. Para o genótipo BRS Pontal na data II, apesar de apresentar um dos melhores ajustes, o coeficiente de determinação teve um valor baixo (R^2 = 0,63). Segundo Krause et al. (2005), a maior desvantagem do R^2 é o fato dele apenas quantificar a dispersão dos dados observados em relação ao modelo. Assim, a presença de alguns dados mais dispersos (Figura 4h) foi o suficiente para o R^2 indicar um modelo de qualidade inferior.

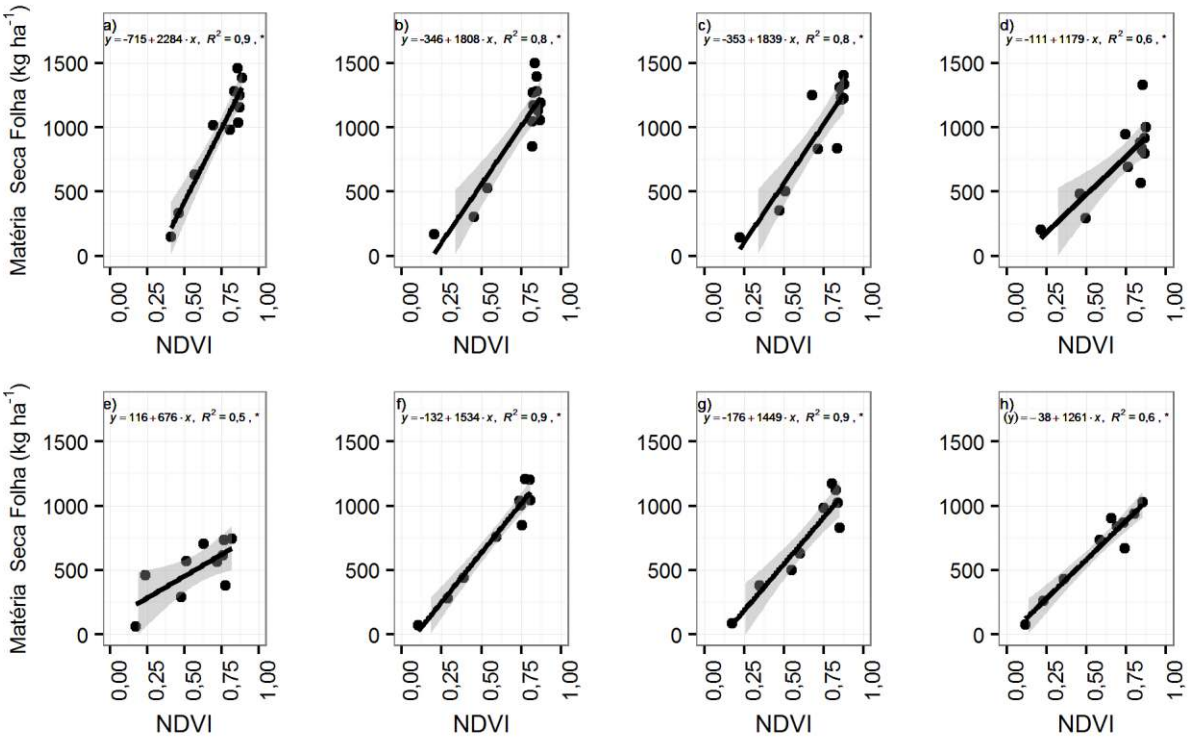


Figura 4. Regressões entre a matéria seca de folha e o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) na data I - 17/05/2014 (painel superior - a, b, c e d) e II- 03/07/2014 (painel inferior - e, f, g e h), para os genótipos BRS Agreste (a e e), BAT 477 (b e f), Pérola (c e g) e BRS Pontal (d e h); (y) significa que a variável dependente foi transformada conforme Tabela 1; a faixa cinza representa o intervalo de confiança a 95%; * na equação representa valor de $p < 0,05$.

Considerando conjuntamente os dados do IAF para o agrupamento das duas datas de semeadura (Figura 5 e Tabela 4), o menor valor de RMSE foi obtido com o genótipo Pérola (0,35) e de acordo com o índice de Willmott (0,96) esse foi o melhor ajuste (d = 0,96; R^2 = 0,86). Apesar do aumento nos valores RMSE, os mesmos se mantiveram na faixa observada na Tabela 2, que considera individualmente cada genótipo.

Para o MSF (Figura 6 e Tabela 4), quando se reuniu os genótipos nas duas datas de semeadura, a qualidade dos ajustes se mostrou similar aos ajustes individuais. O desvio padrão dos valores observados e preditos para a matéria seca de folha foi reduzido, o que provocou a discrepância entre os índices d e R^2 para cada genótipo. O melhor ajuste foi encontrado para o genótipo BAT 477, para o qual o RMSE, índice d e R^2apresentaram os seguintes valores, 142, 0,97 e 0,87, respectivamente. O ajuste de menor qualidade foi obtido com o genótipo BRS Agreste, para o qual o RMSE, índice d e R^2 foram 236; 0,89 e 0,64, respectivamente.

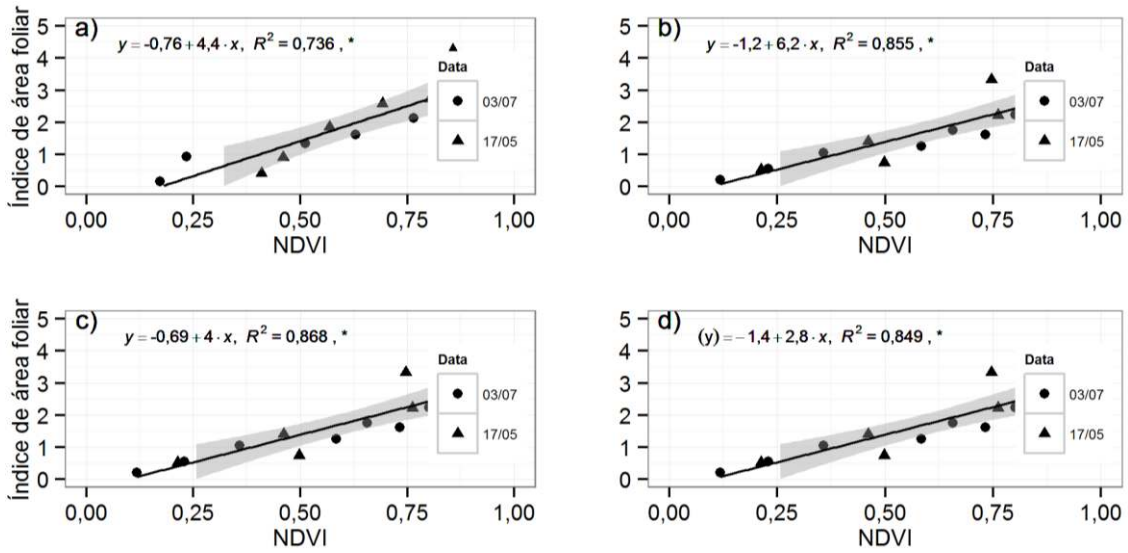


Figura 5. Regressões entre o índice de área foliar e o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) considerando o agrupamento das datas de semeadura I e II(17/05/2014; 03/07/2014) e genótipos (BRS Agreste (a), BAT477 (b), Pérola (c) e BRS Pontal (d)); (y) significa que a variável dependente foi transformada conforme Tabela 1; a faixa cinza representa o intervalo de confiança a 95%; * na equação representa valor de $p < 0,05$. Circulo cheio representa a semeadura na data I e triangulo cheio na data de semeadura II.

Tabela 4. Valores dos índices estatísticos da avaliação dos modelos de estimativa do índice de área foliar (IAF) e matéria seca de folha (MSF) para os diferentes genótipos nas duas datas de semeadura (I e II).

IAF							
GENÓTIPO	$\overline{O}$	$\overline{P}$	SDO	SDP	RMSE	d	R^2
BRS Agreste	1,85	1,85	1,18	1,01	0,58	0,92	0,73
BAT 477	2,50	2,50	1,78	1,65	0,65	0,96	0,85
Pérola	1,97	1,97	0,98	0,91	0,35	0,96	0,86
BRS Pontal	1,67	1,63	1,04	0,92	0,53	0,91	0,84
MSF ($kg.ha^{-1}$)							
GENÓTIPO	$\overline{O}$	$\overline{P}$	SDO	SDP	RMSE	d	R^2
BRS Agreste	752	752	408	329	236	0,89	0,64
BAT 477	903	903	410	384	142	0,97	0,87
Pérola	874	874	411	377	159	0,96	0,84
BRS Pontal	717	717	305	264	149	0,92	0,74

$\overline{O}$ = média dos valores observados; $\overline{P}$ = média dos valores preditos; SDO = desvio padrão dos valores observados; SDP = desvio padrão dos valores preditos; RMSE = raiz do erro quadrático médio; d = índice de concordância de Willmott e R^2 = coeficiente de determinação.

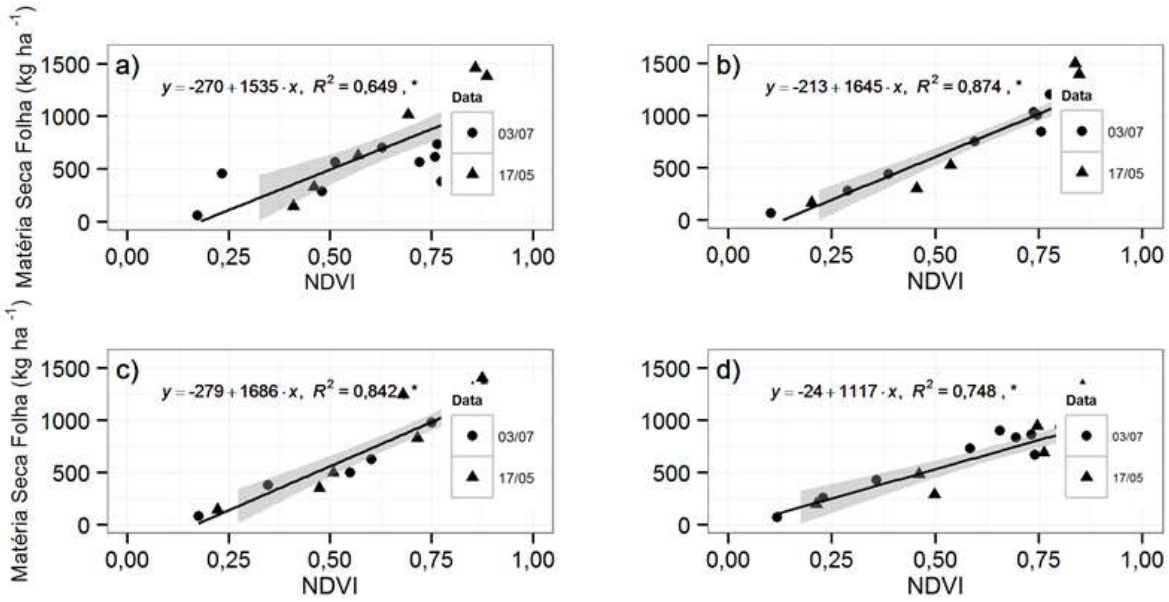


Figura 6. Regressões entre a matéria seca de folha e o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) considerando o agrupamento das datas de semeadura I e II (17/05/2014; 03/07/2014) e os genótipos (BRS Agreste (a), BAT 477 (b), Pérola (c) e BRS Pontal (d)); (y) significa que a variável dependente foi transformada conforme Tabela 1; a faixa cinza representa o intervalo de confiança a 95%; * na equação representa valor de $p < 0,05$. Circulo cheio representa a semeadura na data I e triangulo cheio na data de semeadura II.

Considerando o agrupamento de todos os dados do IAF (quatro genótipos e duas datas de semeadura (I, II), Figura 7a e Tabela 5), o valor do RMSE foi de 0,63 e do índice d de 0,92. Como se trata de diferentes genótipos e datas de semeaduras, isso explica o decréscimo na eficiência do modelo geral. Monteiro et al. (2013) obtiveram melhores ajustes do IAF utilizando modelos potenciais (não avaliados neste estudo), devido à saturação do NDVI. Entretanto, os mesmos autores também obtiveram bons ajustes com o modelo linear.

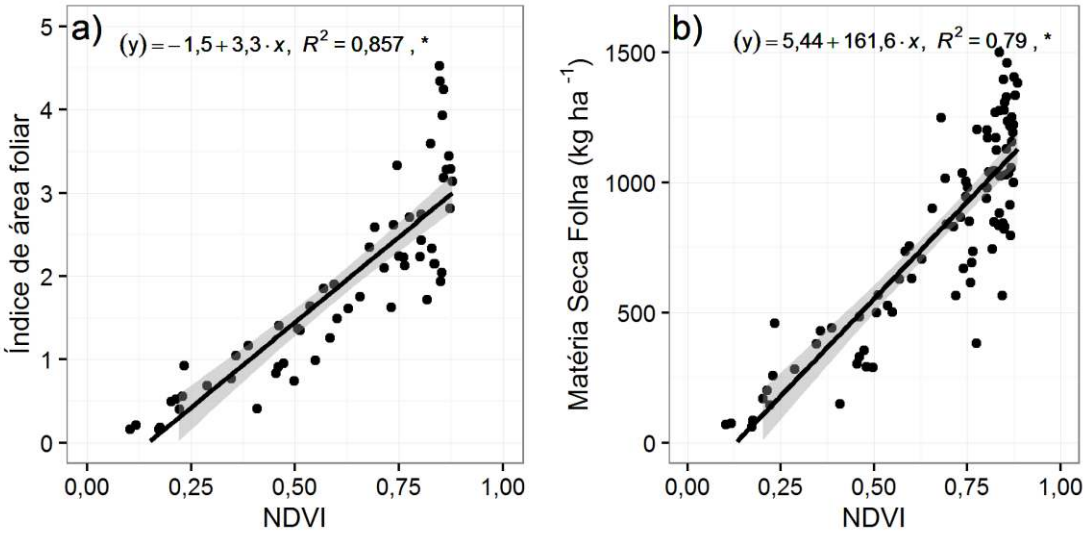


Figura 7. Regressões entre o índice de área foliar e o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) a) e a matéria seca de folhas e o NDVI b) considerando as duas datas de semeadura e os quatro genótipos de feijão; (y) significa que a variável dependente foi transformada conforme Tabela 1; a faixa cinza representa o intervalo de confiança a 95%; * na equação representa valor de $p < 0,05$.

Quando se analisou conjuntamente todos dos dados da MSF a qualidade do ajuste se manteve satisfatória (Figura 7b e Tabela 5). O RMSE deste modelo foi de 195,83 kg ha^{-1}, enquanto o índice d foi de 0,92, com a diferença entre a média dos valores observados e preditos igual a 0,05. Portanto, a estimativa do IAF e da MSF por meio do NDVI pode ser realizada de forma satisfatória com um modelo de regressão geral, independente da data de semeadura e genótipo utilizado (equação 1 e 2, respectivamente). Para ambas as variáveis, de acordo com os dados obtidos neste estudo recomenda-se utilizar a regressão linear ponderada. O modelo genérico de regressão linear para estimar o IAF está ilustrado na Figura 7a e para a MSF na Figura 7b.

Tabela 5. Valores dos índices estatísticos da avaliação do modelo de estimativa do índice de área foliar (IAF) e matéria seca de folha (MSF) para todos os genótipos e nas duas datas de semeadura.

VARIÁVEL	$\overline{O}$	$\overline{P}$	SDO	SDP	RMSE	d	R^2
IAF	1,99	1,94	1,26	1,08	0,63	0,92	0,86
MSF ($kgha^{-1}$)	811	804	387	331	190	0,92	0,79

$\overline{O}$= média dos valores observados; $\overline{P}$= média dos valores preditos; SDO = desvio padrão dos valores observados; SDP = desvio padrão dos valores preditos; RMSE = raiz do erro quadrático médio; d = índice de concordância de Willmott; R^2 = coeficiente de determinação.

As variáveis IAF e MSF observadas e as estimadas pelos modelos genéricos apresentados na Figura 7 apresentaram correlação positiva com a produtividade (Tabela 6). Observou-se que a correlação com a produtividade foi maior para valores estimados, para ambas as variáveis (IAF e MSF). Com isso confirma-se que as variáveis IAF e MSF podem ser utilizadas para estimar a produtividade de genótipos de feijoeiro-comum, como já relatado por outros autores (FALQUETO et al., 2009; GROHS et al., 2009; CONCENÇO et al., 2011; ALVAREZ et al., 2012).

Tabela 6. Valores da correlação de Pearson e de p para as variáveis IAF e MSF observadas e estimadas pelos modelos genéricos apresentados na Figura 7 em relação à produtividade observada.

Variáveis	IAF obs	MSF obs	IAF est	MSF est
		Correlação		
Produtividade	0,69	0,60	0,79	0,77
Valor *p*	<0,05	<0,01	<0,05	<0,05

obs: observado; est: estimado

CONCLUSÕES

O índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) apresentou saturação para as duas datas de semeadura a partir dos 50 dias após a emergência, razão pela qual deve ser utilizado principalmente na fase vegetativa da cultura. O NDVI, independentemente do genótipo e data de semeadura, permite estimar o índice de área foliar e a massa da matéria seca das folhas por meio de um modelo de regressão linear ponderado.

Conclui-se, portanto, que o NDVI proporciona resultados semelhantes ao das medições da biomassa e índice de área foliar pelo método destrutivo e que essas variáveis possuem correlação positiva com a produtividade de grãos do feijoeiro.

REFERÊNCIAS

AIDAR, H. **Cultivo do feijoeiro comum***:* características da cultura. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003. (Sistemas de produção, 2). Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Feijao/CultivodoFeijoeiro>. Acesso em: 15 Nov. 2014.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration**: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO,

1998. 300 p. (FAO Irrigation and Drainage. Paper 56).

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p.711–728, 2013. http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507

ALVAREZ, R.C.F.; CRUSCIOL, C.A.C.; NASCENTE, A.S. Análise de crescimento e produtividade de cultivares de arroz de terras altas dos tipos tradicional, intermediário e moderno. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.42, n.4, p.397-406, 2012. http://dx.doi.org/10.1590/S1983-40632012000400008

COLTRI, P.P.; RAMIREZ, G.M.; WALTER, M.K.C.; ZULLO JUNIOR, J.; PINTO, H.S.; NASCIMENTO, C.R.; GONÇALVES, R.R.V. Utilização de índices de vegetação para estimativas não destrutivas da biomassa, estoque e sequestro de carbono do cafeeiro arábica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. **Anais...** Natal, 2009. p. 25–30.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira –** grãos – safra 2015/16, sétimo levantamento. 2016. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_04_07_10_39_11_boletim_graos_abril_2016.pdf>. Acesso em: 13 Abr. 2016.

CONCENÇO, G.I.; ASPIAZÚ, I.; GALON, L.; FERREIRA, E.A.; FREITAS, M.A.M.; FIALHO, C M.T.; SCHWANKE, A.M.L.; FERREIRA, F.A.; SILVA, A.A. Photosynthetic characteristics of hybrid and conventional rice plants as a function of plant competition. **Planta Daninha**, v.29, n.4, p.803-809, 2011. http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582011000400010

FALQUETO, A.R.; CASSOL, D.; MAGALHÃES JÚNIOR, A.M.; OLIVEIRA, A.C.; BACARINI, M.A. Crescimento e partição de assimilados em cultivares de arroz diferindo no potencial de produtividade de grãos. **Bragantia**, v.68, n.3, p.453-461, 2009.

FAOSTAT. **Crops**. 2016. Disponível em: <http://faostat3.fao.org/home/E>. Acesso em: 27 Abr. 2016.

GITELSON, A.A.; PENG, Y.; HUEMMRICH, K.F. Relationship between fraction of radiation absorbed by photosynthesizing maize and soybean canopies and NDVI from remotely sensed data taken at close range and from MODIS 250 m resolution data. **Remote Sensing of Environment**, v.147, n.5, p.108–120, 2014. http://dx.doi.org/ doi:10.1016/j.rse.2014.02.014

GROHS, D.S.; BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C.M.; POLETTO, N. Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor Greenseeker. **Engenharia Agrícola**, v.29, n.1, p.101-112, 2009. http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162009000100011

HOUBORG, R.; FISHER, J.B.; SKIDMORE, A.K. Advances in remote sensing of vegetation function and traits. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformatio**n, v.43, p.1-6, 2015. http://dx.doi.org/ doi:10.1016/j.jag.2015.06.001

HUBERT, M.; ROUSSEEUW, P. J.; AELST, S. V. High-breakdown robust multivariate methods. Statistical Science, v.23, n.1, p.92–119, Aug. 2008. http://dx.doi.org/10.1214/088342307000000087

KRAUSE, P.; BOYLE, D.P.; BÄSE, F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. **Advances in Geosciences***,* v.5, n.5, p.89-97, 2005.

MENESES, P.R.; MADEIRA NETTO, J.S. (Org.). **Sensoriamento remoto**: reflectância dos alvos naturais. Brasilia: Editora UnB: Embrapa Cerrados, 2001. 262 p.

MONTEIRO, P.F.C.; ANGULHO FILHO, R.; XAVIER, A.C.; MONTEIRO, R.O.C. Índices de vegetação simulados de diferentes sensores na estimativa das variáveis biofísicas do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.48, n.4, p.433-441, 2013. http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2013000400012

MOREIRA, M.A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. 3. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2007. 320 p.

PELTIER, M.R.; WILCOX, C.J.; SHARP, D.C. Technical note: application of the Box-Cox data transformation to animal science experiments. **Journal of Animal Science**, v.76, n.3, p.847-849, 1998.

RISSO, J.; RIZZI, R.; RUDORFF, B.F.T.; ADAMI, M.; SHIMABUKURO, Y.E.; FORMAGGIO, A.R.; EPIPHANIO, R.D.V. Índices de vegetação Modis aplicados na discriminação de áreas de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.9, p.1317-1326, 2012. http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2012000900017

SANCHES, I. D.; SOUZA FILHO, C.R.; KOKALY, R.F. Spectroscopic remote sensing of plant stress at leaf and canopy levels using the chlorophyll 680 nm absorption feature with continuum removal. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote**

Sensing, v.97, p.111–122, 2014. http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.08.015

STEINMETZ, S. Evapotranspiração máxima no cultivo do feijoeiro de inverno. Goiânia: Embrapa-Cnpaf, 1984. 4 p. (Pesquisa em andamento, 47).

TEIXEIRA, G.C.S.; STONE, L.F.; HEINEMANN, A.B. Eficiência do uso da radiação solar e índices morfofisiológicos em cultivares de feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.45, n.1, p.9-17, 2015. http://dx.doi.org/10.1590/1983-40632015v4528297

WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, v.2, n.2, p.184-194, 1981. http://dx.doi.org/ 10.1080/02723646.1981.10642213

XIAO, Z.; LIANG, S.; SUN, R.; WANG, J.; JIANG, B. Estimating the fraction of absorbed photosynthetically active radiation from the MODIS data based GLASS leaf area index product. **Remote Sensing of Environment**, v.171, p.105–117, 2015. http://dx.doi.org/ 10.1016/j.rse.2015.10.016

Recebido para publicação em 02/06/2016
Revisado em 12/09/2016
Aceito em 30/09/2016