

Índices de vegetação na estimativa da produtividade do feijoeiro cultivado sob doses de nitrogênio

Fernando de Oliveira Turci Sandrini¹, Fábio Tiraboschi Leal¹, Anderson Prates Coelho¹,
Leandro Borges Lemos¹, David Luciano Rosalen¹

¹ Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal-SP, Brasil. E-mail: fernando_turci@yahoo.com.br; lealft@bol.com.br; anderson_100ssp@hotmail.com; leandro.lemos@unesp.br; david.rosalen@unesp.br

RESUMO: O sensoriamento remoto apresenta diversas aplicações na agricultura, destacando-se a definição de áreas de manejos específicos e estimativa da produtividade das culturas. Objetivou-se comparar a acurácia de dois índices de vegetação (NDVI e IRVI) na estimativa da produtividade de grãos e de biomassa do feijoeiro cultivado sob doses de nitrogênio em quatro estádios fenológicos. O experimento foi realizado na safra de inverno de 2018. O experimento apresentou 5 tratamentos, sob doses de N em cobertura (0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹), com quatro repetições. Os índices de vegetação NDVI e IRVI foram obtidos pelo sensor óptico ativo Greenseeker. Foram plotadas regressões do valor médio de NDVI e IRVI de cada parcela com a produtividade de biomassa e de grãos da cultura. As regressões foram submetidas à análise ($p < 0,05$) e, quando significativas, os ajustes foram testados pelo coeficiente de determinação (R^2) e raiz do erro quadrático médio (RMSE). A acurácia da estimativa da produtividade de grãos do feijoeiro por meio de índices de vegetação ($R^2 = 0,71$; RMSE = 162 kg ha⁻¹) é superior do que para a produtividade de biomassa ($R^2 = 0,52$; RMSE = 898 kg ha⁻¹). O estágio fenológico com maior acurácia na estimativa das produtividades é o de enchimento de grãos (R_8).

Palavras-chave: acurácia; IRVI; modelagem; NDVI; sensoriamento remoto

Vegetation indices in the estimation of common bean yield cultivated under nitrogen rates

ABSTRACT: Remote sensing presents several applications in agriculture, highlighting the definition of specific management areas and estimation of crop yield. The aim of this study was to compare the accuracy of two vegetation indices (NDVI and IRVI) in the estimation of grain and biomass yield of common bean cultivated under nitrogen doses in four phenological stages. The experiment was carried out in the winter crop of 2018. The experiment had five treatments, under N rates in the topdressing (0, 50, 100, 150 and 200 kg ha⁻¹), with four repetitions. The NDVI and IRVI vegetation indices were obtained by the Greenseeker active sensor. Regressions of the mean value of NDVI and IRVI of each plot were plotted with the biomass and grain yield of the crop. The regressions were submitted to the analysis ($p < 0.05$) and, when significant, the adjustments were tested by the coefficient of determination (R^2) and root mean square error (RMSE). The accuracy of estimating common bean grain yield by means of vegetation index ($R^2 = 0.71$, RMSE = 162 kg ha⁻¹) is higher than for biomass yield ($R^2 = 0.52$, RMSE = 898 kg ha⁻¹). The phenological stage with higher accuracy in the estimation of yields is grain filling (R_8).

Key words: accuracy; IRVI; modeling; NDVI; remote sensing

Introdução

O Brasil é o maior produtor de feijão do mundo, apresentando área anual cultivada de 3,2 milhões de ha e produção total de 3,3 milhões de toneladas (Conab, 2018). A produtividade média da cultura é baixa no país, apresentando 1,04 Mg ha⁻¹ de grãos, visto que o rendimento potencial pode chegar a 6 Mg ha⁻¹ (Oliveira et al., 2011). O feijão é a fonte de proteína mais consumida pelos brasileiros. Além do ponto de vista nutricional, a cultura do feijão é uma ótima opção para ser inserida na rotação e sucessão de culturas em razão de seu ciclo curto e elevada rentabilidade (Richetti & Ito, 2015).

No Brasil, durante o ano agrícola são cultivadas três safras de feijão: a safra das águas caracteriza-se pela semeadura entre outubro e dezembro, a safra da seca com semeadura entre fevereiro e março e a safra de inverno com semeadura de abril a junho no sudeste e centro-oeste brasileiro. Como as safras estão submetidas à condições climáticas distintas, existe grande variabilidade de sistemas de produção do feijoeiro. Nesse sentido, os manejos agrícolas para a cultura tendem a ser distintos entre as safras, destacando-se a irrigação, adubação e controle de plantas daninhas. Assim, a utilização de sensoriamento remoto nas lavouras de feijão pode ajudar na definição desses manejos (Coelho et al., 2018; Zhao et al., 2018).

O sensoriamento remoto na agricultura pode ser utilizado na definição de áreas de manejo específico, no manejo da adubação nitrogenada e irrigação das culturas (Toureiro et al., 2017), no controle de plantas daninhas (Huang et al., 2016) e na estimativa de produtividade das safras agrícolas (Mosleh et al., 2015). Para esse último, o sensoriamento remoto apresenta elevada importância prática, ajudando os produtores no gerenciamento de sua produção e também na definição de preço dos produtos agrícolas (Mosleh et al., 2015).

Vários sensores e índices podem ser utilizados para o sensoriamento remoto de áreas agrícolas (Candiago et al., 2015). Os índices de vegetação permitem a identificação do estado fisiológico das culturas, auxiliando na definição de áreas de manejo específico, tais como adubação e irrigação a taxa variável e controle de doenças (Zarco-Tejada et al., 2013; Ihuoma & Madramootoo, 2017). Dependendo do índice utilizado e do tipo de equipamento, a acurácia de estimativa da produtividade das culturas pode ser alterada. Outros fatores como a cultura e o estágio fenológico de avaliação também afetam diretamente a acurácia de estimativa do rendimento e na definição de áreas de manejo específico das culturas (Rissini et al., 2015). Dessa maneira, são necessário estudos que indiquem os melhores índices e os estádios fenológicos de avaliação que apresentam a maior acurácia na estimativa dos atributos agrônômicos de cada cultura, garantindo a aplicação do sensoriamento remoto com maior precisão.

O objetivo do trabalho foi avaliar e comparar a acurácia de dois índices de vegetação (NDVI e IRVI) na estimativa da produtividade de grãos e de biomassa do feijoeiro cultivado sob doses de nitrogênio em quatro estádios fenológicos.

Material e Métodos

O experimento foi realizado na Fazenda Experimental da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Unesp, Jaboticabal, SP, na safra de inverno de 2018, próximo às coordenadas 21°14'59"S, 48°17'16"W e altitude de 572 m. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw, subtropical, relativamente seco no inverno, com chuvas de verão, apresentando temperatura média anual de 22°C, temperatura do mês mais frio superior a 18 °C e precipitação anual normal de 1.425 mm (Alvares et al., 2013).

O feijão foi semeado em área experimental no primeiro ano de adoção do sistema plantio direto, sob palhada de milheto, em Latossolo Vermelho eutrófico (Embrapa, 2013). O milheto foi dessecado 60 dias após a emergência, utilizando-se de glifosato na dose de 2,0 L ha⁻¹ do produto comercial. Os atributos químicos do solo foram pH (CaCl₂) 6,1, MO = 22 g dm⁻³, P (resina) = 87 mg dm⁻³, K = 9 mmol_c dm⁻³, Ca = 48 mmol_c dm⁻³, Mg = 20 mmol_c dm⁻³, H+Al = 25 mmol_c dm⁻³, CTC = 102 mmol_c dm⁻³, S = 10 mg dm⁻³, B = 0,25 mg dm⁻³, Cu = 1,0 mg dm⁻³, Fe = 20 mg dm⁻³, Mn = 23 mg dm⁻³ e Zn = 4 mg dm⁻³ (Raij et al. 2001). Esse solo apresenta a seguinte análise granulométrica: argila = 540 g kg⁻¹; silte = 230 g kg⁻¹ e areia = 230 g kg⁻¹.

A semeadura do feijão, cultivar TAA Gol, foi realizada mecanicamente no dia 17 de maio de 2018. O espaçamento entre linhas utilizado foi de 0,45 m, e a densidade de semeadura de 13 sementes por metro de sulco, gerando população de 240.000 plantas ha⁻¹. A adubação de semeadura foi realizada com o fertilizante mineral misto de formulação 04-28-10, na dose de 350 kg ha⁻¹ (0,3% B, 4% Ca, 0,01% Mo, 5% S e 1,2% Zn).

O experimento apresentou 5 tratamentos, sob doses de N em cobertura no feijoeiro (0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹). As adubações de cobertura foram efetuadas à lanço, no estágio fenológico V₄ (presença da terceira folha trifoliada completamente aberta em 50% das plantas) (Fernández et al. 1985), utilizando-se a ureia como fonte. Após a adubação com N em cobertura, a área foi irrigada com lâmina de água de 10 mm, a fim de evitar perdas desse nutriente por volatilização, conforme Viero et al. (2015). O manejo fitossanitário foi realizado de acordo com a necessidade e indicações fitotécnicas para a cultura. A irrigação foi do tipo aspersão convencional, aplicando-se uma lâmina de água de 20 mm com turnos de rega a cada 5 dias, manejo realizado de acordo com Allen et al. (1998), baseando-se na evapotranspiração da cultura (ETc).

O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, com quatro repetições. A parcela experimental foi constituída por 5 linhas de feijão com cinco metros de comprimento cada, sendo consideradas como área útil as três linhas centrais, desprezando-se 0,5 m de cada extremidade.

Foi utilizado o equipamento GreenSeeker HandHeld™ portátil para obtenção dos valores dos índices de vegetação NDVI (índice de vegetação por diferença normalizada) e IRVI (razão inversa do índice de vegetação). Esse sensor é ativo e gera automaticamente dois índices de vegetação, o NDVI

(Equação 1) e o IRVI (Equação 2), a partir da medida da resposta espectral da banda do vermelho (650 nm) e do infravermelho próximo (770 nm). A obtenção de dados com o GreenSeeker foi realizada manualmente, com passagem sobre o dossel (0,5 m acima) do feijoeiro, conforme Santos et al. (2017) e Coelho et al. (2018). Para cada parcela foram obtidos entre 20 e 30 valores de NDVI (Equação 1) e IRVI (Equação 2).

$$\text{NDVI} = \frac{\text{pnir} - \text{pr}}{\text{pnir} + \text{pr}} \quad (1)$$

$$\text{IRVI} = \frac{\text{pr}}{\text{pnir}} \quad (2)$$

em que: NDVI: índice de vegetação por diferença normalizada; IRVI: razão inversa do índice de vegetação; pnir: reflectância no infravermelho próximo (770 nm); pr: reflectância no vermelho (650 nm).

As leituras de NDVI e IRVI foram realizadas em 4 estádios fenológicos da cultura: emissão da sétima folha trifoliada ($V_{4,7}$), aparecimento de botões florais (R_5), florescimento pleno (R_6) e enchimento de grãos (R_8), de acordo com a escala fenológica de Fernández et al. (1985). Cada repetição apresentou um valor médio de NDVI e IRVI, sendo correlacionados à produtividade de grãos e de biomassa de cada parcela para análise das regressões. Foram testadas regressões lineares e não lineares de segundo grau para a calibração dos modelos, escolhendo àquelas que apresentaram melhor ajuste para a análise.

Por ocasião da maturidade fisiológica (R_9), foi determinada a população de plantas por hectare de cada parcela. A produtividade de grãos do feijoeiro foi calculada colhendo-se as três linhas centrais, desconsiderando 0,5 m de cada extremidade, com a umidade dos grãos padronizada a 0,13 g g⁻¹. Para a obtenção da produtividade de biomassa, foram coletadas 5 plantas consecutivas de cada parcela, sendo levadas para estufa de circulação forçada de ar à 65 °C, até massa constante, para a obtenção da matéria seca.

A acurácia dos modelos foi avaliada pela análise de regressão (5% de probabilidade), coeficiente de determinação (R^2) e raiz do erro quadrático médio (Root Mean Squared Error - RMSE) (Ghilani & Wolf, 2006) (Equação 3). A acurácia do modelo é composta pela interação da precisão, avaliada pelo R^2 , e erro, avaliado pelo RMSE. Todas as parcelas foram utilizadas como um ponto na análise dos modelos, ou seja, cada modelo totalizou 20 pontos em cada estágio fenológico. O RMSE de cada modelo foi obtido pela soma do erro de cada um dos pontos do modelo dividido pelo número de pontos da regressão, sendo um indicativo de erro médio de cada ponto. Os outliers foram removidos conforme metodologia proposta por Belsley et al. (1980), até o limite de 15% dos dados.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\text{Yobs}_i - \text{Yest}_i)^2}{N}} \quad (3)$$

em que: N - número de dados; Yobs_i - valores observados de Y; Yest_i - valores estimados de Y.

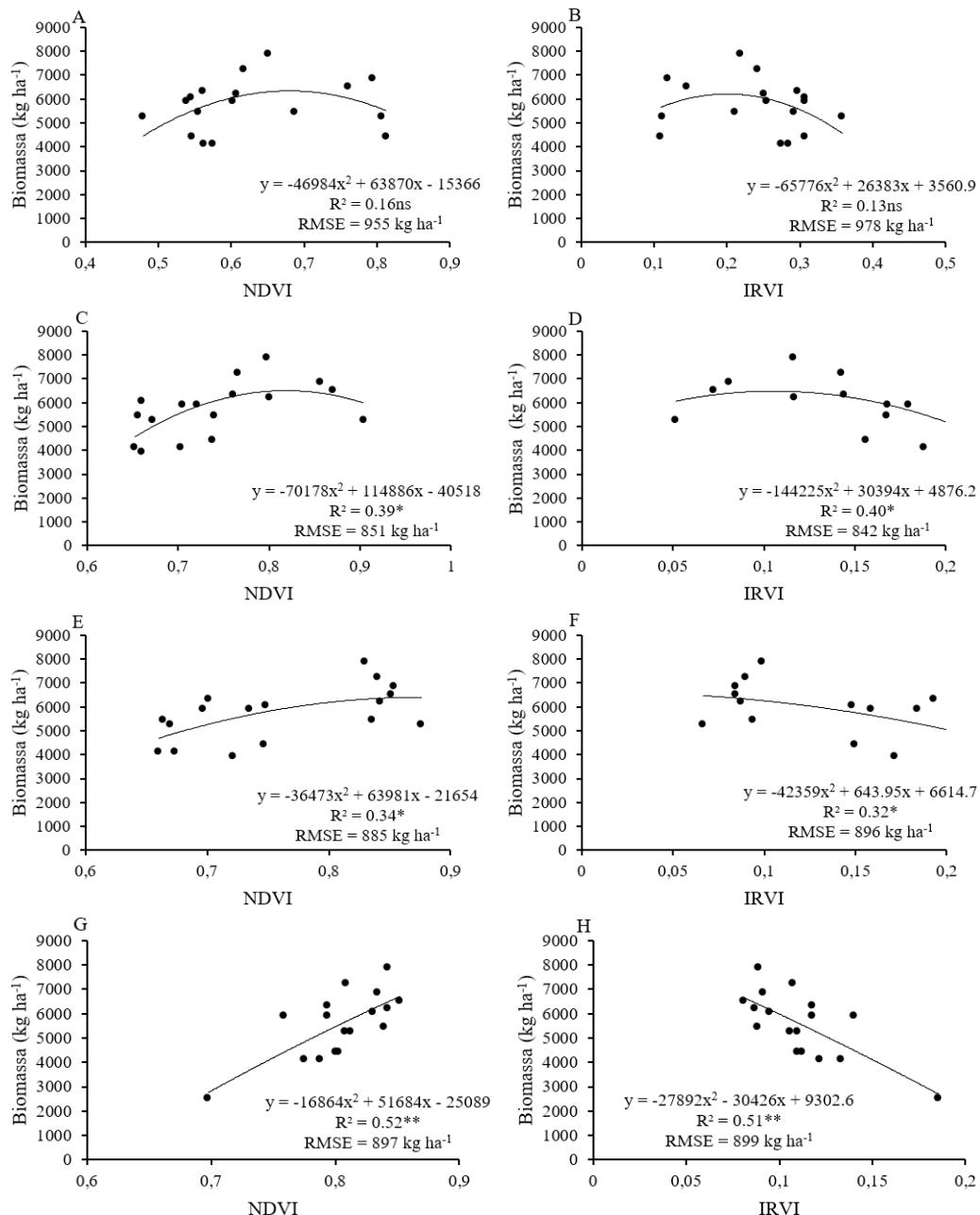
Resultados e Discussão

Avaliou-se a acurácia de estimativa da produtividade de grãos e de biomassa do feijoeiro, cultivado sob doses de N em cobertura, em função de dois índices de vegetação (IRVI e NDVI) em quatro estádios fenológicos. Para a produtividade de biomassa (PB), a acurácia dos modelos dos dois índices de vegetação aumentou com o decorrer do ciclo do feijoeiro (Figura 1).

No estágio fenológico $V_{4,7}$, os modelos não foram significativos na estimativa da PB. Nos estádios R_5 e R_6 , os modelos foram significativos ao nível de probabilidade de 5% e no estágio R_8 foram significativos ao nível de 1% de probabilidade. O erro dos modelos (RMSE) foi maior para o estágio $V_{4,7}$, e, a partir do estágio R_5 , estabilizou-se em torno de 878 kg ha⁻¹ (Figura 1). Comparando os índices, verifica-se que não houve diferenças relevantes na acurácia dos modelos, independentemente do estágio fenológico avaliado, uma vez que o erro (RMSE) e a precisão (R^2) dos modelos foram próximos para os dois índices.

Para a produtividade de grãos do feijoeiro, os modelos de estimativa para ambos os índices de vegetação nos estádios fenológicos $V_{4,7}$ e R_5 não foram significativos, enquanto que para os estádios R_6 e R_8 foram significativos ao nível de 1% de probabilidade (Figura 2). A precisão do modelo (R^2) aumentou com o decorrer do ciclo da cultura, enquanto o erro (RMSE) foi menor para o estágio R_8 (NDVI = 163 kg ha⁻¹; IRVI = 160 kg ha⁻¹), indicando maior acurácia dos modelos no estágio fenológico R_8 .

A variação dos valores de NDVI e IRVI em função das doses de nitrogênio aplicadas em cobertura no feijoeiro apresentou ajuste significativo somente para o estágio fenológico R_8 (Figura 3). De acordo com as regressões para esse estágio fenológico, o máximo valor de NDVI (0,820) e mínimo de IRVI (0,100) foi obtido com a dose de N de 129 kg ha⁻¹ para os dois índices de vegetação. Vale ressaltar que os valores de NDVI apresentam acréscimo e os de IRVI decréscimo com o incremento das doses de N, pois são calculados de formas distintas. O IRVI é a relação inversa entre a reflectância do vermelho (650 nm) com a reflectância do infravermelho (770 nm), enquanto que o NDVI é calculado pela diferença normalizada entre as reflectâncias das duas bandas. Como o incremento da dose de N aumenta o crescimento e desenvolvimento do feijoeiro (Soratto et al., 2013), menor será a reflectância da banda do vermelho e maior na banda do infravermelho, justificando a diferença de variação dos dois índices em função das doses de N. Isso ocorre devido ao incremento de área foliar e teor de clorofila proporcionado pelo aumento das doses de N (Zarco-Tejada et al., 2013), diminuindo a reflectância na banda do vermelho, uma vez que um dos picos de absorção de luz pela molécula de clorofila ocorre próximo a 650 nm (Zarco-Tejada et al., 2013).



ns – não significativo; *Significativo a 5% de probabilidade; **Significativo a 1% de probabilidade.

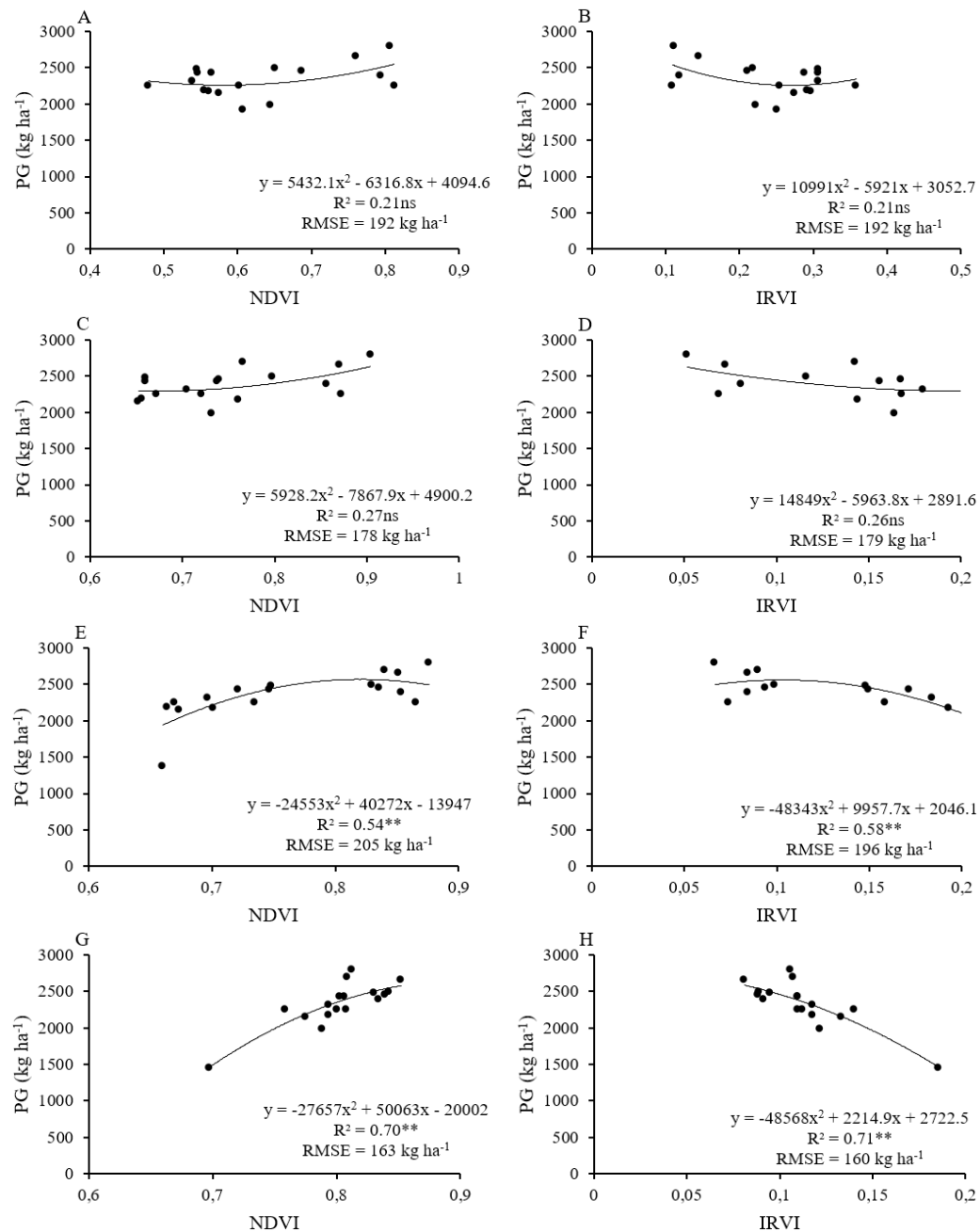
Figura 1. Acurácia dos modelos de estimativa da produtividade de biomassa do feijoeiro a partir dos índices de vegetação NDVI e IRVI nos estádios fenológicos $V_{4,7}$ (A e B), R_5 (C e D), R_6 (E e F) e R_8 (G e H).

A definição da dose de N em função do valor máximo de NDVI e mínimo de IRVI, a partir dos modelos gerados, pode auxiliar na recomendação da aplicação de nitrogênio no feijoeiro. Esse fato pode ser confirmado pelo modelo de estimativa da produtividade de grãos do feijoeiro em função das doses de N em cobertura, uma vez que a máxima produtividade foi obtida com dose de N de 127 kg ha⁻¹, dose muito próxima ao obtido em função do NDVI (Figura 4).

Verificou-se que os modelos de estimativa da produtividade de grãos (PG) apresentaram maior acurácia do que para a estimativa da produtividade de biomassa (PB). Esse fato foi verificado em alguns trabalhos (Abrahão et al., 2013; Zerbato et al., 2016; Coelho et al., 2018), pois o acúmulo de biomassa

das plantas apresenta maior variabilidade espacial do que a produtividade de grãos. No presente estudo, no estágio fenológico R_8 , o coeficiente de variação dos dados para a calibração dos modelos foi de 23% e 12,8% para a biomassa e produtividade de grãos, respectivamente. O acúmulo de biomassa é mais sensível aos fatores bióticos e abióticos do que a produtividade de grãos (Machado et al., 2002), confirmando a maior variabilidade e justificando a menor acurácia de estimativa para essa variável.

Quanto aos estádios fenológicos, as maiores acurácias foram verificadas para avaliações em estádios mais avançados do ciclo. Avaliações em fases mais adiantadas das culturas representam mais as condições edafoclimáticas que as



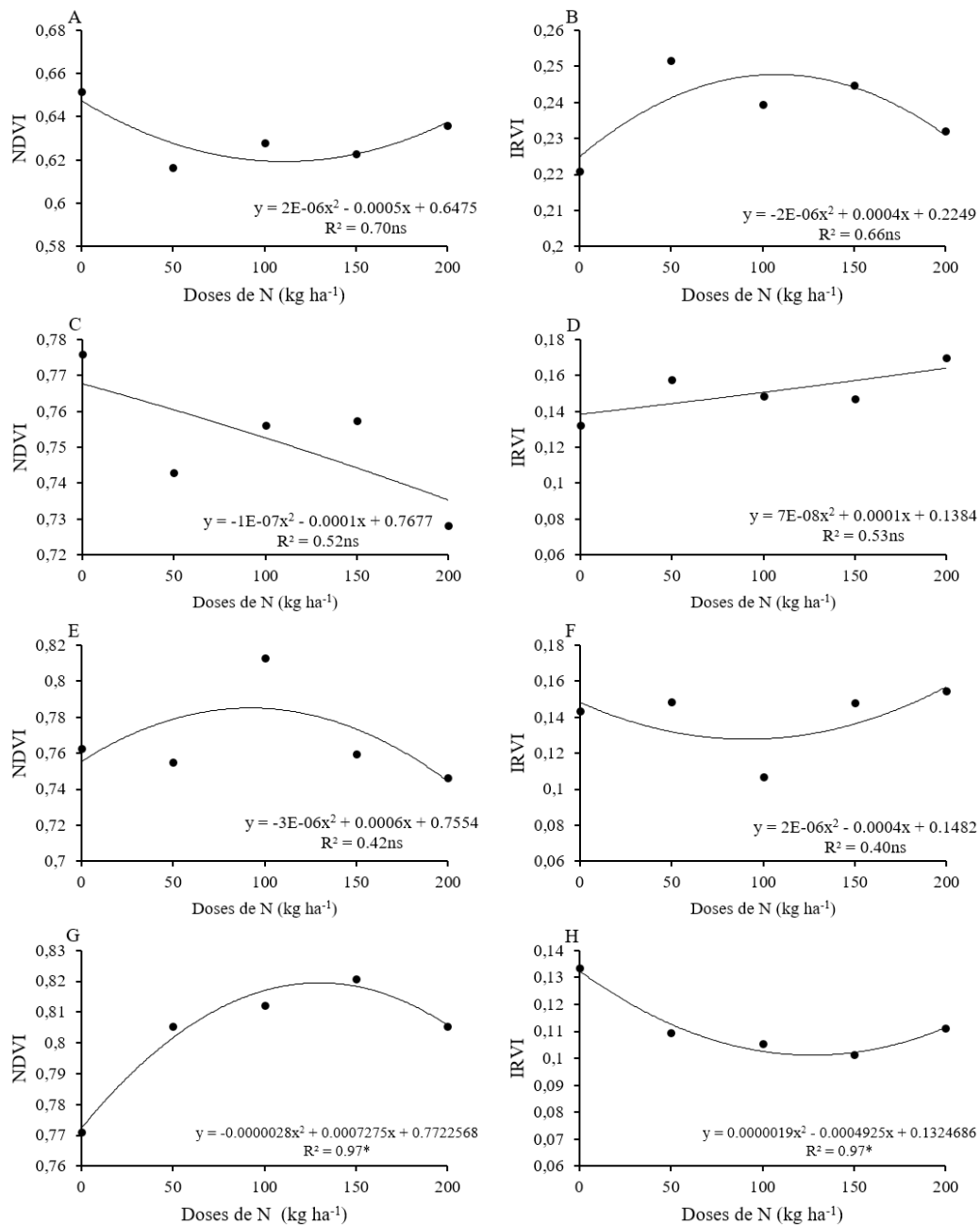
ns – não significativo; *Significativo a 5% de probabilidade; **Significativo a 1% de probabilidade.

Figura 2. Acurácia dos modelos de estimativa da produtividade de grãos do feijoeiro a partir dos índices de vegetação NDVI e IRVI nos estádios fenológicos V_{4,7} (A e B), R₅ (C e D), R₆ (E e F) e R₈ (G e H). PG – produtividade de grãos.

mesmas foram mantidas no campo, e há menor chance de acontecimentos de eventos que levariam à perda de produção das plantas, como déficit hídrico e nutricional, doenças e pragas (Klering et al., 2016). Além disso, em estádios mais iniciais do ciclo, a exigência de recursos pelas plantas é menor, dificultando a detecção da variabilidade pelas plantas nesse momento. Nesse sentido, a cultura do feijoeiro é capaz de absorver nitrogênio mesmo em estádios avançados de seu ciclo (Araújo & Teixeira, 2008), acarretando maior desenvolvimento e correlação com os índices de vegetação.

No presente estudo, a máxima precisão ($R^2 = 0,71$) observada para a estimativa da PG do feijoeiro foi inferior a observada ($R^2 = 0,84$) por Monteiro et al. (2012). No estudo

de Monteiro et al. (2012), a cultivar utilizada foi a Pérola, enquanto que para o presente estudo utilizou-se a cultivar TAA Gol. Essas cultivares se diferenciam quanto ao hábito de crescimento, sendo a primeira de crescimento indeterminado e a segunda de crescimento determinado. Como cultivares de crescimento indeterminado apresentam emissão de novos ramos e folhas após o florescimento (estádio fenológico R₆), isso pode ter levado às maiores precisões no estudo de Monteiro et al. (2012). Como os índices de vegetação apresentam sensibilidade ao aumento de folhas e matéria seca das plantas, cultivares de ciclo indeterminado podem representar maior variação e resposta à doses de N do que cultivares de ciclo determinado. Por outro lado, cultivares



ns – não significativo; *Significativo a 5% de probabilidade.

Figura 3. Variação dos valores de NDVI e IRVI em função das doses de nitrogênio aplicadas em cobertura nos estádios fenológicos V_{4.7} (A e B), R₅ (C e D), R₆ (E e F) e R₈ (G e H).

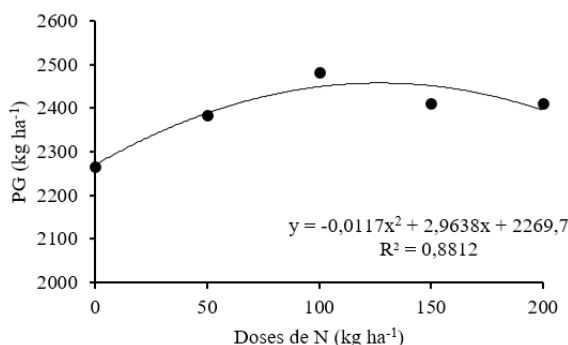


Figura 4. Variação da produtividade de grãos do feijoeiro em função de doses de nitrogênio em cobertura. PG – produtividade de grãos.

de ciclo determinado não emitem folhas e ramos após o florescimento. Além disso, observa-se que o solo da área experimental do presente estudo apresenta historicamente elevada fertilidade, visto as baixas repostas das culturas à adubação nitrogenada (Flôres et al., 2017; Amaral et al., 2018). Assim, a variação de produtividade entre as doses maiores e menores pode ser reduzida, interferindo na precisão dos modelos.

Embora a precisão dos modelos de estimativa da PG do presente estudo não apresentou-se superior quando comparada a outro experimento com feijão (Monteiro et al., 2012), verifica-se que o erro de estimativa foi baixo (RMSE = 160 kg ha⁻¹). Em relação à PG média (2329 kg ha⁻¹) do feijoeiro

no presente estudo, o erro foi de 6,9%. Em outros trabalhos de estimativa da PG das culturas, embora a precisão dos modelos (R^2) foi superior à obtida no presente estudo, o erro médio foi superior, como por exemplo para a aveia-branca, sendo de 9% (Coelho et al., 2018).

Observa-se na literatura que a acurácia de modelos para a estimativa da produtividade de grãos e de biomassa de leguminosas é inferior do que para gramíneas. Coelho et al. (2018), observaram $R^2 > 0,90$ para a estimativa da PG da aveia-branca em função do NDVI e IRVI, enquanto que para trigo e cevada, Grohs et al. (2009) observaram $R^2 > 0,92$ para a estimativa. Para o amendoim, Zerbato et al. (2016) observaram R^2 de 0,60 para a estimativa da produtividade do amendoim e Monteiro et al. (2012) R^2 de 0,84 para o feijão. No presente estudo, a maior precisão obtida para a estimativa da PG do feijoeiro foi de 0,71.

Isso ocorre, pois as respostas das gramíneas aos manejos agrícolas são mais lineares do que para as leguminosas, podendo-se destacar estudos com doses de fertilizantes e lâminas de irrigação. Para as leguminosas, as respostas das plantas aos manejos agrícolas são mais variáveis devido ao processo de fixação biológica do nitrogênio (FBN). Verifica-se que em locais com maior adubação nitrogenada, a eficiência da FBN diminui, ou seja, em tratamentos com menores doses de N a FBN fornecerá maior quantidade de N às plantas do que tratamentos com adubações nitrogenadas em maiores doses (Xavier et al., 2008). Assim, as variações que as leguminosas podem ser submetidas do momento das leituras com índices de vegetação até o final do ciclo das culturas pode interferir mais na acurácia dos modelos de estimativa do que para as gramíneas.

Conclusões

A acurácia da estimativa da produtividade de grãos do feijoeiro por meio de índices de vegetação é maior do que para a produtividade de biomassa. O estágio fenológico com maior acurácia na estimativa das produtividades é o de enchimento de grãos (R8). Os índices de vegetação NDVI e IRVI não apresentam diferenças relevantes na acurácia de estimativa.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de iniciação científica concedida ao primeiro autor.

Literatura Citada

- Abrahão, S.A.; Pinto, F.A.C.; Queiroz, D.M.; Santos, N.T.; Carneiro, J.E.S. Discriminação de teores de nitrogênio e clorofila foliares do feijoeiro por meio de bandas e índices de vegetação espectrais. *Revista Ciência Agronômica*, v.44, n.3, p.464-473, 2013. <http://ccarevista.ufc.br/seer/index.php/ccarevista/article/view/2081/0>. 18 Mar. 2019.
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56). <http://www.fao.org/3/X0490E/X0490E00.htm>. 03 Mar. 2019.
- Alvares, C.A.; Stape, J.L.; Sentelhas, P.C.; Gonçalves, J.L.M.; Sparovek, G. Koppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v.22, n.6, p.711-728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- Amaral, C.B.; Oliveira, G.H.F.; Môro, G.V. Phenotyping open-pollinated maize varieties for environments with low nitrogen availability. *Archives of Agronomy and Soil Science*, v.64, n.10, p.1465-1472, 2018. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1442574>.
- Araújo, A.P.; Teixeira, M.G. Relationships between grain yield and accumulation of biomass, nitrogen and phosphorus in common bean cultivars. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, n.5, p.1977-1986, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500019>.
- Belsley, D.A.; Kuh, E.; Welsch, R.E. Identifying Influential Data and Sources of Collinearity. *Regression Diagnostics*. New York: John Wiley & Sons, 1980. 292p.
- Candiago, S.; Remondino, F.; Giglio, M.; Dubbini, M.; Gatelli, M. Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images. *Remote sensing*, v.7, n.4, p.4026-4047, 2015. <https://doi.org/10.3390/rs70404026>.
- Coelho, A.P.; Rosalen, D.L.; Faria, R.T. Vegetation indices in the prediction of biomass and grain yield of white oat under irrigation levels. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v.48, n.2, p.109-117, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/1983-40632018v48s1523>.
- Companhia Nacional de Abastecimento - Conab. Acompanhamento da safra brasileira - grãos. Brasília: Conab, 2017. 157p. (v. 5 – Safra 2017/18, n. 10 - Décimo levantamento). https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos/item/download/21088_8ca248b277426bb3974f74efa00abab6. 10 Ago. 2018
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3 ed. Brasília, 2013. 353 p.
- Fernández, F.; Gepts, P.; López, M. Etapas de desarrollo en la planta del frijol. In: López, M.; Fernández, F.; Schoonhoven, A. van. Frijol: investigación y producción. Cali: CIAT, 1985, p.61-78.
- Flores, J.D.; Amaral, C.B.; Pinto, C.C.; Mingotte, F.L.C.; Lemos, L.B. Agronomic and qualitative traits of common bean as a function of the straw and nitrogen fertilization. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v.47, n.2, p.195-201, 2017. <https://doi.org/10.1590/1983-40632016v4743979>.
- Ghilani, C. D.; Wolf, P. R. Adjustment computations: spatial data analysis. 4.ed. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2006. 611 p.
- 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. <https://doi.org/10.1590/S0100-6916200900010001>.
- Huang, Y.; Lee, M.A.; Thomson, S.J.; Reddy, K.N. Ground-based hyperspectral remote sensing for weed management in crop production. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, v.9, n.2, p.98-109, 2016. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20160902.2137>.

- Ihuoma, S.O.; Madramootoo, C.A. Recent advances in crop water stress detection. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.141, p.267-275, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.07.026>.
- Klering, E.V.; Fontana, D.C.; Roglio, V.S.; Alves, R.C.M.; Berlatto, M.A. Modelo agrometeorológico-espectral para estimativa da produtividade de grãos de arroz irrigado no Rio Grande do Sul. *Bragantia*, v.75, n.2, p.247-256, 2016. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.287>.
- Machado, E.D.; Bynum, E.D.; Archer, T.L.; Lascano, R.J.; Wilson, L.T.; Bordovsky, J.; Segarra, E.; Bronson, K.; Nesmith, D.M.; Xu, W. Spatial and Temporal Variability of Corn Growth and Grain Yield: Implications for Site-Specific Farming. *Crop Science*, v.42, n.5, p.1564-1576, 2002. <https://doi.org/10.2135/cropsci2002.1564>.
- Monteiro, P.F.C.; Ângulo Filho, R.; Xavier, A.C.; Monteiro, R.O.C. Assessing biophysical variable parameters of bean crop with hyperspectral measurements. *Scientia Agricola*, v.69, n.2, p.87-94, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162012000200001>.
- Mosleh, M.K.; Hassan, Q.K.; Chowdhury, E.H. Application of Remote Sensors in Mapping Rice Area and Forecasting Its Production: A Review. *Sensors*, v.15, n.1, p.769-791, 2015. <https://doi.org/10.3390/s150100769>.
- Oliveira, L.J.C.; Costa, L.C.; Sediya, G.C.; Ferreira, W.P.M.; Oliveira, M.J. Modelos de estimativa de produtividade potencial para as culturas do feijão e do milho. *Engenharia na Agricultura*, v.19, n.4, p.304-312, 2011. <https://doi.org/10.13083/1414-3984.v19n04a03>.
- Raij, B.V.; Andrade, J.C.; Cantarella, H.; Quaggio, J.A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. 1.ed. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas; 2001. 285p.
- Richetti, A.; Ito, M. A. Viabilidade econômica da cultura do feijão-comum, safra da seca 2016, em Mato Grosso do Sul. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2015. (Embrapa Agropecuária Oeste. Comunicado Técnico, 208). <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/139275/1/COT2015208-CPAO.pdf>. 17 Mar. 2019.
- Rissini, A.L.D.; Kawakami, J.; Genu, A.M. Índice de vegetação por diferença normalizada e produtividade de cultivares de trigo submetidas a doses de nitrogênio. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.39, n.6, p.1703-1713, 2015. <https://doi.org/10.1590/0100683rbc20140686>.
- Santos, G.O.; Rosalen, D.L.; Faria, R.T.D. Use of active optical sensor in the characteristics analysis of the fertigated brachiaria with treated sewage. *Engenharia Agrícola*, v.37, n.6, p.1213-1221, 2017. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v37n6p1213-1221/2017>.
- Soratto, R.P.; Fernandes, A.M.; Santos, L.A.; Job, A.L.G. Nutrient extraction and exportation by common bean cultivars under different fertilization levels: I-macronutrients. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.37, n.4, p.1027-1042, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000400020>.
- Toureiro, C.; Serralheiro, R.; Shahidian, S.; Sousa, A. Irrigation management with remote sensing: Evaluating irrigation requirement for maize under Mediterranean climate condition. *Agricultural Water Management*, v.184, p.211-220, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.02.010>.
- Viero, F.; Bayer, C.; Vieira, R.C.B.; Carniel, E. Management of irrigation and nitrogen fertilizers to reduce ammonia volatilization. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.39, n.6, p.1737-1743, 2015. <https://doi.org/10.1590/0100683rbc20150132>.
- Xavier, T.F.; Araújo, A.S.F.; Santos, V.B.; Campos, F.L. Inoculação e adubação nitrogenada sobre a nodulação e a produtividade de grãos de feijão-caupi. *Ciência Rural*, v.38, n.7, p.2037-2041, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782008000700038>.
- Zarco-Tejada, P.J.; González-Dugo, V.; Williams, L.E.; Suárez, L. Berni, J.A.J.; Golshamer, D.; Fereres, E. A PRI-based water stress index combining structural and chlorophyll effects: Assessment using diurnal narrow-band airborne imagery and the CWSI thermal index. *Remote Sensing of Environment*, v.138, p.38-50, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.07.024>.
- Zerbato, C.; Rosalen, D.L.; Furlani, C.E.A.; Deghaid, J.; Voltarelli, M.A. Agronomic characteristics associated with the normalized difference vegetation index (NDVI) in the peanut crop. *Australian Journal of Crop Science*, v.10, n.5, p.758-764, 2016. <https://doi.org/10.21475/ajcs.2016.10.05.p7167>.
- Zhao, B.; Duan, A.; Karim, S.T.; Liu, Z.; Chen, Z.; Gong, Z.; Zhang, J.; Xiao, J.; Liu, Z.; Qin, A.; Ning, D. Exploring new spectral bands and vegetation indices for estimating nitrogen nutrition index of summer maize. *European Journal of Agronomy*, v.93, p.113-125, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.12.006>.