

ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE CULTURA DO FEIJÃO-COMUM UTILIZANDO ÍNDICES ESPECTRAIS

ANDERSON PRATES COELHO¹, ROGÉRIO TEIXEIRA DE FARIA², ALEXANDRE
BARCELLOS DALRI³, LUIZ FABIANO PALARETTI⁴, LEANDRO BORGES
LEMOS⁵, DAVID LUCIANO ROSALEN⁶

¹ Eng. Agrônomo, Prof. Dr. Depto Engenharia e Ciências Exatas, Unesp/FCAV, Jaboticabal - SP, anderson.coelho@unesp.br

² Eng. Agrônomo, Prof. Dr. Depto de Engenharia e Ciências Exatas, Unesp/FCAV, Jaboticabal, SP.

³ Eng. Agrícola, Prof. Dr. Depto de Engenharia e Ciências Exatas, Unesp/FCAV, Jaboticabal, SP.

⁴ Eng. Agrônomo, Prof. Dr. Depto de Engenharia e Ciências Exatas, Unesp/FCAV, Jaboticabal, SP.

⁵ Eng. Agrônomo, Prof. Dr. Depto de Ciências da Produção Agrícola, Unesp/FCAV, Jaboticabal, SP.

⁶ Eng. Agrônomo, Prof. Dr. Depto de Engenharia e Ciências exatas, Unesp/FCAV, Jaboticabal, SP.

Apresentado no
LII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2023
18 a 21 de outubro de 2023 – Ribeirão Preto - SP, Brasil

RESUMO: Objetivou-se estimar o coeficiente de cultura (K_c) do feijão-comum a partir do índice de vegetação NDVI e da fração de cobertura do solo (FC), obtida por aplicativo mobile, e verificar o índice que promoveu a maior acurácia de estimativa. O experimento foi realizado nos anos de 2019 e 2020, utilizando as cultivares de feijão-comum IAC Imperador e IPR Campos Gerais. As cultivares foram irrigadas para suprir 100% da necessidade hídrica das plantas. A determinação do NDVI e FC foi realizada nos estádios fenológicos V_{4-7} , R_5 , R_6 , R_7 , R_8 e R_9 . Com base nas datas de avaliação e nos respectivos valores de K_c , foram estabelecidas regressões para estimar o K_c do feijão-comum a partir do NDVI e FC. Posteriormente, o ciclo das cultivares, em dias, foi adicionado como variável independente para melhorar a acurácia de estimativa. Foi possível estimar o K_c do feijão-comum a partir do NDVI. A inclusão do ciclo das cultivares, como variável independente, associado ao NDVI e FC permitiu estimar com elevada precisão ($R^2 > 0,80$) o K_c do feijão-comum. Esses resultados demonstram o potencial de uso de técnicas de agricultura digital na estimativa do K_c das culturas para auxiliar manejos de irrigação em taxa variável.

PALAVRAS-CHAVE: fração de cobertura, irrigação de precisão, NDVI

COMMON BEAN CROP COEFFICIENT PREDICTION USING SPECTRAL INDICES

ABSTRACT: The objective was to estimate the common bean crop coefficient (K_c) from the NDVI and the canopy cover fraction (CF), obtained by mobile app, and to verify the index that promoted the highest estimation accuracy. The experiment was carried out in 2019 and 2020, using common bean cultivars IAC Imperador and IPR Campos Gerais. The cultivars were irrigated to supply 100% of the water needs. The determination of NDVI and FC was carried out in the phenological stages V_{4-7} , R_5 , R_6 , R_7 , R_8 and R_9 . Based on the evaluation dates and the respective K_c values, regressions were established to estimate the common bean K_c from the NDVI and FC. Subsequently, the cultivar cycle, in days, was added as an independent variable to improve the estimation accuracy. It was possible to estimate the common bean K_c from the NDVI. The inclusion of the cultivar cycle, as an independent variable, associated with the NDVI and CF allowed estimating with high precision ($R^2 > 0.80$) the common bean K_c . These results demonstrate the potential of using digital agriculture techniques to estimate the K_c to support variable rate irrigation management.

KEYWORDS: cover fraction, precision irrigation, NDVI

INTRODUÇÃO: Diversos índices de vegetação podem ser utilizados para identificar indiretamente o estado fisiológico das plantas, destacando-se o NDVI. A variabilidade temporal deste índice acompanha o crescimento das plantas. Inicialmente as áreas apresentam valores baixos que, posteriormente, crescem em taxas pequenas, seguido por um crescimento linear, acompanhado por uma estabilização e um decréscimo (OLIVEIRA et al., 2016; CARNEIRO et al., 2020). Semelhante aos índices de vegetação, existem aplicativos que indicam indiretamente o estado fisiológico da cultura, medindo a taxa de cobertura do solo pelo dossel da cultura (PATRIGNANI & OCHSNER, 2015). Assim como nos índices comentados anteriormente, o coeficiente de cultura (K_c) possui uma variação semelhante. De acordo com ALLEN et al. (1998), o K_c inicial das culturas apresenta um valor pequeno, seguido por um incremento linear, que é acompanhado por uma estabilização e por um decréscimo. Esse padrão semelhante de variação temporal dos índices espectrais com o K_c pode tornar viável a estimativa do K_c para fins de manejo de irrigação a partir desses índices (OLIVEIRA et al., 2016). Uma das possíveis aplicações destes índices para o manejo da irrigação é a estimativa em tempo real do K_c . Em locais mais restritivos, as plantas irão crescer menos e o K_c será inferior às áreas sem restrições, afetando a demanda hídrica. Nesses locais, o menor ou o maior crescimento das plantas poderão ser verificados pela variação dos índices. Objetivou-se estimar o coeficiente de cultura (K_c) do feijão-comum a partir do índice de vegetação NDVI e da fração de cobertura do solo, obtida por aplicativo mobile, e verificar o índice que promoveu a maior acurácia de estimativa.

MATERIAL E MÉTODOS: O experimento foi conduzido na safra de inverno dos anos 2019 e 2020 na Unesp, FCAV, Jaboticabal, São Paulo, próximo às coordenadas de latitude 21°14'44" S, longitude 48°17'00" W e altitude de 545 metros. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw, tropical, com inverno seco, chuvas no verão, apresentando temperatura média anual de 22 °C e precipitação anual normal de 1.425 mm. O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho eutrófico (SANTOS et al., 2018). A semeadura do feijão em 2019 foi realizada em 07 de maio e no ano de 2020 em 18 de maio. Foram utilizadas duas cultivares do grupo comercial carioca com tipos de crescimento contrastantes, sendo a cultivar IAC Imperador (crescimento determinado) e a cultivar IPR Campos Gerais (crescimento indeterminado). As cultivares foram semeadas mecanicamente para a obtenção da densidade de 240.000 plantas por hectare, no espaçamento de 0,45 m entre linhas. A semeadura foi realizada em área anteriormente cultivada com milho. A adubação de semeadura foi na dose de 200 kg ha⁻¹ do formulado 04-20-20. A adubação de cobertura foi realizada no estádio V₄₋₃, caracterizado pelo terceiro trifólio completamente expandido, utilizando-se 100 kg ha⁻¹ de N nos dois anos, tendo como fonte a ureia (AMBROSANO et al., 1997). A adubação de cobertura foi realizada em filete contínuo a 0,10 m da linha de semeadura. Foram definidas 4 parcelas na área experimental para as avaliações do índice de vegetação NDVI e fração de cobertura do solo. As parcelas apresentaram 15 linhas de feijão-comum por 2,4 m de comprimento cada, utilizando as 8 linhas centrais como parcela útil. O manejo da irrigação foi realizado com base na demanda hídrica da cultura, fornecendo 100% da necessidade hídrica da cultura, de acordo com o método FAO 56. A irrigação foi acionada quando o déficit hídrico acumulado na área fosse igual a água facilmente disponível (AFD) do solo, de 18 mm. Essa lâmina foi calculada em função dos atributos físicos do solo, determinados em laboratório, e da cultura do feijão-comum. Para o cálculo da AFD foi considerada uma profundidade efetiva de raízes de 0,25 m e fator de disponibilidade de água no solo de 0,40 (ALLEN et al., 1998). Os valores de K_c inicial ($K_{c_{ini}}$), K_c de meia estação ($K_{c_{med}}$) e K_c final (K_{c_f}) para o feijão-comum foram de 0,40; 1,15 e 0,35, respectivamente (ALLEN et al., 1998). O K_c do estágio de desenvolvimento inicial

(estágio I = $K_{c_{ini}}$) foi utilizado quando a cultura apresentou até 10% do seu desenvolvimento vegetativo máximo. No estágio II, quando a cultura apresentou de 10 a 80% do desenvolvimento vegetativo máximo, os valores de K_c foram interpolados diariamente, tendo como início o $K_{c_{ini}}$ e o final o $K_{c_{med}}$. No estágio de desenvolvimento III, quando a cultura apresentou de 80 a 100% do desenvolvimento vegetativo máximo, foram utilizados os valores de $K_{c_{med}}$. No estágio de desenvolvimento IV, quando a cultura estava na fase de maturação dos grãos, os valores de K_c foram interpolados diariamente, tendo como início o $K_{c_{med}}$ e o final o K_{c_f} . Esses valores foram definidos temporalmente de acordo com o acompanhamento do desenvolvimento da cultura em campo. Além disso, a interpolação destes valores ao longo do ciclo foi baseada em estudos anteriores sobre manejo de irrigação realizados na área experimental com as duas cultivares. A determinação do índice de vegetação NDVI, bem como a fração de cobertura do solo foi realizada nos estádios fenológicos V₄₋₇, R₅, R₆, R₇, R₈ e R₉. O índice de vegetação NDVI foi determinado utilizando o sensor terrestre óptico ativo GreenSeeker HandHeld™. A fração de cobertura (FC) do solo foi determinada pelo aplicativo mobile Canopeo® (PATRIGNANI & OCHSNER, 2015). De posse dos dados dos índices, foram ajustadas regressões polinomiais para estimar o K_c do feijão-comum a partir do NDVI e da FC, conforme realizado por DINGRE et al. (2021). Para isso, os valores tabelados de K_c foram associados aos valores de NDVI e FC. Utilizou-se os valores de K_c das duas cultivares, associado aos respectivos índices espectrais (NDVI e FC) na data de avaliação, para calibrar um único modelo de estimativa para cada índice. Para melhorar a acurácia de estimativa do K_c , calibrou-se também regressões múltiplas, estimando o K_c a partir dos índices espectrais mais o ciclo (em dias) das cultivares.

RESULTADOS E DISCUSSÃO: A estimativa do K_c do feijão-comum foi significativa ($p < 0,01$) quando se utilizou o NDVI (Figura 1A), enquanto a partir da FC o modelo não foi significativo (Figura 1B). A precisão do modelo a partir do NDVI foi de 42%.

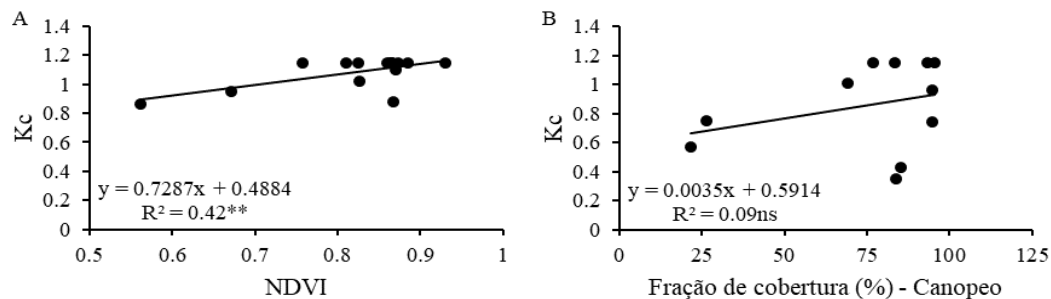


FIGURA 1. Estimativa do coeficiente de cultura (K_c) do feijão-comum em função do NDVI (A) e da fração de cobertura do solo pelo dossel da cultura (B). $^{**}p < 0.01$; ns: não significativo

Quando a estimativa do K_c foi através de regressão múltipla, ou seja, a partir da associação dos valores de NDVI e da quantidade de dias do ciclo, a precisão passou para 84% (Figura 2A). O mesmo pode ser observado para a estimativa do K_c a partir somente da FC e da associação da FC e dias após a emergência (Figura 2B). Enquanto na primeira situação o modelo não foi significativo, na segunda situação a precisão foi de 93%, superior ao encontrado para a estimativa a partir do NDVI. Isso ocorre, pois, no final do ciclo da cultura a redução nos valores de NDVI não é na mesma proporção da redução nos valores de K_c , conforme observado por DINGRE et al. (2021). Dessa maneira, os valores de K_c no final do ciclo da cultura são superestimados quando se considera somente os índices individuais. Nessa fase, os índices não conseguem capturar as reduções na capacidade fisiológica da planta. Ao final do ciclo, as plantas apresentam uma área foliar considerável, mas sua capacidade fisiológica está em senescência. Essa característica interfere na capacidade dos índices em detectar a redução na capacidade fisiológica das plantas, especialmente para o

NDVI, um índice que é conhecido por sua tendência de saturação em condições de elevada biomassa (CARNEIRO et al., 2020; COELHO, 2022). Esse problema do modelo pode ser corrigido pela adição dos dias de ciclo, ou pelo acúmulo de graus-dia do feijão-comum, como uma variável independente, conforme verificado aqui. A inclusão do ciclo como uma variável independente permite ao modelo identificar que a partir de determinada data, ou soma térmica, a redução nos valores de Kc em função do NDVI e FC serão mais intensas.

$$Kc = -0.8804 + 0.0414 * x + 2.6452 * y - 0.0002 * x * x - 0.025 * x * y - 0.9185 * y * y \quad Kc = 0.022 + 0.0321 * x + 0.0087 * y - 0.0004 * x * x + 7.6226E-5 * x * y - 7.77E-5 * y * y$$

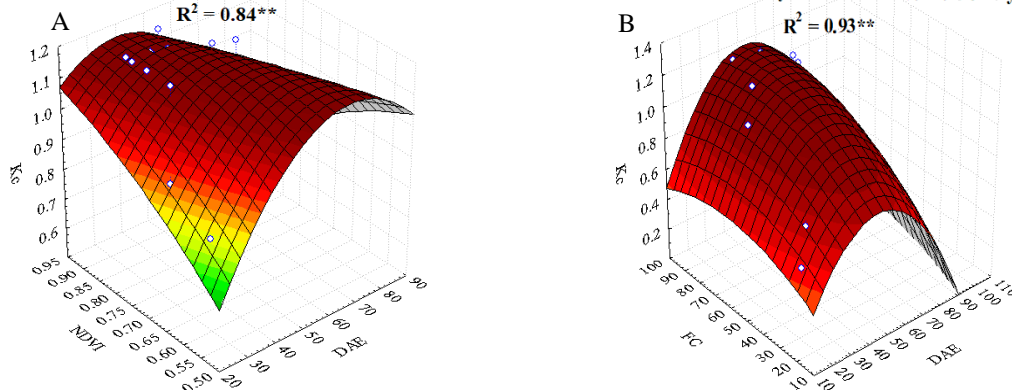


FIGURA 2. Estimativa do Kc em função do NDVI (A) e da fração de cobertura (FC - B) associados ao ciclo, em dias após a emergência (DAE). **p<0.01

CONCLUSÕES: Foi possível estimar o Kc do feijão-comum a partir do índice de vegetação NDVI. A inclusão do ciclo das cultivares, como variável independente, associado ao NDVI e FC, permitiu estimar com elevada precisão ($R^2 > 0,80$) o Kc do feijão-comum.

AGRADECIMENTOS: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo número 2018/17363-2.

REFERÊNCIAS: ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements.** United Nations Food and Agriculture Organization (FAO) - Irrigation and drainage paper 56, Rome, 1998.

AMBROSANO, E. J. et al. Feijão. In: RAIJ, B. V. et al. (Eds.) **Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo.** 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 1997. p. 194-195 (Boletim técnico, 100).

CARNEIRO, F. M. et al. Comparison between vegetation indices for detecting spatial and temporal variabilities in soybean crop using canopy sensors. **Precision Agriculture**, v. 21, n. 5, p. 979-1007, 2020.

COELHO, A. P. **Agronomic performance of common bean cultivars under irrigation levels assessed by spectral indices and modeling.** Tese de doutorado (Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal), 2022. 213p.

DINGRE, S. K.; GORANTIWAR, S. D.; KADAM, S. A. Correlating the field water balance derived crop coefficient (Kc) and canopy reflectance-based NDVI for irrigated sugarcane. **Precision Agriculture**, v. 22, n. 4, p. 1134-1153, 2021.

OLIVEIRA, T. C. de; FERREIRA, E.; DANTAS, A. A. A. Temporal variation of normalized difference vegetation index (NDVI) and calculation of the crop coefficient (Kc) from NDVI in areas cultivated with irrigated soybean. **Ciência Rural**, v. 46, p. 1683-1688, 2016.

PATRIGNANI, A.; OCHSNER, T. E. Canopeo: A powerful new tool for measuring fractional green canopy cover. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 6, p. 2312-2320, 2015.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.