

Coeficientes de cultura e consumo hídrico nas diferentes fases fenológicas do milho irrigado

Water consumption and crop coefficients in different phenological phases of irrigated corn

Gustavo Henrique Braga Teles Menezes¹; Leonardo França da Silva^{2*}; Donizete dos Reis Pereira¹; José Rafael Franco³; Josiane Rosa Silva de Oliveira¹; Cristiano Marcio Alves de Souza²; Ariadna Vieira Faria⁴; Denis Medina Guedes¹; Luciano José Minette¹

¹ Universidade Federal de Viçosa (UFV) – Minas Gerais – Brasil;

² Universidade Federal de Grande Dourado (UFGD) – Mato Grosso do Sul – Brasil;

³ Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP) – São Paulo – Brasil;

⁴ Universidade Estadual do Piauí – (UESPI) – Piauí – Brasil;

*Autor correspondente. E-mail: leonardo.silva@ufv.br

Recebido: 27/12/2024; Aceito: 01/04/2025

RESUMO

A produção de milho otimizada requer ajustes em fatores como a disponibilidade hídrica. Em cultivos irrigados, determinar as necessidades hídricas da cultura é essencial para manejar a irrigação. Este estudo determinou os coeficientes de cultivo (Kc) e o consumo hídrico do milho irrigado em diferentes estádios fenológicos. O experimento foi realizado no Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Viçosa – Campus Florestal, entre outubro de 2020 e março de 2021, o experimento utilizou a variedade híbrida BM 855 VT PRO2 com 60.000 plantas por hectare. Foram instalados 21 tensiômetros para monitorar a umidade do solo, ajustada à capacidade de campo via aspersão convencional. O balanço hídrico revelou consumo de 467,3 mm em 118 dias: 127,3 mm na fase inicial, 154,6 mm na vegetativa, 139,2 mm no florescimento e enchimento de grãos e 46,2 mm na fase de maturação. Os Kc médios foram 1,07 (VE-V3), 0,8 (V6-V12), 1,9 (V15-R3) e 0,9 (R4-R6).

Palavras-chave: Consumo Hídrico; Irrigação; Milho.

ABSTRACT

Optimized maize production requires adjustments to factors such as water availability. In irrigated crops, determining the crop's water needs is essential for managing irrigation. This study determined the crop coefficients (Kc) and water consumption of irrigated maize at different phenological stages. The experiment was carried out at the Institute of Agrarian Sciences of the Federal University of Viçosa - Florestal Campus, between October 2020 and March 2021, using the hybrid variety BM 855 VT PRO2 with 60,000 plants per hectare. 21 tensiometers were installed to monitor soil moisture, adjusted to field capacity via conventional sprinkling. The water balance revealed consumption of 467,3 mm in 118 days: 127.3 mm in the initial phase, 154,6 mm in the vegetative phase, 139,2 mm in flowering and in grain filling and 46,2 mm in maturation phase. The average Kc was 1.07 (VE-V3), 0.8 (V6-V12), 1.9 (V15-R3) and 0.9 (R4-R6).

Keywords: Water Consumption; Irrigation; Corn.

INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é uma das principais culturas do agronegócio brasileiro. Segundo a Conab, a produção nacional na safra 2024/25 deve atingir 119,6 milhões de toneladas, um aumento de 3,3% em relação à safra anterior. Apesar desse crescimento, as exportações devem cair para 34 milhões de toneladas devido à redução da oferta. O consumo interno está estimado em 86,4 milhões de toneladas, mantendo o Brasil como o segundo maior produtor e exportador global, atrás dos Estados Unidos (CONAB, 2022).

O Brasil tem ganhado relevância no mercado internacional de milho devido ao aumento da demanda impulsionado pelo crescimento populacional (Soluguren, 2015). Entretanto, a produtividade da cultura é afetada pela irregularidade na distribuição das chuvas, tornando a irrigação um fator essencial para garantir a estabilidade da produção (Rodrigues e Zaccaria, 2020). Nesse contexto, a agricultura irrigada deve ser eficiente e sustentável para atender às crescentes demandas globais por alimentos.

A sustentabilidade na agricultura irrigada depende do uso racional da água, que exige um manejo adequado da irrigação para suprir, sem exceder, as necessidades hídricas da cultura (Mantovani *et al.*, 2009). Para estimar a quantidade de água a ser aplicada, é amplamente utilizada a metodologia descrita pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations Irrigation and Drainage Paper 56* (FAO-56) (Allen *et al.*, 1998). Essa metodologia calcula a evapotranspiração da cultura (ETc) como o produto entre a evapotranspiração de referência (ETo) e um coeficiente de cultura (Kc).

A ETc está diretamente relacionada à demanda energética da atmosfera, ao conteúdo de água no solo e à resistência da planta à perda de água para o ambiente (Mantovani *et al.*, 2009). Essa variável é geralmente determinada por técnicas de balanço hídrico no solo, seja em lisímetros ou em campo, por meio da medição precisa da precipitação, da irrigação aplicada e das variações no teor de umidade do solo (Silva *et al.*, 2012; Souza *et al.*, 2015; Trout; Dejonge, 2018).

Originalmente, a ETo era definida para gramíneas como grama ou alfafa cultivadas em extensas áreas, com pleno desenvolvimento vegetativo e suprimento hídrico adequado. Atualmente, a definição mais aceita refere-se a uma cultura hipotética padronizada, semelhante à grama de altura fixa (0,12 m), cujos parâmetros foram estabelecidos pela FAO no modelo de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998). O coeficiente de cultura (Kc), que representa a relação ETc/ETo, varia de acordo com a espécie, idade, área foliar, altura e manejo da cultura. Embora a FAO-56 forneça valores médios de Kc baseados em dados globais, esses valores podem sofrer variações significativas conforme as condições climáticas locais (Bastos *et al.*, 2008; Ribeiro *et al.*, 2009).

Diante dessas variações, diversos estudos têm sido conduzidos para determinar Kc em condições de campo, buscando otimizar o uso da água na agricultura. No caso do milho, trabalhos como os de Bezerra e Oliveira (1999), Carvalho *et al.* (2006), Gao (2009), Souza *et al.* (2015) e Trout e DeJonge (2018) relatam medições do coeficiente de cultura. No entanto, grande parte dessas pesquisas considera o ciclo da cultura dividido em apenas quatro fases, o que pode não representar com precisão a variação do consumo hídrico ao longo do desenvolvimento da planta. Dessa forma, torna-se necessário aprofundar os estudos para determinar o consumo hídrico do milho com base nos diferentes estádios fenológicos da cultura.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi determinar os coeficientes de cultura e o consumo hídrico do milho irrigado em seus diferentes estádios fenológicos, calcular o balanço hídrico e estabelecer coeficientes de cultura ao longo do ciclo de desenvolvimento da planta.

MATERIAL E MÉTODOS

Área experimental

O experimento foi conduzido na área experimental do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Viçosa, campus Florestal, em Florestal-MG, cuja coordenadas são 19°52'27" S, 44°25'06" W. O clima da região é classificado, segundo Köppen (1936) como Aw, tropical com estação seca coincidindo com o inverno, onde a média da precipitação e da temperatura no mês mais seco são, respectivamente, inferiores a 60 mm e superiores a 18 °C (Martins *et al.*, 2018). O solo da área experimental é classificado como Argissolo vermelho-amarelo, conforme a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo SBCS (EMBRAPA, 2018), cujas características químicas podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados obtidos em análise de solo na profundidade de 20 cm

| pH | P | Ca | Mg | Al | H+Al | SB | T | t | V | | |
|--------------------|------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|
| H ₂ O | K | cmolc/dm ³ | | | | | | | m | | |
| mg/dm ³ | | | | | | | | | % | | |
| 5,38 | 5,70 | 84,00 | 2,14 | 0,55 | 0,20 | 5,50 | 2,91 | 3,11 | 8,41 | 34,60 | 6,40 |

Nota: pH em água (1:2,5); Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺: extrator KCl 1 mol L⁻¹; K⁺ e P: extrator mehlich⁻¹; H+Al: extrator SMP; M.O.: matéria orgânica – oxidação Na₂Cr₂O₇ 4N + H₂SO₄ 10N; S: soma de bases trocáveis; t: capacidade de troca catiônica (CTC) efetiva; T: CTC a pH 7,0; V: índice de saturação por bases; m: índice de saturação por alumínio.

Plantio e manejo da cultura

O plantio na área experimental foi realizado com o milho híbrido BM 855 VT PRO2, que é classificado por Pegoraro (2019), como um híbrido simples, de ciclo precoce e adaptado às condições de clima subtropical. Apresenta grão alaranjado e semidentado, altura de inserção da primeira espiga de 1,45 m e altura da planta de 2,65 m, desenvolvido para produção de grãos, silagem de planta inteira e de grão úmido.

O plantio ocorreu na segunda quinzena do mês de outubro de 2020, no espaçamento entre fileiras de 0,5 m, obtendo-se uma população de 60.000 plantas por hectare, após desbaste realizado em V3. Tratos culturais como manejo de plantas daninhas e controle fitossanitário, assim como calagem e adubações de semeadura e de cobertura foram realizados de acordo com as recomendações técnicas para a cultura e em função da análise de solo (Tabela 1).

O plantio foi realizada no sistema de plantio direto, após dessecação química, mantendo-se os resíduos do cultivo anterior, para minimizar os efeitos do escoamento superficial (provenientes das precipitações) e da evaporação da água do solo, e, também, para proporcionar melhor infiltração e retenção de água no solo.

A adubação de semeadura foi definida em 400 kg/ha da formulação 08-28-16, aplicados no sulco de plantio. A adubação nitrogenada foi reforçada em V4, aos 26 dias após a emergência (DAE), com 300 kg/ha de sulfato de amônio, aplicados a lanço. Ainda em V4 foi realizado o controle de plantas daninhas com o herbicida na dosagem de 3 L/ha.

Irrigação da lavoura

A cultura do milho foi irrigada para se atingir condições potenciais de produtividade. A irrigação foi realizada por aspersão convencional, por meio de três linhas espaçadas de 12 m entre si, contendo cinco aspersores modelo MIDI SETORIAL 101 por linha, também espaçados de 12 m. O manejo da irrigação, foi realizado com o uso do Irrigâmetro (Oliveira *et al.*, 2008), instalado aproximadamente a 500 m da área experimental. Esse equipamento (Figura 1), a partir de réguas de manejo, indica a lâmina e o tempo de irrigação a ser aplicada para atender à demanda hídrica da cultura.

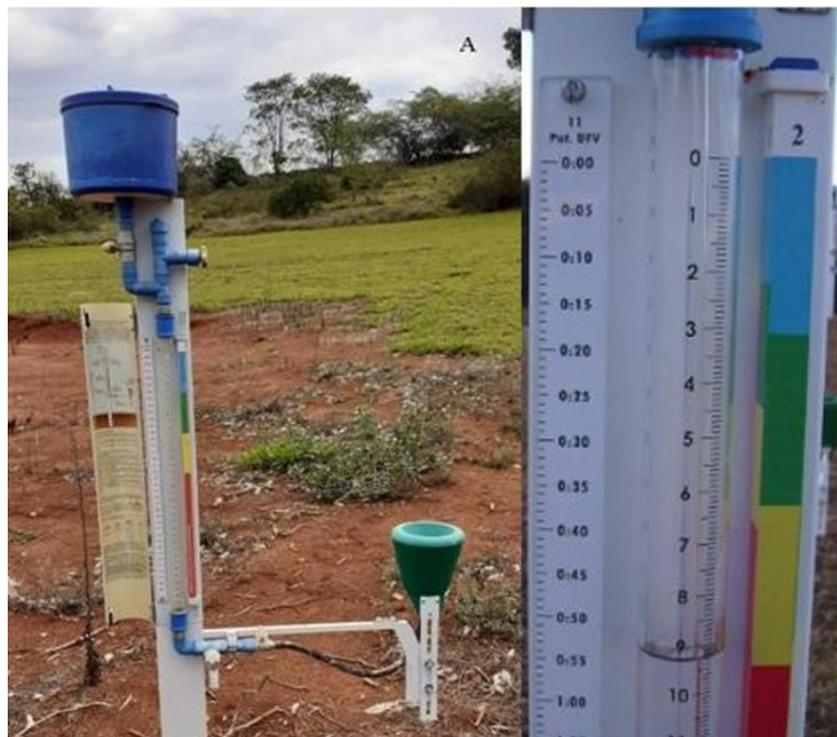


Figura 1. Irrigâmetro usado no manejo da água de irrigação do milho irrigado por aspersão convencional. No detalhe, a indicação da lâmina evapotranspirada (9,2 mm), o tempo de irrigação (55 minutos) e o momento de irrigar (faixa amarela), Universidade Federal de Viçosa – Campus Florestal (2019/2020).

Monitoramento da umidade do solo

A umidade do solo foi monitorada por tensiômetros analógicos hidrosense HID39, instalados em sete pontos aleatórios na área de cultivo, nas profundidades de 0,15, 0,30 e 0,45 m (Figura 2). As leituras de tensão da água no solo foram realizadas em intervalos de 2 a 4 dias, imediatamente anteriores a cada irrigação. As leituras dos tensiômetros foram então convertidas para umidade por meio de curvas características de retenção de água no solo (CRA), previamente determinadas no Laboratório de Água e Solo do Departamento de Engenharia Agrícola do Campus UFV - Viçosa.

Para a determinação dessas curvas, amostras deformadas de solo foram coletadas em cada ponto e profundidade de instalação dos tensiômetros e enviadas ao Laboratório de Água e Solo onde foram submetidas às tensões de -0,01, -10, -30, -50, -100, -300 e -1500 kPa em Extrator de Richards, obtendo-se sete pares de valores de tensão e umidade. Com base neles, foram construídas as curvas que permitiram converter os dados de tensão em umidade volumétrica. Ressalta-se que a umidade monitorada pelos tensiômetros instalados a 0,15, 0,30 e 0,45 m de profundidade representaram a umidade na camada de 0 a 0,20, 0,20 a 0,40 e 0,40 a 0,60 m, respectivamente, para fins do cálculo do armazenamento de água no solo.

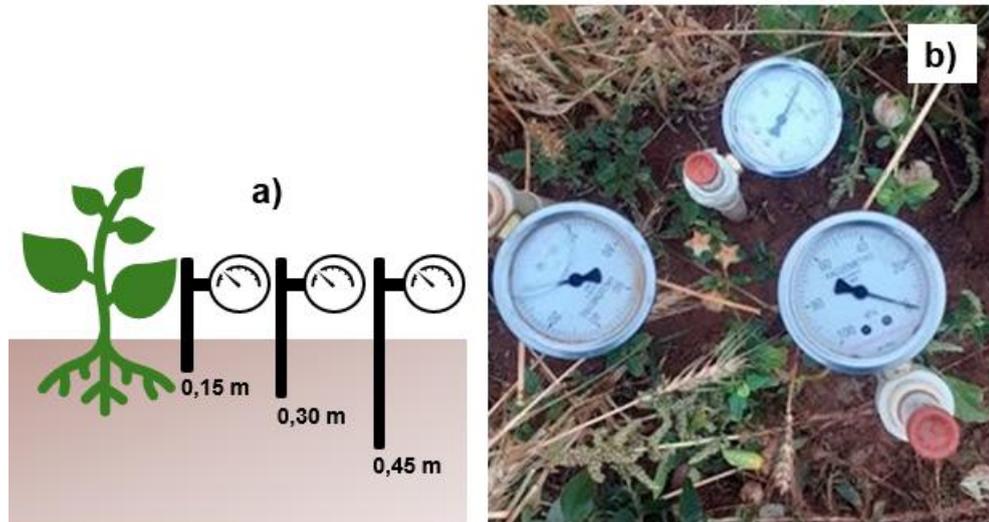


Figura 2. Esquema demonstrativo de instalação dos tensiômetros nas diferentes profundidades (a) e tensiômetros já em campo no local de condução do experimento (b).

Determinação do balanço hídrico e dos coeficientes da cultura

O consumo hídrico e os coeficientes da cultura do milho foram determinados por meio de balanço hídrico, que contabilizou as entradas e saídas de água do sistema. No caso, baseou-se no volume de solo explorado pelo sistema radicular da cultura do milho, correspondente a 0,5 m (Mantovani *et al.*, 2009; Souza *et al.*, 2015). O balanço hídrico foi descrito pela equação 1:

$$\Delta A = P + I + A_c - ET_c - E_{sup} \quad (1)$$

em que ΔA é a variação de armazenamento de água no solo (mm); P é o total precipitado (mm); I é a lâmina de irrigação (mm); A_c é a ascensão capilar (mm); ET_c é a evapotranspiração da cultura (mm) e E_{sup} é o escoamento superficial.

A A_c foi assumida como sendo igual a zero devido ao lençol freático estar a uma profundidade considerável abaixo da superfície do solo, maior que 5 m (Trout e DeJonge, 2018). O E_{sup} também foi considerado igual à zero, devido ao milho ser cultivado em sistema de plantio direto, com manutenção de resíduos sobre a superfície do solo, a declividade da área de estudo ser relativamente pequena e o solo ter uma infiltração adequada. Ressalta-se que essas premissas também foram adotadas em outros estudos (Pereira *et al.*, 2010; Souza *et al.*, 2015; Trout e DeJonge, 2018). Assim, para este estudo, a ET_c foi estimada rearranjando a equação (1) como:

$$ET_c = P + I - D_p - \Delta A \quad (2)$$

O total precipitado (P , mm) foi obtido com base na aferição do pluviômetro instalado próximo ao irrigâmetro. Quando em condições impeditivas a coleta destes valores, como o excesso de pluviosidade, a precipitação pode ser obtida com base nos dados da estação meteorológica localizada no Campus universitário UFV - Florestal. A determinação da lâmina de irrigação (I , mm) a ser repostada no sistema solo-planta, foi definida com base no irrigâmetro e suas régua de manejo, ajustadas com base no estágio fenológico da cultura e na demanda evapotranspiratória da planta.

A D_p foi determinada com base na porosidade drenável das camadas monitoradas, conforme Mello *et al.* (2008) e Pereira *et al.* (2010):

$$Dp_{(i)}(\text{mm}) = (\bar{\theta}_{0-20} - \theta_{cc}) * 200 + (\bar{\theta}_{20-40} - \theta_{cc}) * 200 + (\bar{\theta}_{40-50} - \theta_{cc}) * 100 \quad (3)$$

$$Dp(\text{mm}) = \frac{Dp_{(i+1)} + Dp_{(i)}}{2} \quad (4)$$

em que $\bar{\theta}_{0-20}$, $\bar{\theta}_{20-40}$ e $\bar{\theta}_{40-50}$ são as umidades médias ($\text{cm}^{-3} \text{cm}^{-3}$) das camadas de 0 a 20 cm, 20 a 40 cm e 40 a 50 cm, respectivamente; θ_{cc} é a umidade corresponde à capacidade de campo ($\text{cm}^{-3} \text{cm}^{-3}$); $Dp_{(i+1)}$ e $Dp_{(i)}$ são as percolações profundas (mm) para duas leituras consecutivas da umidade do solo. A umidade na capacidade de campo foi estimada pelo ponto de inflexão, segundo Dexter (2004).

A variação no armazenamento de água no solo (ΔA) foi calculada pela diferença do armazenamento de água no solo para cada dia do monitoramento da umidade, conforme Mello *et al.* (2008) e Pereira *et al.* (2010):

$$A_{(t)} = \bar{\theta}_{0-20} * 200 + \bar{\theta}_{20-40} * 200 + \bar{\theta}_{40-50} * 100 \quad (5)$$

$$\Delta A = A_{t_{(i+1)}} - A_{t_{(i)}} \quad (6)$$

em que $A_{(t)}$ é o armazenamento de água no perfil do solo (mm), correspondente a 0,5 m; A_{t2} é o armazenamento na data $t2$ (mm); A_{t1} é o armazenamento na data $t1$ (mm).

Dentre os modelos para determinação da curva de retenção de água no solo as diferentes profundidades (0,15, 0,30 e 0,45 m), optou-se pela metodologia desenvolvida por Van Genuchten (1980) (eq. 7), por ser um modelo que permite relacionar, com alto poder de predição, energia de retenção e disponibilidade hídrica do solo.

$$\theta = \theta_R + (\theta_S - \theta_R) \left[\frac{1}{1 + (\alpha * \Psi m)^n} \right]^2 \quad (7)$$

em que θ é a umidade volumétrica ($\text{cm}^{-3}/\text{cm}^{-3}$), Ψm é o potencial matricial (kPa^{-1}); θ_R e θ_S , respectivamente, são a umidade volumétrica residual e na saturação. n e α são parâmetros empíricos adimensionais de ajuste, cujo α é um parâmetro expresso em kPa^{-1} . $m = 1 - 1/n$ (Mualem, 1976).

Com todos os valores da equação de Van Genuchten conhecidos, e através do potencial matricial, pode-se chegar ao armazenamento de água no solo. A análise da precisão do modelo foi realizada considerando-se o coeficiente de determinação (R^2) e a análise da dispersão dos pontos. Essa foi feita com base nas estimativas da umidade pela equação de Van Genuchten, gerada pelos parâmetros estimados pelos modelos propostos, com base nos dados de tensão e umidade obtidos em laboratório. Produziu-se então, um coeficiente de determinação para a reta de cada profundidade avaliada.

A determinação do consumo hídrico, foi alcançada através do somatório dos valores obtidos de evapotranspiração diários da cultura do milho. A seguir, os valores de K_c , para cada fase da cultura (VE, V1, V3, V6, V9, V12, V15, R1, R2, R3, R4, R5 e R6), foi determinado seguindo a metodologia padrão da FAO 56, sendo a ET_0 determinada por meio do método Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998). Posteriormente, para fins de comparação aos valores de K_c estabelecidos pelo método FAO 56, os K_c obtidos foram agrupados em quatro classes, por meio da média. Importante destacar, que a FAO 56 divide o ciclo da cultura em quatro fases fenológicas, a saber: I-fase inicial (semeadura-emergência); II) fase de crescimento (pendoamento-florescimento); III) fase intermediária (produção-enchimento dos grãos) e IV) fase final (maturação-colheita), e com base na observação dessas, gerou-se os valores médios de K_c .

RESULTADOS

Na Tabela 2, são apresentados os componentes do balanço hídrico do solo, obtidos com base nos dados de campo. Nela também são encontradas as irrigações e precipitações pluviais na área experimental, requeridas para determinação do K_c do milho irrigado, em seus diferentes estádios fenológicos.

Tabela 2 - Componentes do balanço hídrico¹ do solo e variáveis edafoclimáticas² para os diferentes estádios fenológicos da cultura do milho no ano agrícola 2019/20, município de Florestal – MG.

| Data | ¹ A / Perfil Mm | ¹ ΔA mm | ¹ P + I m | ¹ Dp / perfil mm | ¹ ETc / Intervalo mm | ¹ ETc / dia mm | ² ETo / intervalo mm | ² ETo / dia mm | ² Kc |
|----------|-------------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------------|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|------------------------------|-----------------|
| 05/11/19 | 171,4 | -1,7 | 24 | 0,0 | 25,7 | 3,4 | 29,3 | 4,2 | 0,82 |
| 08/11/19 | 224,5 | 53,2 | 38,3 | 13,2 | -21,5 | -6,1 | 14,8 | 4,9 | -1,24 |
| 14/11/19 | 210,4 | -14,1 | 29,57 | 4,0 | 35,1 | 5,4 | 29,5 | 4,9 | 1,10 |
| 18/11/19 | 250,4 | 40,0 | 80,3 | 37,7 | 19,4 | 4,3 | 11,2 | 2,8 | 1,54 |
| 21/11/19 | 235,2 | -15,3 | 18,5 | 22,5 | 3,6 | 1,0 | 8,2 | 2,7 | 0,38 |
| 29/11/19 | 230,3 | -4,8 | 62,8 | 17,6 | 47,6 | 5,6 | 31,6 | 4,0 | 1,42 |

| | | | | | | | | | |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-----|-------|
| 03/12/19 | 251,8 | 21,5 | 72,2 | 39,2 | 22,3 | 4,9 | 13,7 | 3,4 | 1,44 |
| 10/12/19 | 258,3 | 6,4 | 91,6 | 45,6 | 42,8 | 5,7 | 20,5 | 2,9 | 1,95 |
| 13/12/19 | 263,1 | 4,8 | 11,69 | 50,4 | -41,2 | -11 | 9,2 | 3,1 | -3,83 |
| 16/12/19 | 214,8 | -48,3 | 16 | 13,7 | 32,2 | 9,2 | 16,1 | 5,4 | 1,71 |
| 18/12/19 | 206,2 | -8,6 | 0 | 9,4 | -2,9 | -1,2 | 10,6 | 5,3 | -0,22 |
| 23/12/19 | 249,5 | 43,4 | 140 | 36,8 | 73,5 | 13,4 | 19,6 | 3,9 | 3,41 |
| 26/12/19 | 233,9 | -15,6 | 22,6 | 22,9 | 8,3 | 2,8 | 10,2 | 3,4 | 0,81 |
| 30/12/19 | 212,2 | -21,7 | 0,2 | 18,2 | 1,4 | 0,4 | 20,1 | 5,0 | 0,8 |
| 03/01/20 | 254,1 | 41,9 | 73,4 | 41,4 | 1,7 | 0,4 | 17,5 | 4,4 | 0,9 |
| 08/01/20 | 260,2 | 6,2 | 45,9 | 47,6 | -4,8 | -1,0 | 18,3 | 3,7 | -0,26 |
| 13/01/20 | 202,3 | -57,9 | 14,2 | 3,6 | 46,5 | 9,3 | 24,4 | 4,9 | 1,91 |
| 16/01/20 | 247,8 | 45,5 | 52,4 | 35,1 | -12,4 | -4,1 | 14,5 | 4,8 | -0,86 |
| 20/01/20 | 259,0 | 11,2 | 164,8 | 46,3 | 112,9 | 28,2 | 12,9 | 3,2 | 8,75 |
| 24/01/20 | 264,0 | 5,0 | 215,6 | 51,3 | 161,7 | 40,4 | 9,5 | 2,4 | 17,09 |
| 30/01/20 | 236,7 | -10,0 | 51,2 | 24,0 | 32,2 | 10,7 | 12,3 | 4,1 | 2,62 |
| 04/02/20 | 243,0 | 6,3 | 43,4 | 30,3 | 9,9 | 2,0 | 25 | 5,0 | 0,40 |
| 10/02/20 | 250,0 | 7,0 | 104 | 37,3 | 63,2 | 10,5 | 19,3 | 3,2 | 3,28 |
| 13/02/20 | 259,4 | 9,4 | 55,8 | 46,7 | 4,4 | 1,5 | 8,6 | 2,9 | 0,51 |
| 18/02/20 | 239,6 | -19,8 | 91 | 26,9 | 73,9 | 12,3 | 18,0 | 3,6 | 3,42 |
| 21/02/20 | 227,1 | -12,5 | 0,2 | 19,8 | -10,7 | -3,6 | 14,4 | 4,8 | -0,75 |
| 26/02/20 | 240,7 | 13,5 | 20 | 28,0 | -17,4 | -2,9 | 16,2 | 3,2 | -0,90 |
| 02/03/20 | 268,3 | 27,6 | 126,8 | 55,06 | 57,4 | 19,1 | 12,5 | 2,1 | 9,18 |
| 07/03/20 | 257,6 | -10,7 | 40,8 | 44,9 | 1,2 | 0,2 | 13,2 | 2,6 | 0,08 |
| 10/03/20 | 247,0 | -10,6 | 0 | 34,4 | -29,1 | -9,7 | 12,5 | 4,2 | -2,32 |
| 16/03/20 | 213,0 | -34,0 | 0,2 | 21,9 | 6,1 | 1,0 | 27,1 | 4,5 | 0,22 |

Nota: A - Armazenamento de água no perfil do solo (mm); ΔA - variação de armazenamento de água no solo (mm); P - total precipitado (mm); I - lâmina de irrigação (mm); DP - percolação profunda; ETc - evapotranspiração da cultura (mm); ET0 - evapotranspiração de referência obtida por Penman- Monteith; Kc - coeficiente de cultura.

O consumo hídrico do milho, excluindo-se as inconsistências (valores discrepantes) foi de 467,3 mm para um ciclo de 118 dias (Tabela 2), tendo sido acumulados 127,3 mm na fase inicial (duração de 34 dias), 154,6 mm na fase vegetativa (28 dias), 139,2 mm durante o florescimento (29 dias) e 46,2 mm na fase de enchimento de grãos (27 dias). Diferentemente dos valores do coeficiente de cultivo agrupados pela FAO, para apenas quatro diferentes fases de desenvolvimento da cultura, o Kc dinâmico a cada estágio fenológico, calculado com base nos valores da ETc e obtido pelo balanço hídrico, encontra-se na Figura 3. É possível observar valores crescentes do coeficiente de cultivo nos estádios iniciais de desenvolvimento. De VE a V3, o Kc foi de 0,82 a 1,44 para as respectivas fases. Em seguida, houve novo acréscimo na demanda hídrica, entre V9 (Kc = 0,8) e V15 (1,91), em virtude aos acréscimos no índice de área foliar da cultura. Ao atingir o estágio fenológico R2 - grão bolha d'água - configurou-se um novo Kc, de 1,84, muito semelhante ao verificado em R3 (1,96). Ao aproximar do fim do ciclo da cultura, houve declínio nos valores de Kc (Tabela 2). Os resultados negativos de Kc durante V6, R4 e R6 (Tabela 2 e Figura 3) estão relacionados a uma maior percolação profunda (DP) observada nesses períodos, frente a uma baixa entrada de água no sistema.

Os elevados valores de Kc observados durante V15, R1 e R5 (Figura 3) ocorreram após uma sequência de grandes eventos de precipitação (23/12/19 a 26/12/19, 166 mm; 20/01/20 a 24/01/21, 216 mm; 25/01/20 a 27/01/20, 215,6 mm; 30/01/21 a 04/02/20, 155,6 mm), os quais provavelmente acarretaram uma parcela considerável de escoamento superficial que não pode ser mensurado.

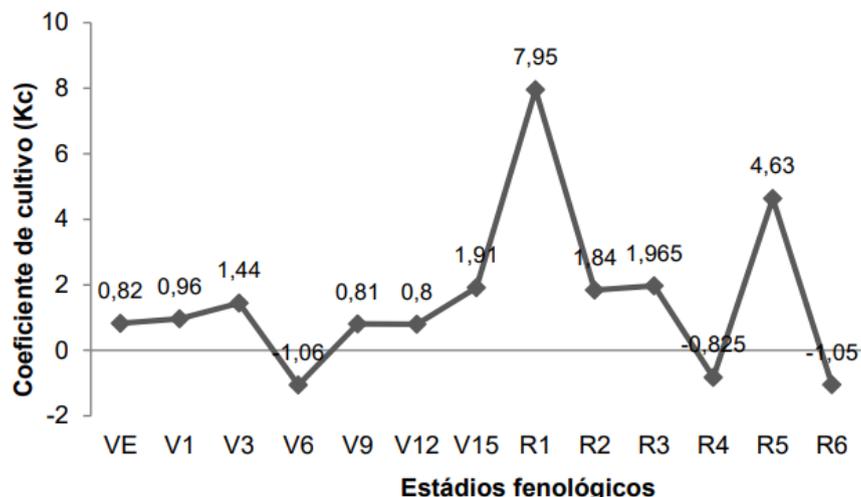


Figura 3. Variação dos valores médios do Coeficiente de cultivo (Kc), conforme progressão nos estádios fenológicos de *Z. mays*.

Na Tabela 3, apresentam-se os resultados de Kc (médios) obtidos para as 4 fases fenológicas preconizadas pela FAO 56. Ressalta-se que as inconsistências (valores discrepantes) foram excluídas.

Tabela 3. Duração das fases (dias) e valores médios de coeficiente de cultivo (Kc), determinados pelo balanço hídrico e estabelecido de acordo com o Boletim 56 da FAO.

| FASES | DURAÇÃO | | Kc | |
|---------------------|-----------|----------|-----------|----------|
| | OBSERVADO | FAO - 56 | CALCULADO | FAO - 56 |
| I – Inicial | 34 | 35 | 0,96 | 0,86 |
| II – D. vegetativo | 28 | 30 | 1,38 | 1,23 |
| III - Florescimento | 29 | 30 | 1,20 | 1,24 |
| IV – M. fisiológica | 27 | 30 | 0,45 | 0,59 |

D. vegetativo – desenvolvimento vegetativo; M. fisiológica – maturidade fisiológica.

DISCUSSÃO

A necessidade hídrica de uma cultura é condicionada pelo clima e pelo coeficiente de cultivo. O Kc é influenciado pelo ciclo da cultura (suas fases fenológicas), conforme Bastos *et al.* (2008). Três fontes de erro podem estar embutidas no cálculo do Kc da Tabela 2: i) o processo descontínuo de leituras de umidades do solo (que pode conferir diferenças nas variações diárias de armazenamento); como a redistribuição de água no solo é lenta e o intervalo de tempo entre as medições foi curto, provavelmente houve contribuições de períodos anteriores, interferindo negativamente no cálculo do Kc. ii) erros inerentes à calibração dos tensiômetros; iii) a simplificação do balanço hídrico adotado, que desprezou as perdas/ganhos por deflúvios, situações similares foram verificadas por Detomini (2009), Trout e DeJonge, (2018).

Quanto às precipitações ao longo do experimento, as intensidades elevadas ocorridas em alguns momentos podem ter sido decisivas em alterar os regimes de infiltração a ponto de permitir o surgimento de processos de escoamento superficial, o qual pode ser computado como perdas de água, influenciando na obtenção dos valores de Kc. Fenômeno similar também foi observado por Trout e DeJonge (2018).

Quando se estabeleceu uma comparação entre os valores médios de Kc para cada uma das quatro fases fenológicas, obtidos pelo método do balanço hídrico no solo, e aqueles estimados pela metodologia da FAO – 56 (Allen *et al.*, 1998), verificou-se que os dois métodos apresentaram valores próximos, principalmente para a Fase III (Tabela 3). Nota-se que na Fase III, a mais importante, o Kc experimental ficou pouco subestimado em relação ao ajustado da metodologia FAO. Essa fase é a que apresenta os maiores valores de Kc, visto que corresponde ao estágio de florescimento (R1) até o início de enchimento de grãos – R2 (Albuquerque, 2010) e coincide com o período crítico da cultura, em que podem acontecer os maiores impactos do déficit hídrico, refletindo na redução da produção de grãos (Bergamaschi *et al.*, 2004).

Na prática, muitos produtores de milho têm utilizado o Kc regionalizado da FAO em substituição ao obtido em campo, uma vez que este é de difícil mensuração e nem sempre se encontra disponível para toda localidade. Pode-se constatar que para a região onde este estudo foi realizado os dados estimados podem ser utilizados sem que haja grandes mudanças com relação aos dados medidos e sem que ocorra redução na produtividade, com base nos valores obtidos na Tabela 3, excluindo-se as inconsistências ocorridas devido a fatores não controlados.

Os valores médios Kc apresentados na Tabela 3, diferiram dos apresentados por Souza *et al.* (2012) no cultivo do milho irrigado por aspersão (Fase I – 0,76; Fase II – 0,82; Fase III – 1,04; Fase IV – 0,58) no município de Seropédica – RJ. Os coeficientes de cultivo obtidos no presente trabalho, também diferiram dos encontrados por Santos *et al.* (2014), que foram de 0,50, 0,64, 1,12 e 1,11 para as diferentes fases fenológicas, com duração de 16, 20, 27 e 14 dias respectivamente, para o milho verde AG 1051, nas condições edafoclimáticas de Mossoró – RN.

Os resultados aqui obtidos muito se assemelham com os de Bastos *et al.* (2008), em trabalho realizado para determinar o Kc do milho utilizando lisímetros nas condições edafoclimáticas no estado do Piauí, sob irrigação por aspersão. Esses autores encontraram valores de Kc oscilando entre 0,5-0,7; 1,1-1,3; 1,3-1,4 e 0,6 para as fases I, II, III e IV, respectivamente. Bezerra e Oliveira (1999) também utilizaram o método do balanço hídrico em um sistema de irrigação por gotejamento, para determinar o Kc do milho no litoral cearense, onde encontraram valores de 0,73, 1,11, 0,95 e 0,64, respectivamente para as referidas fases.

Além de determinar e comparar os coeficientes de cultivo obtidos através da metodologia descrita por Allen *et al.* (2006), que evidencia esses valores agrupados conforme as quatro fases de desenvolvimento, o presente trabalho procurou individualizar o Kc conforme os estádios fenológicos da cultura. Na irrigação, segundo Soares (2010), é importante avaliar constantemente o sistema planta – solo – atmosfera para obter panorama real da situação e a tomada de decisão correta de quando e quanto irrigar. Porém, neste nível de avaliação, acredita-se que o intervalo entre as medições não foi suficiente para capturar o real movimento da água no solo, ocasionando resultados inconsistentes, associados também a outros fatores externos.

Os valores de Kc se comportaram de maneira crescente no início do ciclo da cultura (Figura 3), desde a emergência até os 30 dias após (VE a V3), pois com o aumento da área foliar, aumenta-se também a evapotranspiração média, que se torna superior à evapotranspiração de referência, à medida que ocorrem acréscimos no índice de área foliar (Radin, 1998).

Lima *et al.* (1992) encontraram valor de Kc médio de 0,3 para os estádios intermediários de desenvolvimento vegetativo da planta de milho (V6 a V9) do milho no estado do Piauí, enquanto Andrade Júnior *et al.* (1998) constataram Kc de 0,50 para o mesmo estádio, evidenciando que este parâmetro é fortemente influenciado por fatores como manejo agrícola adotado, cultivar utilizada e condições climáticas.

Os valores determinados no presente trabalho (Figura 3) foram maiores que os observados pelos autores supracitados. De acordo com Fancelli e Dourado Neto (1996), os valores de Kc iniciais recomendados para o milho no Brasil vão de 0,20 a 0,40. Porém, com base nos resultados aqui encontrados, se esses valores fossem adotados para as condições deste trabalho, a cultura passaria por estresse, em razão da falta de água no início do desenvolvimento. Essa é a fase em que a cultura não está com seu sistema radicular totalmente desenvolvido, sendo mais susceptível à competição por água e nutrientes, podendo haver, então, reflexo na produção final. Não obstante, os valores aqui estimados estão de acordo com a recomendação de Resende *et al.* (2000), que propõem Kc de 0,15 a 1,00 para o Kc nos estádios iniciais. Os valores de Kc médios durante os estádios vegetativos de V9 a V15 variaram de 0,81 a 1,91 (Figura 3). De V15 até R1, Larcher (2000) afirmou que a necessidade de água é aproximadamente proporcional à quantidade de fitomassa. Portanto, o maior consumo de água, quando as plantas se encontravam com elevado IAF pode ser atribuído a uma maior área transpirante, uma vez que a evaporação do solo tendeu a diminuir devido ao sombreamento das folhas. Os referidos valores estão próximos dos observados por Lima *et al.* (1992), e em concordância com os Kc alcançados por Andrade Júnior *et al.* (1998), para o estado do Piauí. Os resultados precedem as recomendações de Fancelli e Dourado Neto (1996) e Albuquerque e Andrade (2000) para as diferentes regiões do Brasil.

Nos estádios seguintes, de florescimento – maturação leitosa (R1 até R3), além do alto índice de área foliar e intensa atividade fisiológica, há também coincidência com o período em que se pode notar os maiores valores de Kc da cultura (Figura 3), pois as plantas apresentam elevada transpiração decorrente da máxima expansão da área foliar que ocorre nesse período. Conforme Bergamaschi *et al.* (2004), a planta de milho é altamente dependente da arquitetura e expansão foliar, com capacidade de maximizar a interceptação da radiação fotossinteticamente ativa, em que estes parâmetros em equilíbrio proporcionam à cultura grande rendimento final de grãos, sendo o sucesso desse processo possível apenas na ausência de deficiência hídrica. A partir de R4 e aproximando do final do ciclo da lavoura, os valores de Kc decresceram (Figura 3) devido à redução progressiva da taxa de transpiração, que ocorreu em virtude aos decréscimos sucessivos de área foliar ocasionados pelo processo de senescência natural das folhas. Todavia, cabe ressaltar, mais uma vez, a interferência negativa das condições climáticas adversas, como o excesso de pluviosidade na localidade em que o experimento foi conduzido, fato este que culminou no descompasso dos valores de Kc observados nos estádios finais da cultura (Figura 3).

Em conclusão, as divergências relatadas nos valores de Kc refletem a importância de estudos locais e regionais, uma vez que as condições de solo, clima, método de irrigação, teor de água no solo, entre outras, influenciam diretamente nos valores desse coeficiente.

CONCLUSÃO

Os coeficientes de cultivo, determinados pelo balanço hídrico, foram, em média, 1,07 entre os estádios VE e V3; 0,8 entre V6 e V12; 1,90 entre V15 e R3; e 0,9 entre R4 e R6, desconsiderando as inconsistências observadas em V6 e R1. O consumo hídrico total do milho ao longo de um ciclo de 118 dias foi de 467,3 mm, distribuído da

seguinte forma: 127,3 mm na fase inicial (34 dias), 154,6 mm na fase vegetativa (28 dias), 139,2 mm durante o florescimento (29 dias) e 46,2 mm na fase de enchimento de grãos (27 dias). Diante das discrepâncias identificadas nos valores de Kc em determinados estádios fenológicos, recomenda-se a realização de estudos complementares, especialmente com intervalos de amostragem mais amplos, a fim de aprimorar a metodologia e obter coeficientes de cultivo mais consistentes e representativos das condições reais.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, P. E. P. de; ANDRADE, C. L. T. **Uso de planilha eletrônica para a programação da irrigação na cultura do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2000. 24p.
- ALBUQUERQUE, P. E. P. de. **Manejo de irrigação**. In: CRUZ, J. C. (Ed.). Cultivo do milho. 6. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2010.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH. **Evapotranspiration del cultivo: guias para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos**. Roma: FAO, 2006. 298 p.
- ANDRADE JÚNIOR, A.S. de. *et al.* **Irrigação**. In: A cultura do milho no Piauí. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 1998. 100 p.
- BASTOS, E. A. *et al.* Coeficiente de cultivo do milho nos Tabuleiros Litorâneos do Piauí. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 27., 2008, Londrina, PR. **Anais [...]**. Londrina, PR: CNMS, 2008.
- BERGAMASCHI, H. *et al.* Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 9, p. 831-839, set. 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004000900001>
- BEZERRA, F. M. L.; OLIVEIRA, C. H. C. Evapotranspiração máxima e coeficiente de cultura nos estádios fenológicos da melancia irrigada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 2, p.173-177, 1999. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v3n2p173-177>
- CARVALHO, D. F. *et al.* Demanda hídrica do milho de cultivo de inverno no Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 112-118, 2006. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662006000100017>
- CONAB. Companhia Nacional De Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**. Brasília, DF, v. 8, safra 2021/22, n. 9, 2022.
- DE TOMINI, E. R. *et al.* Consumo hídrico e coeficiente de cultura para o híbrido DKB 390. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 31, n. 3, p. 445-452, 2009. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v31i3.379>
- DEXTER, A. R. Soil physical quality part I: theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Oxford, v. 120, p. 201-214, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004>
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.
- FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. Milho: fisiologia da produção. In: SEMINÁRIO SOBRE FISILOGIA DA PRODUÇÃO E MANEJO DE ÁGUA E DE NUTRIENTES NA CULTURA DO MILHO DE ALTA PRODUTIVIDADE, 1996. Piracicaba, SP. **Anais [...]**. Piracicaba, SP: ESALQ, 1996. p. 1-29.
- GAO, Y. Crop coefficient and water-use efficiency of winter wheat/spring maize strip intercropping. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 111, n. 1, p. 65-73, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.10.007>
- KÖPPEN, W. Das geographische System de Klimate. **Handbuch der klimatologie**, Gebrüder Bornträger, Banda 1, Parte C, p. 1-44, 1936.
- LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. Rima: São Carlos, 2000. 531p.

- LIMA, M. G. *et al.* Demanda de água pela cultura do milho híbrido XL-560. In: SEMINÁRIO DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 6., 1990, Teresina, PI. **Anais** [...]. Teresina, PI: Embrapa-UEPAE, 1992. p. 207-215.
- MANTOVANI, E. C. *et al.* **Irrigação: princípios e métodos**. 3. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2009, 355p.
- MARTINS, F. B. *et al.* Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite para Minas Gerais: cenário atual e projeções futuras. **Revista Brasileira de Climatologia**, 2018. <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i0.60896>
- MELLO, C. R. de. *et al.* Development and application of a simple hydrologic model simulation for a Brazilian headwater basin. **Catena**, Amsterdam, v. 75, p. 235-247, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.002>
- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, Washington, v. 12, n. 3, p. 513-522, 1976. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>
- OLIVEIRA, R. A. *et al.* Desempenho do irrigâmetro na estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 12, n. 2, p. 166-173, 2008. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000200009>
- PEGORARO, G. **Resistência de híbridos convencionais e transgênicos ao complexo de lagartas na cultura do milho em Iturama-MG**. Orientador: Angelo Pallini Filho. 2019. 41 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Defesa Sanitária Vegetal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2019.
- PEREIRA, D. dos R. *et al.* Evapotranspiration and estimation of aerodynamic and stomatal conductance in a fragment of Atlantic Forest in Mantiqueira Range region, MG. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 1, p. 32-40, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602010000100004>
- RADIN, B. **Evapotranspiração máxima do milho medida em lisímetro e estimada pelo modelo de Penman-Monteith modificado**. Orientador: Homero Bergamaschi. 1998. 96 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.
- RESENDE, M. *et al.* **Cultivo do milho irrigado**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2000. 39 p.
- RIBEIRO, M. S. *et al.* Coeficiente de cultura (Kc) e crescimento vegetativo de acaia cerrado associados a graus-dia e desenvolvimento. **Irriga**, Botucatu, v. 14, n. 2, p. 220-232, 2009. <https://doi.org/10.15809/irriga.2009v14n2p220-232>
- RODRIGUES, L. N.; ZACCARIA, D. **Agricultura Irrigada: um breve olhar**. Fortaleza: Inovagri, 2020. 377 p.
- SANTOS, W. O. *et al.* Coeficientes de cultivo e necessidades hídricas da cultura do milho verde nas condições do semiárido brasileiro. **Irriga**, [s.l.], v. 19, n. 4, p. 559-572, 2014. <https://doi.org/10.15809/irriga.2014v19n4p559>
- SILVA, T. G. F. da. *et al.* Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 1, p. 64-71, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000100009>
- SOARES, F. C. **Análise de viabilidade da irrigação de precisão na cultura do milho (*Zea mays* L.)**. Orientadora: Marcia Xavier Peiter. 2010. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2010.
- SOLOGUREN, L. Demanda mundial cresce e Brasil tem espaço para expandir produção. **Visão agrícola**, v. 13, n. 1, p. 8-13, 2015.
- SOUZA, A. P. de. *et al.* Evapotranspiração e coeficientes de cultura do milho em monocultivo e em consórcio com a mucuna-cinza, usando lisímetros de pesagem. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 7, n. 1, p. 142-149, 2012. <https://doi.org/10.5039/agraria.v7i1a802>
- SOUZA, L. S. B. de. *et al.* Requerimento hídrico e coeficiente de cultura do milho e feijão-caupi em sistemas exclusivo e consorciado. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 28, n. 4, p. 151-160, 2015. <https://doi.org/10.1590/1983-21252015v28n417rc>
- TROUT, T.; DEJONGE, K. Crop water use and crop coefficients of maize in the Great Plains. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 14, n. 6, 2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001309](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001309)

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>