



Evapotranspiração da cana-de-açúcar mensurada em lisímetro de pesagem eletrônico de grande porte

Victor Henrique Neves¹, Leticia Gonçalves Gasparotto¹, Wagner Wolf¹, Marcos Vinicius Folegatti¹ e Fábio Ricardo Marin^{1(*)}

¹Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Av. Pádua Dias, 11, CEP 13418-900 Piracicaba, SP.

E-mails: victorneves252@gmail.com, fabio.marin@usp.br, leticiagasparotto@usp.br, wwolff7@gmail.com e mvfolega@usp.br

(*)Autor para correspondência.

INFORMAÇÕES

História do artigo:

Recebido em 08 de maio de 2022

Aceito em 27 de janeiro de 2023

Termos para indexação:

irrigação

coeficiente de cultura

déficit hídrico

RESUMO

A compreensão da dinâmica entre evapotranspiração de referência (ET_o), evapotranspiração de cultura (ET_c) e coeficiente de cultura (K_c) é fundamental em irrigação. O objetivo deste trabalho foi analisar a relação entre uma base de dados de ET_c da cana-de-açúcar medidos por um lisímetro de pesagem eletrônico de grande porte e K_c e ET_o calculados. O lisímetro está instalado em uma área localizada na cidade de Piracicaba, SP, em um cultivo de cana-planta da cultivar RB867515. Para a análise, estimou-se a ET_o pelo método de Penman-Monteith e, para a seleção dos dados de ET_c, fez-se a seleção de ET_o, ET_c e K_c baseando-se nos dias em que o K_c foi igual ou inferior a quatro. Posteriormente, excluiu-se os dados em que os dias apresentaram déficit hídrico superiores a zero e agrupou-se todos aqueles próximos entre si anteriores a 201 dias (grupo 1) e todos os próximos entre si posteriores a 385 dias (grupo 2). A ET_c média no período de crescimento considerando os grupos 1 e 2 foi de 3,38 mm dia⁻¹ e o K_c médio obtido nestes grupos foi de 1,39. O resultado obtido pode auxiliar no cálculo correto da lâmina de irrigação na cultura.

© 2023 SBAgro. Todos os direitos reservados.

Introdução

A cana-de-açúcar é uma cultura de grande importância socioeconômica para o Brasil (Neto et al., 2006) pois seus produtos e subprodutos são muito relevantes dentro da cadeia produtiva. Sabe-se que um dos fatores influentes na produtividade dos canaviais é a disponibilidade hídrica, visto que a cultura requer de 1500 a 2500 mm ao longo de seu ciclo vegetativo para se desenvolver adequadamente (Doorenbos et al., 1980), porém, nem sempre a água proveniente das chuvas atende a esta necessidade hídrica, o que torna cada vez mais relevante o uso da irrigação (Neto et al., 2006). Apesar da irrigação ser uma excelente alternati-

va para locais com regime hídrico limitado ao desenvolvimento das culturas agrícolas, o seu manejo, muitas vezes, não é eficiente, o que pode contribuir com o gasto desnecessário de energia, favorecer a escassez hídrica e gerar taxas inadequadas de escoamento e drenagem, ocasionando, por vezes, perdas de nutrientes por lixiviação (Marin et al., 2020).

Para se definir uma lâmina de irrigação que será aplicada em uma cultura agrícola, torna-se fundamental conhecer a evapotranspiração máxima da cultura (ET_c), pois esta representa a água que deverá ser repostada ao solo para manter o crescimento e a produtividade compatível com o local de cultivo, no que se refere ao regime solar e térmico

da região, de uma cultura sem pragas e doenças, adequadamente adubada e ocupando uma grande área suprida com água (Pereira et al., 2013).

O método de obtenção da ETC utilizando-se lisímetros é o considerado padrão para a mensuração deste dado de forma mais assertiva (Vellame et al., 2012). Os lisímetros são dispositivos utilizados para se mensurar a dinâmica da água nos solos, sendo muito importantes para se quantificar a evapotranspiração de vegetações (Allen et al., 1991) e se validar outros métodos e modelos de estimativa de evapotranspiração (Farahani et al., 2007; Sousa et al., 2011; Junior et al., 2012). Os lisímetros de pesagem, por sua vez, são constituídos por uma caixa que tem paredes impermeáveis e são preenchidos por solo, com a presença de uma balança ou célula de carga em seu interior que realizará medições, conforme houver variação de massa (Viana, 2000).

Conhecer o momento ideal de irrigação e a lâmina a ser aplicada nos canais pode, além de aumentar a eficiência do uso da água, auxiliar no planejamento e tomada de decisão (Raks, 2021; Inman-Bamber, 2004; Inman-Bamber & Smith, 2005). Dentre os principais estudos envolvendo o uso de lisímetros para se quantificar a ETC e identificar o Kc (coeficiente de cultura) da cana-de-açúcar nas diferentes fases de desenvolvimento da cultura, encontram-se o de Barbieri (1981), Gonçalves (2010), Cardoso & Domingos (2014), Pinheiro et al. (2015), Sá et al. (2015) e Araújo (2018).

Portanto, torna-se fundamental estudos que utilizem métodos diretos e mais assertivos para se quantificar a ETC – como os dos lisímetros – pois, através deles, é possível comparar se os demais métodos frequentemente utilizados para tal estão adequados, além de ser possível relacionar este dado com o Kc e ETo (evapotranspiração de referência) do local. Entretanto, segundo Allen et al. (1998), os lisímetros tendem a ser mais utilizados para pesquisas visto que o seu custo de instalação e de mão-de-obra para operação e análise de dados é elevado. Dessa forma, por serem mais assertivos ao mensurarem a ETC, podem ser utilizados como ferramenta para se obter, por meio de cálculos, valores de Kc que de fato representem as condições de desenvolvimento das culturas, os quais poderão ser empregados em outros métodos, como o do balanço hídrico, por exemplo, para a estimativa da ETC.

Assim, é relevante a compreensão do comportamento da ETo, ETC e Kc da cana-de-açúcar, contribuindo para o aperfeiçoamento das estimativas das lâminas por outros métodos, de modo a se evitar o desperdício hídrico. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi analisar os dados de evapotranspiração de cultivo (ETC) e de coeficiente de cultura (Kc) da cana-de-açúcar medidos por um lisímetro de pesagem eletrônico de grande porte.

Material e Métodos

Caracterização da área onde o lisímetro está localizado

O lisímetro foi instalado e calibrado por Flumignan (2012) na área experimental do Departamento de Engenharia de Biosistemas localizado na Fazenda Areão, da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da Universidade de São Paulo (ESALQ-USP), em Piracicaba, SP. O clima da região, segundo a classificação de Köppen-Geiger, é do tipo tropical úmido com chuvas de verão e seca no inverno (Cwa) (Aguirre et al., 2020). Este equipamento foi construído em uma área de nitossolo sem irrigação e apresenta formato circular, com profundidade de 1,3m e com dimensões de 4 x 3m (12m²). Mais detalhes sobre a construção deste lisímetro são descritos por Flumignan (2012).

A cana-de-açúcar, cultivar RB867515, cujo espaçamento entre linhas empregado foi de 1,5m (27,33 colmos/m², aproximadamente) teve seu plantio finalizado em 15/11/2018 em uma área de 2,03 ha; o início das medidas lisimétricas ocorreu em 20/03/2019 (126 dias após o plantio da cultura). A cana-planta desta área foi colhida em 30/11/2019, mas as plantas presentes no lisímetro continuaram no local até o mês de janeiro-fevereiro do ciclo da segunda cana-soca, entretanto, o último dado de evapotranspiração quantificado pelo lisímetro foi em 14/04/2020 (517 dias após o plantio).

Ao se realizar a coleta dos dados, com certos intervalos de falhas, as ETC's obtidas na escala horária foram convertidas em valores diários, através da soma dos valores horários positivos mensurados pelo lisímetro.

Evapotranspiração de Referência (ETo)

Para o cálculo da evapotranspiração de referência (ETo), coletou-se as variáveis climáticas de dois locais, de acordo com a disponibilidade dos dados: estação meteorológica automática do Posto Meteorológico e os da estação meteorológica automática da Fazenda Areão.

A estação automática do Posto Meteorológico está localizada nas dependências do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ - USP (latitude 22° 42' 30" S, 47° 38' 00" W) a aproximadamente 1,5 km do local onde o lisímetro se encontra. A estação meteorológica da Fazenda Areão (estação da fazenda) está a 50 m do local onde o lisímetro está instalado. Para este estudo, se priorizou o uso dos dados da estação da fazenda, por estar mais próxima do local estudado (Tabela 1).

A evapotranspiração de referência foi calculada para intervalos de 24 horas, utilizando o método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

Após o cálculo da ETo, utilizou-se a equação 1 para se quantificar o Kc da cana-de-açúcar presente no lisímetro.

Tabela 1. Datas e locais onde foram coletadas as variáveis meteorológicas para o cálculo da evapotranspiração de referência (ETO).

Local de coleta	Data	Variáveis
Posto Meteorológico	19/03/2019 - 23/10/2019	UR, Tmax, Tmin, P, Rn, u2
	24/10/2019 - 14/04/2020	Rn, u2
Estação da Fazenda	24/10/2019 - 14/04/2020	UR, Tmax, Tmin, P

¹ Sendo que a UR é a umidade relativa do ar (%); Tmax é a temperatura máxima (°C); Tmin é a temperatura mínima (°C); P é a precipitação (mm); Rn é o saldo de radiação (MJ m⁻² dia⁻¹) e u2 é a velocidade do vento a 2m de altura (m s⁻¹).

$$Kc = \frac{ETc \text{ lisímetro}}{ETO \text{ calculada}} \quad (1)$$

em que Kc é o coeficiente de cultura; ETc lisímetro é a evapotranspiração de cultura mensurada pelo lisímetro (mm dia⁻¹); e ETO calculada é a evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹).

Avaliação dos dados

Após a coleta dos valores de ETc, foram selecionados dados nos dias em que o Kc foi igual ou inferior a quatro (Kc ≤ 4). Este critério foi aplicado pois se considera normal haver grande variabilidade para dados diários de Kc, diferentemente do que quando se utiliza valores médios para cada fase fenológica (cujo valor máximo normalmente fica próximo de 1,5). Vale-se também ressaltar que, segundo Marin et al. (2019), em diferentes culturas, dados diários de Kc chegaram próximos de 4. Após este primeiro filtro, utilizou-se uma planilha de balanço hídrico para o cálculo do déficit hídrico, adotando-se um valor genérico de Kc=1 e CAD de 45 mm para todo o ciclo da cana-de-açúcar. O intuito deste procedimento foi eliminar os dados de dias com déficit hídrico superior a zero. Dessa forma, foram selecionados somente dias em que a cultura transpirou a uma taxa máxima.

Após a filtragem, agrupou-se os dados que se encontravam mais próximos entre si. Com a geração dos gráficos, constatou-se que havia um intervalo com ausência de dados entre 201 e 385 dias após o plantio (DAP) da cana-de-açúcar. Assim, optou-se por agrupar todos os dados próximos entre si anteriores a 201 dias (grupo 1) e todos os dados próximos entre si posteriores a 385 dias (grupo 2). Após a geração dos dois grupos, se estabeleceu em cada um deles a sua média e significância, utilizando-se nesta última análise a regressão linear.

Uso de graus-dias para determinação das fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar

O desenvolvimento da cana-de-açúcar, em cada um dos dois grupos de dados selecionados, foi avaliado com o cálculo de graus-dia durante o período em que a cultura esteve em campo. Para tanto, utilizou-se o método proposto

por Arnold (1959), representado pela Equação 2.

$$GD \text{ acum} = \sum \left[\frac{(T_{max} + T_{min})}{2} - T_b \right] \quad (2)$$

$$\text{Se } \frac{(T_{max} + T_{min})}{2} < T_b ; GD = 0$$

em que GD acum são os graus-dia acumulados (°C dia); Tmax é a temperatura máxima do ar (°C); Tmin é a temperatura mínima do ar (°C) e Tb é a temperatura-base (°C).

Considerou-se 20 °C a temperatura-base mínima, abaixo da qual o desenvolvimento da cana-de-açúcar pode ser considerado nulo (Barbieri et al., 1979 apud Sá et al., 2011).

Resultados e discussão

Os valores de evapotranspiração de referência (ETO), evapotranspiração de cultura (ETc) (mensurados pelo lisímetro) e o coeficiente de cultura (Kc) da cana-de-açúcar, cultivar RB867515, distribuídos ao longo de um período de 517 dias, foram quantificados e estão apresentados a seguir.

Para esta primeira análise, na Figura 1, optou-se por avaliar os valores de ETc filtrados apenas quando os Kc's diários foram menores ou iguais a quatro (Kc ≤ 4) em relação aos dias após o plantio, ou seja, sem considerar os dias com a presença de déficit hídrico igual a zero. Dos 255 dados iniciais mensurados pelo lisímetro nesta primeira análise, foram resultantes 233 dados de ETc (cerca de 8,62% a menos).

Na Figura 1 verifica-se um decréscimo nos valores de ETc no período de 126 a 251 DAP, apresentando uma média de 3,27 mm dia⁻¹ e variando de 1,162 a 7,697 mm dia⁻¹. Entre 368 e 517 DAP houve aumento e posterior decréscimo da ETc, atingindo um pico no dia 466 de 8,791 mm dia⁻¹ e mínimo no dia 517, de 0,735 mm dia⁻¹, apresentando uma média de 4,716 mm dia⁻¹. A média de Kc do grupo 1 (126 a 251 DAP), considerando todos os dados da figura 1, foi de 1,45, enquanto que a média de Kc do grupo 2 (368 a 517 DAP) foi de 1,29.

Nas Figuras 2, 3 e 4 são apresentados os valores de ETO, ETc e Kc, respectivamente, em relação aos dias após o plantio da cultura, apresentando os mesmos valores da Figura 1, porém, agora filtrados para os dias com a presença de déficit hídrico igual a zero.

Cada uma destas três Figuras têm um total de 50 dados (mais de quatro vezes menos em relação aos dados da Figura 1). Como já mencionado, foram selecionados dois grupos de ETO, ETc e Kc, visando facilitar a análise daqueles mais próximos entre si (anteriores a 201 dias e posteriores a 385 dias).

Figura 1. Evapotranspiração de cultura (ETc) em relação aos dias após o plantio da cana-de-açúcar.

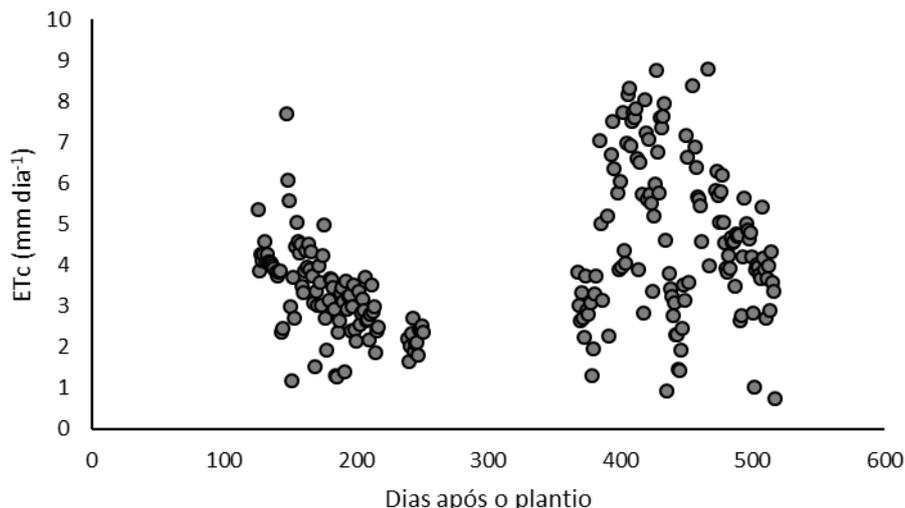
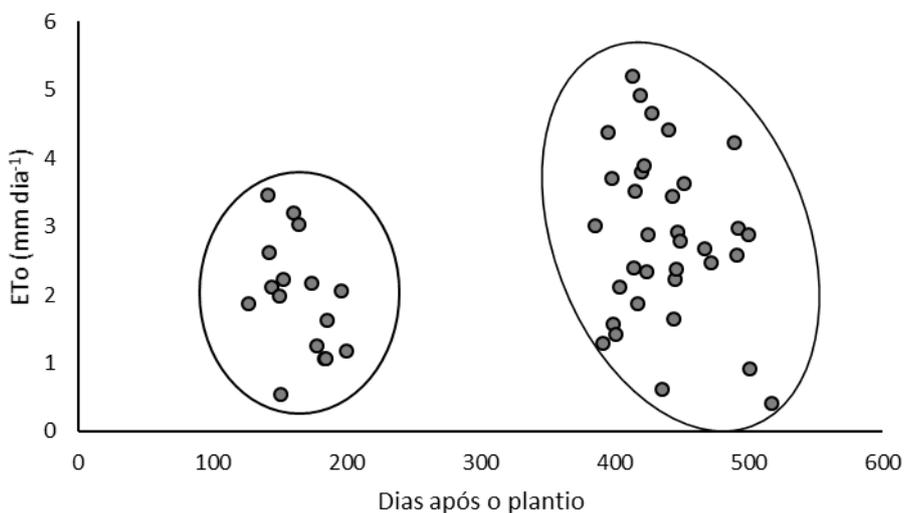


Figura 2. Evapotranspiração de referência (ETo) cujos dias após o plantio apresentam déficit hídrico igual a zero.



Comparando os dias após o plantio (DAP) obtido para cada etapa de desenvolvimento da cultura calculado segundo a metodologia de graus-dia (Equação 2 da seção de Material e Métodos) com a Figura 2, verifica-se que a brotação, perfilhamento e crescimento ocorreram em 78 DAP (408 °C dias acumulados, segundo dados de Marin et al. (2015)), 118 DAP (650 °C dias acumulados, segundo dos Marin et al. (2015)) e 140 DAP (750 °C dias acumulados, segundo Almeida et al. (2008)), respectivamente. Portanto, os dois grupos da Figura 2 representam a fase de crescimento da cultura, visto que o estágio de perfilhamento se encerrou aos 140 DAP e só houve a plotagem diária de dados de ETo (Figura 2), ETc (Figura 3) e Kc (Figura 4) quando a cultura estava sem estresse hídrico ocasionado pelo déficit de água.

Na Figura 2, percebe-se uma queda da ETo presente no grupo 1, localizado entre 127 e 200 DAP (março e junho de 2019). Neste período, os valores máximos e mínimos foram

de 3,468 mm dia⁻¹ (142 DAP) e 0,539 mm dia⁻¹ (151 DAP), porém, apesar das variações dos valores entre os dias, verifica-se uma redução gradual nos valores de ETo até os 200 DAP. No grupo 2, localizado entre 386 e 517 dias (dezembro 2019 e abril de 2020), a ETo teve uma média mais elevada em relação ao grupo 1, apresentando os maiores valores em 413 (janeiro/2020), 419 (janeiro/2020), 428 DAP (janeiro/2020), respectivamente. Neste grupo, houve uma variação de 5,206 mm dia⁻¹ a 0,411 mm dia⁻¹, porém, analisando a Figura 2 não se verifica tendência de crescimento ou declínio nos valores de ETo ao longo dos dias, como se verifica claramente no grupo 1, por exemplo, mas sim grandes oscilações ao longo dos dias, havendo um decréscimo mais nítido após os 489 DAP.

Em resumo, constatou-se que a média total de ETo considerando os dois grupos e durante todo o período foi de 2,55 mm dia⁻¹ aproximadamente, e os maiores valores de ETo observados ocorreram em dias mais ensolarados (com

maior Rn), enquanto os dias mais nublados contribuíram com as menores ETo's. Portanto, dentre todas as variáveis meteorológicas, o Rn foi o que mais contribuiu e teve relação com as variações de ETo.

A evapotranspiração da cana-de-açúcar pode ser influenciada por uma série de fatores, que são, muitas vezes, inerentes às condições ambientais, técnicas de cultivo, uso de irrigação, momento de plantio, período de colheita e cultivares e, portanto, é comum se encontrar estudos com diferentes valores de requerimento hídrico necessário para a cultura (Silva, 2009).

Na Figura 3, verifica-se uma estreita relação entre ETo e ETc (Figuras 2 e 3, respectivamente) comparado aos dias após o plantio, ou seja, sempre que há crescimento ou declínio de ETo, da mesma forma ocorre para com ETc nos dois grupos analisados, porém, constata-se que a ETc tendeu a ser um pouco mais elevada que a ETo em ambos os grupos. Como é sabido, isto pode ser justificado pelo fato de que a ETc reflete as variações da ETo e do Kc, logo, as variações na ETo influenciam a ETc (Alencar et al., 2011).

Observa-se também que houve um decréscimo nos valores de ETc presentes no grupo 1 e 2, cujos dados se distribuem entre os meses de março a abril (verão-outono), se assemelhando, portanto, com a observação feita por Marin et al. (2016) em seus estudos com a mesma cultivar de cana-de-açúcar (RB867515) cultivada na mesma cidade onde este estudo foi realizado (Piracicaba, SP), no que se refere a tendência que a ETc possui de acompanhar o desenvolvimento da cultura e as condições climáticas do local, aumentando-se durante o inverno-primavera e diminuindo-se ao longo do verão-outono.

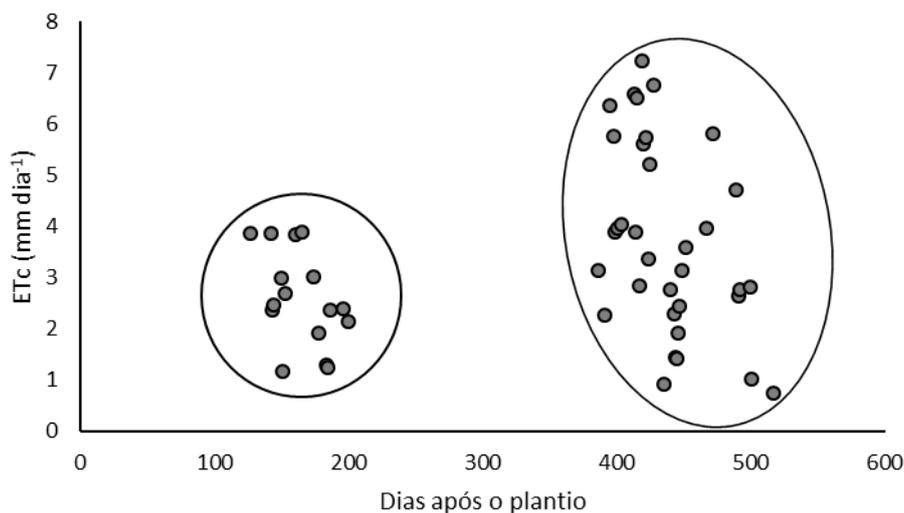
Pelas amostras de dados (considerando as falhas) em todo o período, a ETo e ETc obtiveram um total de 127,64 mm e 169,19 mm, respectivamente, apresentando, portanto, uma certa diferença entre os totais, porém, ainda assim relativamente próximos. Segundo um experimento reali-

zado por Leal (2012), em Piracicaba, SP, o consumo hídrico da cultivar RB867515 no primeiro ciclo da cultura (320 dias), sob irrigação plena com reposição de 100% da ETc (sem déficit hídrico) foi de 558,96 mm. Logo, como a região e a cultivar da cana-de-açúcar estudada por Leal (2012) é a mesma deste presente estudo, pode-se dizer que a lâmina de irrigação seria muito próxima a esta, considerando-se o ciclo da cana-planta de 320 dias.

Como os dois grupos de dados representam o estágio de crescimento da cultura, verifica-se que as médias das ETc's dos grupos 1 e 2 foram, respectivamente, de 2,597 e 3,754 mm dia⁻¹. A ETc média total considerando os grupos 1 e 2 foi de 3,38 mm dia⁻¹ enquanto que a média da ETo nesses dois grupos foi de 2,55 mm dia⁻¹ aproximadamente. Marin et al. (2016) verificaram uma média de ETc de 3,43 mm dia⁻¹ ao longo de todo o ciclo da cana-de-açúcar, sendo esta um pouco superior ao observado no presente estudo. Verificou-se um aumento de 43,82% nas médias de ETo e 44,55% nas médias de ETc do grupo 2 em comparação ao grupo 1, indicando, portanto, o período de maior consumo de água pela cultura, devido a maior disponibilidade de energia, menor umidade do ar e maior velocidade do vento. Portanto, os valores de ETc encontrados foram um pouco inferiores, mas ainda próximos das médias obtidas por Silva et al. (2012) (5,1 mm dia⁻¹), Souza et al. (1999 apud Silva et al., 2012) (3,2 a 6,3 mm dia⁻¹), Araújo (2018) (3,4 mm dia⁻¹), Inman-Bamber & McGlinchey (2003) (5,48 ± 0,13 mm dia⁻¹) e Watanabe et al. (2004) (4,0 mm dia⁻¹).

Na Figura 3, verifica-se uma variação de ETc entre 0,735 mm dia⁻¹ e 7,241 mm dia⁻¹, sendo o máximo observado em 419 DAP (janeiro/2020). Essa diferença expressiva entre os valores máximos e mínimos pode ser explicada pela variação de Rn ao longo do período, visto que, assim como para a ETo, esta variável meteorológica também apresenta relação direta com os valores de ETc.

Figura 3. Evapotranspiração de cultura (ETc) cujos dias após o plantio apresentam déficit hídrico igual a zero.



O coeficiente de cultura é baseado na relação entre três características que distinguem a ETo da ETC, sendo a altura da planta cultivada, a resistência de superfície e o albedo da superfície cultura-solo e, dessa forma, o Kc tende a variar conforme a cultura se desenvolve e com a fração de cobertura da superfície do solo pela vegetação (Cardoso & Domingos, 2014). Sabe-se que os valores de coeficiente de cultura da cana-de-açúcar podem variar em virtude do clima, cultivar, ciclo (planta, soca e ressoça) e eventos de irrigação (Doorenbos & Kassam, 1994).

Por meio da Figura 4, percebe-se uma tendência de declínio gradual do Kc após 200 DAP. Como observado na tabela 2, verifica-se que o grupo 1 (127 a 200 DAP) apresenta uma média de Kc levemente superior ao grupo 2 (386 a 517 DAP), sendo elas muito próximas entre si. Como o grupo 1 (127 a 200 DAP) e 2 (386 a 517 DAP) representam o crescimento da cultura, nos mesmos se verificam um Kc médio de 1,399 e 1,389 (grupo 1 e 2, respectivamente), apresentando uma média entre si de 1,392, (variando de 0,62 a 2,79), sendo este um valor um pouco superior aos encontrados pelos autores Sá et al. (2015) - 1,25; Allen et al. (1998) e Doorenbos & Kassam (1994) - 1,2; Esteves et al. (2014) - 1,25; Silva et al. (2012) - 1,10; Araújo (2018) - 1,0; Pacheco et al. (1983 apud Silva, 2009) - 1,14; Inman-Bamber & McGlinchey (2003) - 0,9 a 1,5 durante do ciclo, e Cardoso & Domingos (2014) - 1,29 como Kc máximo - citados para esta fase de desenvolvimento da cultura, mas ainda assim semelhantes.

Mesmo o grupo 2 sendo 0,72% menor em relação à média de Kc do grupo 1, ambos apresentam as maiores médias de Kc de todo o ciclo da cana-de-açúcar e, portanto, representam o momento de máxima necessidade hídrica da cultura.

Ao se avaliar como se dá o comportamento de cada grupo de dados em cada uma das três Figuras (2, 3 e 4), gerou-se uma tabela contendo as médias, desvios padrão

Tabela 2. Médias, desvios padrão e coeficientes de variação dos grupos de ETo, ETC e Kc e soma de ETo e ETC no período.

Variável	Grupo 1	Grupo 2
Média ETo (mm dia ⁻¹)	1,967	2,829
Desvio padrão ETo (mm dia ⁻¹)	1,015	1,220
Coeficiente de variação (%)	51,601	43,125
Média ETC (mm dia ⁻¹)	2,597	3,754
Desvio padrão ETC (mm dia ⁻¹)	0,936	1,853
Coeficiente de variação (%)	36,042	49,361
Média Kc	1,399	1,389
Desvio padrão Kc	0,351	0,516
Coeficiente de variação (%)	25,089	37,149
Soma ETo (mm)	31,468*	96,180**
Soma ETC (mm)	41,545*	127,652**

* Somatória de 16 dias do período com dados; ** Somatória de 34 dias do período com dados.

amostrais e coeficientes de variação de cada um deles.

Os grupos 1 e 2 apresentam individualmente um total de 16 e 34 dados, respectivamente, estando eles distribuídos entre os dias 127 a 200 DAP (grupo 1) e 386 a 517 DAP (grupo 2).

Por meio dos dados obtidos na Tabela 2, pode-se verificar que, para quase todas as variáveis e grupos, houve um alto coeficiente de variação, indicando, portanto, uma elevada dispersão e dados heterogêneos.

A Figura 5 demonstra a ETo em relação a ETC considerando a junção dos dois grupos de dados. Ao se usar uma linha de tendência linear, verifica-se uma relação positiva entre os valores de ETo e ETC, sendo 59,73% da variação de ETC explicada pela ETo. O valor-p obtido com 99% de confiança foi de $1,9 \times 10^{-11}$ e se mostra altamente significativo.

Estas informações são úteis para se verificar como as variáveis climáticas que constituem o cálculo da ETo se relacionam com a ETC da cana-de-açúcar. Como resultado, ao se avaliar o R², verifica-se que o modelo matemático

Figura 4. Coeficiente de cultura (Kc) cujos dias após o plantio apresentam déficit hídrico igual a zero.

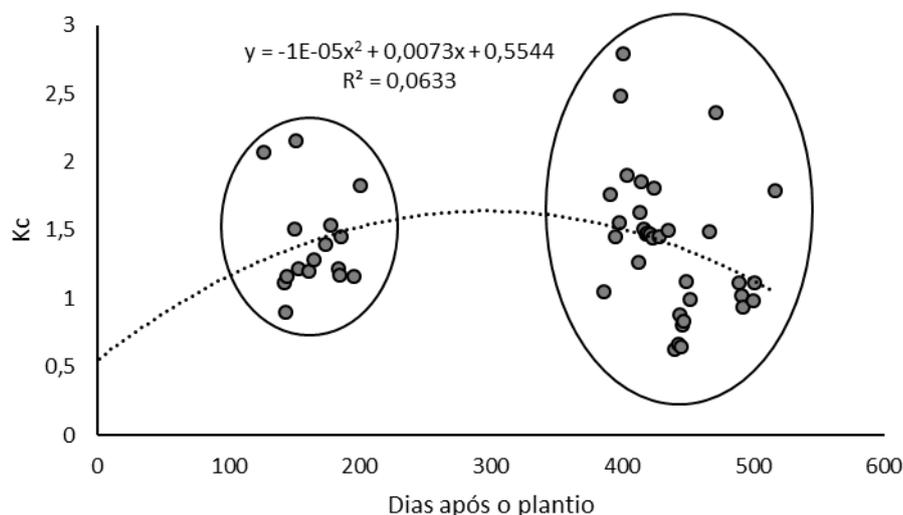
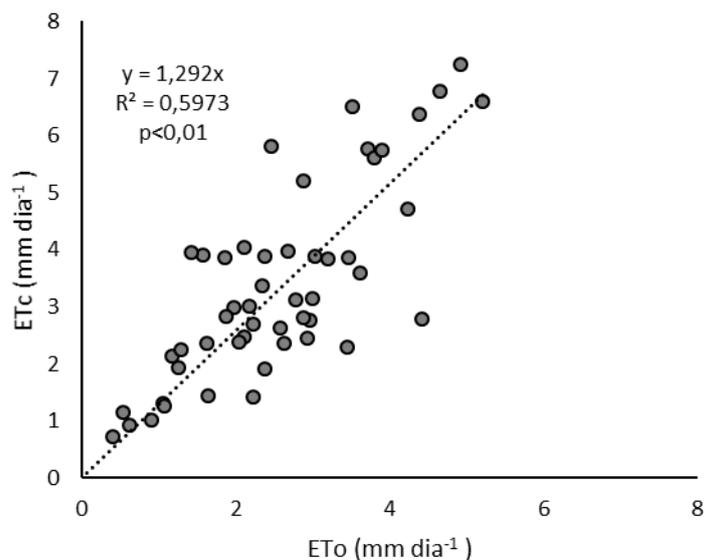


Figura 5. Relação entre evapotranspiração de referência (ET_o) e de cultura (ET_c) dos dois grupos de dados cujos dias apresentam déficit hídrico igual a zero.



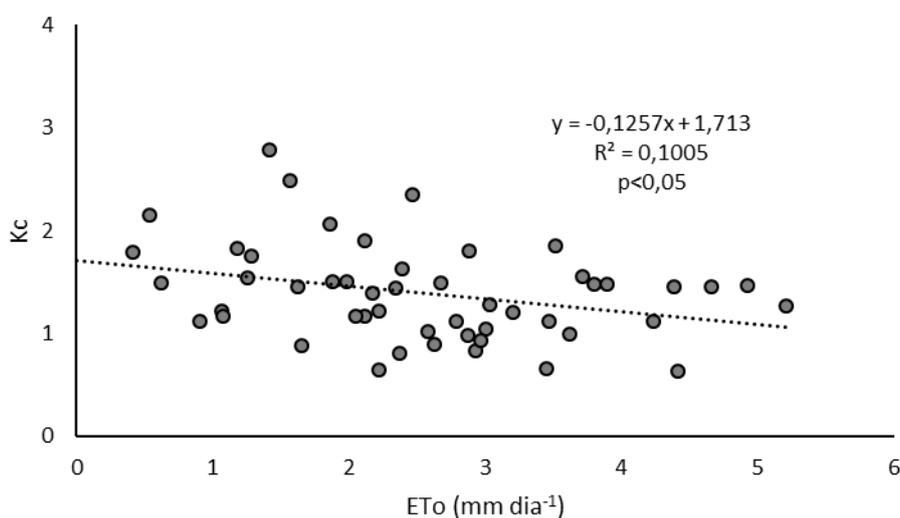
demonstrado pelas equações consegue representar relativamente bem aquilo que ocorre na prática, ou seja, como as variáveis climáticas afetam a ET_c da cana-de-açúcar, de modo que, quanto maior a ET_o, maior a ET_c.

A Figura 6 demonstra a ET_o em relação ao K_c considerando a junção dos dois grupos de dados. Ao se usar uma linha de tendência linear, verifica-se uma relação relativamente negativa entre os valores de ET_o e K_c concordando, portanto, com os resultados de Marin et al. (2016). Isso pode ser explicado pela restrição da perda de água por transpiração devido ao aumento das resistências internas da planta ao transporte de água, principalmente através do fechamento estomático, quando as mesmas estão submetidas a um ambiente com condições de alta demanda hídrica atmosférica (Mcnaughton & Jarvis, 1983; Marin et al., 2016, 2020). Em outras palavras, isso significa que as plantas de

cana-de-açúcar têm a capacidade de controlar a transpiração à medida que há aumento de ET_o, havendo, portanto, diferentes valores de K_c para pequenas diferenças de ET_o (Marin et al., 2020). O valor-p obtido com 95% de confiança foi de 0,024905, sendo assim significativo. Percebe-se que o R² foi de 0,1005 sendo considerado, portanto, bem baixo.

Estas informações são úteis para se verificar como as variáveis climáticas que constituem o cálculo da ET_o se relacionam com o K_c da cana-de-açúcar, ou seja, como o K_c reage com as mudanças das variáveis meteorológicas. Como resultado, verifica-se que, como o valor de R² é baixo, pouco da variação do K_c pode ser explicada pelas variáveis meteorológicas que compõem o cálculo da ET_o.

Figura 6. Relação entre evapotranspiração de referência (ET_o) e coeficiente de cultura (K_c) dos dois grupos de dados cujos dias apresentam déficit hídrico igual a zero.



Conclusões

A partir das análises realizadas no presente estudo, pôde-se concluir que:

As médias de ETC no grupo 1 e 2 foram de 2,597 mm dia⁻¹ e 3,754 mm dia⁻¹, respectivamente. Dessa forma, apesar de haver certas variações dos dados de cada grupo, percebe-se uma proximidade entre eles. A ETC média considerando os grupos 1 e 2 foi de 3,38 mm dia⁻¹.

As médias de Kc no grupo 1 e 2 foram de 1,399 e 1,389, respectivamente. O Kc médio considerando os grupos 1 e 2 foi de 1,392.

Dado que o Kc obtido foi similar ao encontrado na literatura e que a ETo calculada se baseou no método de Penman-Monteith (método recomendado pela FAO para este tipo de estimativa), verifica-se que, por mais que os valores médios de ETC encontrados para a cana-de-açúcar para esta fase de desenvolvimento tenham sido relativamente inferiores a aqueles citadas na literatura, os dados mesurados pelo lisímetro estão corretos e, portanto, podem representar a ETC da cana-de-açúcar.

Verifica-se uma relação positiva entre ETo e ETC e uma relação relativamente negativa entre ETo e Kc.

Por meio deste estudo, foi possível obter informações mais precisas dos valores de ETC e Kc da cana-de-açúcar durante a fase crescimento, os quais podem ser relacionados diretamente com o cálculo de lâminas de irrigação para a cultivar RB867515 em Piracicaba, SP, garantindo, portanto, uma base para o uso correto e sustentável dos recursos hídricos na agricultura irrigada.

Contribuições dos autores

V. H. NEVES concepção do trabalho, aquisição e análise dos dados e redação do artigo. L. G. GASPAROTTO, W. WOLF e M. V. FOLEGATTI aquisição dos dados e revisão do artigo. F. R. MARIN concepção do trabalho, aquisição dos dados e revisão do artigo.

Referências

AGUIRRE, A. F. L.; NOGUEIRA, D. A.; BEIJO, L. A. Análise da temperatura máxima de Piracicaba (sp) via distribuição GEV não estacionária: uma abordagem bayesiana. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 27, n. 0, 21 set. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v27i0.73763>

ALLEN, R.G.; HOWELL, T.A.; PRUITT, W.O.; WALTER, I.A.; JENSEN, M.E. Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements. Honolulu, Hawaii: *Amer Society of Civil Engineers*, 1991. 456 p.

ALENCAR, L. P.; SEDIYAMA, G. C.; MANTOVANI, E. C.; MARTINEZ, M. A. Tendências recentes nos elementos do clima e suas implicações na evapotranspiração da cultura do milho em Viçosa - MG. *Engenharia Agrícola*, v. 31, n. 4, p. 631-642, 2011. DOI: 10.1590/S0100-69162011000400002.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Table of Contents Originated by : Agriculture Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - *FAO Irrigation and drainage paper 56*. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, p. 1-7, 1998.

ALMEIDA, A. C. S.; SOUZA, J. L.; TEODORO, I.; BARBOSA, G. V. S.; FILHO, G. M.; JÚNIOR, R. A. F. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 32, n. 5, p. 1441-1448, 2008. DOI: 10.1590/S1413-70542008000500013.

ARAÚJO, A. L. F. de. Determinação do coeficiente de cultivo da cana-de-açúcar de ano. 2018. 52p. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados.

BARBIERI, V. Medidas e estimativas de consumo hídricos em cana-de-açúcar (*Saccharum ssp.*). 1981. 82p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

C MARA, G. M. de S. Fenologia é ferramenta auxiliar de técnicas de produção. *Visão Agrícola*, v. 5, p. 4, 2006.

CARDOSO, G. G. G.; DOMINGOS, R. M. O. Coeficiente de cultivo da cana-de-açúcar irrigada subsuperficialmente em lisímetro de drenagem no estado de Goiás. *XLIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola (COMBEA)*, 2014.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. *Efeito da água no rendimento das culturas*. Campina Grande: UFPB, 1994. 306 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33)

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H.; BENTVELSEN, C.L.M.; BRANSCHIED, V.; PLUSJE, J. M. G. A.; SMITH, M.; UITTENBOGAARD, G.O.; WAL, H. K. V. D. Yield Response to Water. In: *Irrigation and Agricultural Development*. [s.l.] Elsevier, 1980. p. 257-280.

ESTEVES, B. D. S.; SOUSA, E. F.; MENDONÇA, J. C.; LOUSADA, L. L.; MARCIANO, C. R.; SIQUEIRA, D. P. et al. Coeficiente de cultivo da cana-de-açúcar utilizando a razão de Bowen. *Irriga*, v. 19, n. 3, p. 441, jul. 2014.

FARAHANI, H. J.; HOWELL, T. A.; SHUTTLEWORTH, W. J.; BAUSCH, W. C. Evapotranspiration: Progress in Measurement and Modeling in Agriculture. *Transactions of the ASABE*, v. 50, n. 5, p. 1627-1638, 2007. DOI: 10.13031/2013.23965.

FLUMIGNAN, D. L. *Lisímetros de pesagem direta para o estudo do consumo hídrico do pinhão-manso (jatropha curcas L.)*. 2011. 202p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

GONÇALVES, F. M. *Evapotranspiração e coeficientes de cultivo da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial*. 2010. 65p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

INMAN-BAMBER, N. G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. *Field Crops Research*, v. 89, n. 1, p. 107-122, 10 set. 2004. DOI: 10.1016/j.fcr.2004.01.018.

INMAN-BAMBER, N. G.; MCGLINCHEY, M. G. Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term Bowen ratio energy balance measurements. *Field Crops Research*, v. 83, n. 2, p. 125-138, 20 ago. 2003. DOI: 10.1016/S0378-4290(03)00069-8.

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. *Field Crops Research*. *Anais*. Elsevier, 14 jun. 2005. DOI: 10.1016/j.fcr.2005.01.023.

JUNIOR, E. G. C.; MEDEIROS, J. F. D.; MELO, T. K. D.; SOBRINHO, J. E.; BRISTOT, G.; ALMEIDA, B. M. D. Necessidade hídrica da cultura do girassol irrigado na chapada do Apodi. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, n.3, p.261-267, 2013.

MARIN, F. R.; THORBURN, P. J.; NASSIF, D. S. P.; COSTA, L. G. Sugarcane model intercomparison: Structural differences and uncertainties under current and potential future climates. *Environmental Modelling & Software*, v. 72, p. 372-386, 1 out. 2015. DOI: 10.1016/j.envsoft.2015.02.019.

- MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R.; NASSIF, D. S. P.; COSTA, L. G.; VIANNA, M. S.; CARVALHO, K. S. Crop coefficient changes with reference evapotranspiration for highly canopy-atmosphere coupled crops. **Agricultural Water Management**, v. 163, p. 139–145, 1 jan. 2016. DOI: 10.1016/j.agwat.2015.09.010.
- MARIN, F. R.; INMAN-BAMBER, G.; SILVA, T. G. F.; VIANNA, M. S.; NASSIF, D. S. P.; CARVALHO, K. S. Sugarcane evapotranspiration and irrigation requirements in tropical climates. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 140, n. 3–4, p. 1349–1357, 1 maio 2020. DOI: 10.1007/s00704-020-03161-z.
- MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R.; NASSIF, D. S. P.; VIANNA, M. S.; PILAU, F. G.; SILVA, E. H. F. M. D.; SOBENKO, L. R.; GONÇALVES, A. O.; PEREIRA, R. A. A.; CARVALHO, K. S. Revisiting the crop coefficient–reference evapotranspiration procedure for improving irrigation management. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 138, n. 3–4, p. 1785–1793, 1 nov. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02940-7>
- MCNAUGHTON, K. G.; JARVIS, P. G. Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation. In: Kozłowski, T. T. (Ed.). **Water deficit and plant growth**. v. 7 p. 2–42, 2013.
- NETO, J. D.; FIGUEREDO, J. L. D. C.; FARIAS, C. H. D. A.; AZEVEDO, H. M. D.; AZEVEDO, C. A. V. D. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 283–288, 2006. DOI: 10.1590/S1415-43662006000200006.
- PEREIRA, A.R.; SEDIYAMA, G.C.; NOVA, N.A.V. **Evapotranspiração**. Campinas: Fundag, 2013. 323p.
- PINHEIRO, M. P. M. A.; SANTOS, M. A. D.; SANTOS, D. P. D.; REIS, L. S.; CARNEIRO, P. T. Determinação da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar por lisímetros de pesagem e estimativa da evapotranspiração de referência através dos métodos de Hargraves-Samani e Tanque Classe A. **Revista Cultivando o saber**, v. 8, n. 4, p. 427–441, 2015. ISSN 2175-2214.
- RAKS. A cana-de-açúcar irrigada no enfrentamento da estiagem. 2021. Disponível em: <<https://raks.com.br/a-cana-de-acucar-irrigacao-estiagem/>>. Acessado em: Dez. 10 2022.
- SÁ, L. A.; LIMA, R. A. S.; GOMES, A. R. A.; SILVA, M. B. P.; BRITO, K. S.; HOLANDA, L. A.; TEODORO, I.; LYRA, G. B. Crescimento da cana-de-açúcar em função da temperatura do ar nos tabuleiros costeiros de Alagoas. **XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**, 2011.
- SÁ, M. J. S.; CAMARGO, N. D. A.; SILVA, J. E. F.; CARDOSO, G. G. D. G. Determinação do coeficiente de cultivo da cana-de-açúcar de ano. IV Congresso Estadual de Iniciação Científica do IF Goiano, 2015.
- SANTOS, M. A. L. dos. Irrigação suplementar da cana-de-açúcar (Saccharum spp): Um modelo de análise de decisão para o Estado de Alagoas. 2005. 101p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- SILVA, T. G. F. DA. Análise de crescimento, interação biosfera-atmosfera e eficiência do uso da água da cana-de-açúcar irrigada no Submédio do Vale do São Francisco. 2009. 194p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
- SILVA, T. G. F. D.; MOURA, M. S. B. D.; ZOLNIER, S.; J. M. S.; VIEIRA, V. J. D. S.; JÚNIOR, W. G. F. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 1, p. 64–71, 2012. DOI: 10.1590/S1415-43662012000100009.
- SOUSA, I. F.; NETTO, A. O. A.; CAMPECHE, L. F. M. S.; BARROS, A. C.; SILVA, V. D. P. R. D.; AZEVEDO, P. V. D. Large-scale weighing lysimeter. Part II: Water requirements of the irrigated dwarf-green coconut. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 5, p. 526–532, 2011.
- SUGUITANI, C. Entendendo o crescimento e produção da cana de açúcar: avaliação do modelo Mosaic. 2006. 62p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- VELLAME, L. M.; FILHO, M. A. C.; COELHO, E. F.; JÚNIOR, E. F. F. Lisímetro de pesagem e de lençol freático de nível constante para uso em ambiente protegido. **Universidade Federal Rural do Semi-Árido**, v. 25, p. 153–159, 2012. ISSN 1983-2125.
- VIANA, T. V. D. A. Evapotranspiração obtida com o sistema razão de Bowen e com um lisímetro de pesagem em ambiente protegido. 2000. 155p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- WATANABE, K.; YAMAMOTO, T.; YAMADA, T.; SAKURATANI, T.; NAWATA, E.; NOICHANA, C.; SRIBUTTA, A.; HIGUCH, H. Changes in seasonal evapotranspiration, soil water content, and crop coefficients in sugarcane, cassava, and maize fields in Northeast Thailand. **Agricultural Water Management**, v. 67, n. 2, p. 133–143, 15 jun. 2004. DOI: 10.1016/j.agwat.2004.02.004.

REFERENCIAÇÃO

NEVES, V.H.; GASPAROTTO, L.G.; WOLF, W.; FOLEGATTI, M.V.; MARIN, F.R. Evapotranspiração da cana-de-açúcar mensurada em lisímetro de pesagem eletrônico de grande porte. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.31, e027046, 2023.



Sugarcane evapotranspiration measured in a large electronic weighing lysimeter

Victor Henrique Neves¹, Leticia Gonçalves Gasparotto¹, Wagner Wolf², Marcos Vinicius Folegatti¹ and Fábio Ricardo Marin^{1(*)}

¹Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Av. Pádua Dias, 11, CEP 13418-900 Piracicaba, SP, Brazil.

E-mails: victorneves252@gmail.com, fabio.marin@usp.br, leticiagasparotto@usp.br, wwolff7@gmail.com and mvfolega@usp.br

(*)Corresponding author.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 08 May 2022

Accepted 27 January 2023

Index terms:

irrigation

crop coefficient

water deficit

ABSTRACT

Understanding the dynamics between reference evapotranspiration (ET_o), crop evapotranspiration (ET_c) and crop coefficient (K_c) is fundamental in irrigation. The objective of this study was to analyze the relationship between a database of sugarcane ET_c measured by a large electronic weighing lysimeter and the calculated K_c and ET_o. The lysimeter is installed in an area located in the city of Piracicaba, SP, Brazil, in a sugarcane plantation of the RB867515 variety. For the analysis ET_o was estimated by the Penman-Monteith method and the selection of ET_c data, ET_o, ET_c and K_c were selected based on the days in which K_c was equal to or less than four. Subsequently, the data where the days presented water deficit greater than zero were excluded and all those close together before 201 days were grouped (group 1) and all those close together after 385 days were grouped (group 2). The average ET_c during the growing season considering groups 1 and 2 was 3.38 mm day⁻¹ and the average K_c obtained in these groups was 1.39. The result obtained can help in the correct calculation of the irrigation blade in the crop.

© 2023 SBAgro. All rights reserved.

CITATION

NEVES, V.H.; GASPAROTTO, L.G.; WOLF, W.; FOLEGATTI, M.V.; MARIN, F.R. Evapotranspiração da cana-de-açúcar mensurada em lisímetro de pesagem eletrônico de grande porte. *Agrometeoros*, Passo Fundo, v.31, e027046, 2023.