

REANALISANDO O EFEITO DA RESISTÊNCIA DE SUPERFÍCIE PARA O MODELO DE PENMAN-MONTEITH

Rodolfo Armando de Almeida Pereira¹; Alexandre Ortega Gonçalvez¹; Evandro Henrique Figueiredo Moura da Silva¹; Luiz Roberto Angelocci¹; Marcos Vinícius Folegatti¹
Autor para correspondência: rodolfopereira@usp.br

¹Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Universidade de São Paulo - ESALQ/USP

RESUMO

O método de Penman-Monteith parametrizado e recomendado pela *Food and Agriculture Organization* (FAO) no boletim nº56 de Irrigação e Drenagem é tido como a melhor maneira de se estimar a evapotranspiração de referência (ET_o). Porém, mesmo sendo um método amplamente testado e aplicado em diversas partes do mundo, uma linha de trabalhos mostra uma tendência de queda do coeficiente de cultivo (K_c) em função do aumento da ET_o. Apesar de evidente, tal tendência ainda não foi completamente compreendida, mas tem-se evidências de que a parametrização da resistência a superfície (r_s) feita pela FAO pode ter papel importante na explicação desse mecanismo. O objetivo do trabalho é investigar diferentes valores de r_s e averiguar se existe alguma explicação para a tendência de queda do K_c em função do aumento de ET_o. Para tanto, um experimento foi conduzido sobre gramado irrigado para quantificação da evapotranspiração e dos valores de r_s . Os valores de r_s obtidos a partir da resistência estomática variaram 30 a 551 s.m⁻¹, com média de 224 s.m⁻¹, desvio padrão de 110 s.m⁻¹ e moda de 170 s.m⁻¹. A parametrização usando os valores medidos não foram satisfatórios, subestimando os valores de ET_o. O melhor ajuste foi de 96 s.m⁻¹ obtido com um método iterativo. Constatou-se que o método da FAO apresentou superestimativa para ET_o < 2mm.d⁻¹, e que talvez os valores de ET_o para esse intervalo justifique, em parte, a tendência de queda do K_c em função do aumento de ET_o.

PALAVRAS-CHAVE: evapotranspiração de referência (ET_o); coeficiente de cultivo (K_c); irrigação

REASSESSING THE ROLE OF SURFACE RESISTANCE ON THE PENMAN-MONTEITH

ABSTRACT

The Penman-Monteith method was developed by Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) in paper nº56 of Irrigation and Drainage is a reference evapotranspiration (ET_o). However, although a method widely tested and applied in several parts of the world, a line of works shows a tendency of decrease of the crop coefficient (K_c) in function the increase of ET_o. This fall has not yet been fully explained, so the parameterization of surface resistance (r_s) by the FAO appears as hypothesis, since it is a parameter that is directly related to vegetated surface. Thus, the objective of the work is to investigate different values of r_s and to investigate if there is any explanation for the tendency of K_c to all as a function of the increase of ET_o. The values of r_s obtained from the stomatal resistance ranged from 30 to 551 s.m⁻¹, with average of 224 s.m⁻¹, standard deviation of 110 s.m⁻¹ and a fashion of 170 s.m⁻¹. The parameterization using the measured values was not satisfactory, underestimating the values of ET_o. The best fit was 96 s.m⁻¹, obtained numerically using the Solver. It was found that the FAO method presented an overestimation for ET_o < 2 mm.d⁻¹, and that perhaps the ET_o values for this interval partially justify the downward trend of K_c as a function of the ET_o increase

KEY-WORDS: reference evapotranspiration (ET_o); crop coefficient (K_c); irrigation

INTRODUÇÃO

O uso da água na agricultura tem como um de seus pilares a metodologia para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) publicada pela *Food and Agriculture Organization* (FAO) no boletim nº 56 de Irrigação e Drenagem (ALLEN et al., 1998). Esse método foi e é amplamente difundido e aceito na maior parte do mundo em aplicações na irrigação e em estudos sobre consumo hídrico de diversas culturas (ALLEN et al., 2005). O uso desse método alinhado ao coeficiente de cultivo (K_c) é uma forma prática de se obter a evapotranspiração de cultura (ET_c), já que mensurar a ET_c é pouco aplicável em situações práticas.

A aplicação do K_c em estudos relacionados ao consumo hídrico é amplamente difundida. Nos últimos anos, alguns autores notaram que existe uma tendência de queda nos valores de K_c em relação ao aumento da ET_o. Esse padrão foi observado primeiro para cana de açúcar, citros e café (MARIN et al., 2005, 2016; MARIN; ANGELOCCI, 2011) e depois para o milho (Sobenko et al., 2018). A justificativa para essa queda, até então, era que o K_c indicava essa queda em consequência do alto acoplamento dessas culturas com a atmosfera, seguindo a abordagem física proposta por Jarvis e McNaughton (1986). Porém, o padrão de queda no K_c foi observado também para a cultura da soja, que não apresentava os mesmos níveis de acoplamento copa-atmosfera observada nas culturas anteriores (SILVA et al., 2019).

Nesse sentido, a investigação voltou-se para o método de ET_o parametrizado pela FAO. A parametrização da FAO teve origem a partir da equação de Penman (1948), que combinou o balanço de energia com o método de transferência de massa e derivou a equação para calcular a evaporação de uma superfície de água aberta a partir de dados meteorológicos (ALLEN et al., 1998; PENMAN, 1948). Diversos pesquisadores desenvolveram esse método aplicando em superfícies que não fossem corpos de água e introduziram fatores de resistência, como a resistência aerodinâmica (r_a) e de superfície (r_s), chegando por fim a equação utilizada atualmente (ALLEN et al., 1998). Essas duas resistências foram parametrizadas considerando uma cultura hipotética com 0,12 m de altura e albedo de 0,23, em suma a r_a foi simplificada para uma função da velocidade do vento medido a 2 metros de altura e a r_s teve valor fixado em 70 s.m⁻¹ (ALLEN et al., 1998).

A parametrização de r_s é uma das mais investigadas na literatura quando se trata na estimativa da ET_o, pois está diretamente relacionada a resposta da planta as condições ambientais, já que é função da resistência estomática e, conseqüentemente, está ligada ao transporte de água para atmosfera. Esta variável, como destacada por ALLEN et al., (2005) tem grande variabilidade espaço-temporal, com sugestões de os calculos de ET_o para períodos de 1h o valor de r_s deve variar para o período noturno e diurno numa tentativa de aprimorar a qualidade da estimativa da ET_o.

OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo do trabalho foi investigar os valores de r_s e discutir sua parametrização na equação da ET_o, bem como contribuir para a compreensão do mecanismo por trás da tendência de queda do K_c em relação ao aumento de ET_o.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área Experimental

O experimento foi conduzido na área experimental da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo, localizada em Piracicaba, (latitude 22°42’56’’S, longitude 47°38’33’’O, altitude 511m). O clima é classificado como Cwa e o solo é classificado como Nitossolo Vermelho eutrófico. A umidade na capacidade de campo (θ_{cc}) foi de 0,370 m³.m⁻³ e a umidade no ponto de murcha permanente foi de 0,270 m³.m⁻³.

As variáveis meteorológicas foram mensuradas a cada segundo e a média a cada cinco minutos era armazenada em uma datalogger (CR1000; Campbell Scientific, Inc). Os sensores utilizados para a coleta dos dados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Instrumentação utilizada para medições das variáveis meteorológicas e umidade do solo.

Variáveis	Modelo
Temperatura e umidade relativa do ar	HMP155 – VAISALA
Sensor de fluxo de calor no solo	HFP01 – Hukseflux
Saldo de radiação	NR-Lite 2 – Kipp & Zone
Velocidade do Vento	Anemômetro MET One
Precipitação	TE525MM – Texas Instruments
Umidade Volumétrica	CS616 – Campbell Scientific Inc.

Resistência a superfície – (r_s)

Medidas da resistência estomática (r_l) foram realizadas com porômetros de equilíbrio dinâmico (modelo Delta T, AP4), em diferentes períodos ao longo do experimento, totalizando 6 campanhas de medições e em cada campanha eram feitas de 5 medições ao dia em pelo menos 10 folhas.

A r_s descreve a resistência do fluxo de vapor de água através das aberturas dos estômatos, da área foliar e da superfície do solo (Allen et al., 1998). A parametrização recomendada pelo boletim 56 da FAO (FAO56) é que r_s seja de 70 s.m^{-1} , para que represente uma superfície do solo moderadamente seca, resultante de uma frequência semanal de irrigação (Allen et al., 1998).

A r_s para vegetação com cobertura continua é calculada como uma função da área foliar efetiva, assumindo que todas as folhas funcionam como resistores em paralelo (ALLEN et al., 2005), em que:

$$r_s = \frac{r_l}{LAI_{ef}} \quad \text{Eq. (108)}$$

onde r_s é dado em s.m^{-1} , r_l é a resistência estomática de uma folha iluminada (s.m^{-1}) e LAI_{ef} é a índice de área foliar efetivo ($\text{m}^2[\text{área foliar}].\text{m}^{-2}[\text{solo}]$). Para grama a FAO56 assumi que $LAI_{ef} = 0,5 * LAI$, $LAI = 24h$ e que a altura da grama é igual $0,12 \text{ m}$, assim a equação 1 foi simplificada para:

$$r_l = \frac{r_l}{(0,5 \cdot 24 \cdot 0,12)} = \frac{r_l}{1,44} \quad \text{Eq. (109)}$$

Resistência Aerodinâmica – (r_a)

A transferência de calor e vapor de água da superfície de evaporação para o ar acima do dossel foi determinada pela resistência aerodinâmica:

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{z_m-d}{z_{om}}\right] \cdot \ln\left[\frac{z_h-d}{z_{oh}}\right]}{k^2 \cdot u_z} \quad \text{Eq. (110)}$$

em que r_a é dados em s.m^{-1} ; z_m é altura que o vento foi medido (no caso à 2 m); z_h altura que a umidade relativa foi medida (2 m); d é o deslocamento do plano zero (m); z_{om} comprimento da rugosidade para transferência de momento (m); z_{oh} comprimento da rugosidade para transferência de calor e vapor (m); k é constante de Karman (0,41); u_z é a velocidade do vento medido na altura z (m.s^{-1}) (Allen et al., 1998). Como a gramado foi mantido nas condições de altura recomendadas pela FAO56 e os sensores também, a equação 3 foi simplificada para:

$$r_a = \frac{208}{u_2} \quad \text{Eq. (111)}$$

Evapotranspiração de Referência ETo

A evapotranspiração de referência foi calculada seguindo as recomendações FAO56, sendo calculada da seguinte maneira:

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot s \cdot (Rn - G) + \gamma \cdot \frac{900}{(T_{ar} + 273)} \cdot u_2 \cdot \Delta_e}{s + \gamma \cdot (1 + C_d \cdot u_2)} \quad \text{Eq. (112)}$$

em que s é a curva de pressão de saturação, Rn é o saldo de radiação ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$); G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$); γ é a constante psicrométrica ($0,063441 \text{ } ^\circ\text{C.kPa}^{-1}$); T_{ar} é a temperatura média do ar ($^\circ\text{C}$); U_2 é a velocidade média do vento medida a 2 metros (m.s^{-1}); Δ_e é o déficit de pressão de vapor (kPa); $C_d = r_s/r_a$ (Allen et al., 1998). É importante lembrar que os valores de r_s foram alterados para testar novas parametrizações, consequentemente alterando o valor de C_d .

Razão de Bowen – (ET_{bw})

O MRB estima o fluxo de calor latente (LE) usando medidas à superfície dos gradientes de temperatura e umidade do ar, saldo de radiação e fluxo de calor no solo.

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{\Delta T}{\Delta e_a} \cdot \gamma \quad \text{Eq. (113)}$$

$$ET_{bw} = \frac{Rn - G}{(1 + \beta) \cdot \lambda} \quad \text{Eq. (114)}$$

em que ET_{bw} é a evapotranspiração para gramado dada em mm.dia^{-1} ; Rn é o saldo de radiação medido sobre a superfície vegetada ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$); G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$); ΔT é o gradiente da temperatura do ar medida nos dois níveis pelos termohigrometros ($^{\circ}\text{C}$); Δe_a é a diferença de pressão atual de vapor do ar; λ é o calor latente de evaporação (MJ.Kg^{-1}); γ ($0,063441 \text{ } ^{\circ}\text{C.kPa}^{-1}$) é a constante psicrométrica.

Righi (2004), afirmou que o Método da Razão de Bowen (MRB) pode apresentar incoerência nos valores. Nesse sentido foi aplicado a metodologia proposta por Perez et al., (PEREZ et al., 1999) para considerar apenas os dados que apresentam consistência física, evitando possíveis erros de estimativa

RESULTADOS E DISCUSSÃO

RESULTADOS

Os valores de r_s medidos variaram de 30 a 551 s.m^{-1} , com valor médio de 224 s.m^{-1} e desvio padrão de 110 s.m^{-1} , tendo um coeficiente de variação (σ/μ) de 48,97 %. Baseado no teste de Shapiro-Wilk, com $p\text{-valor} = 0,00017$, foi rejeitada a hipótese nula, ou seja, a distribuição normal não se ajustou aos valores de r_s medidos em campo.

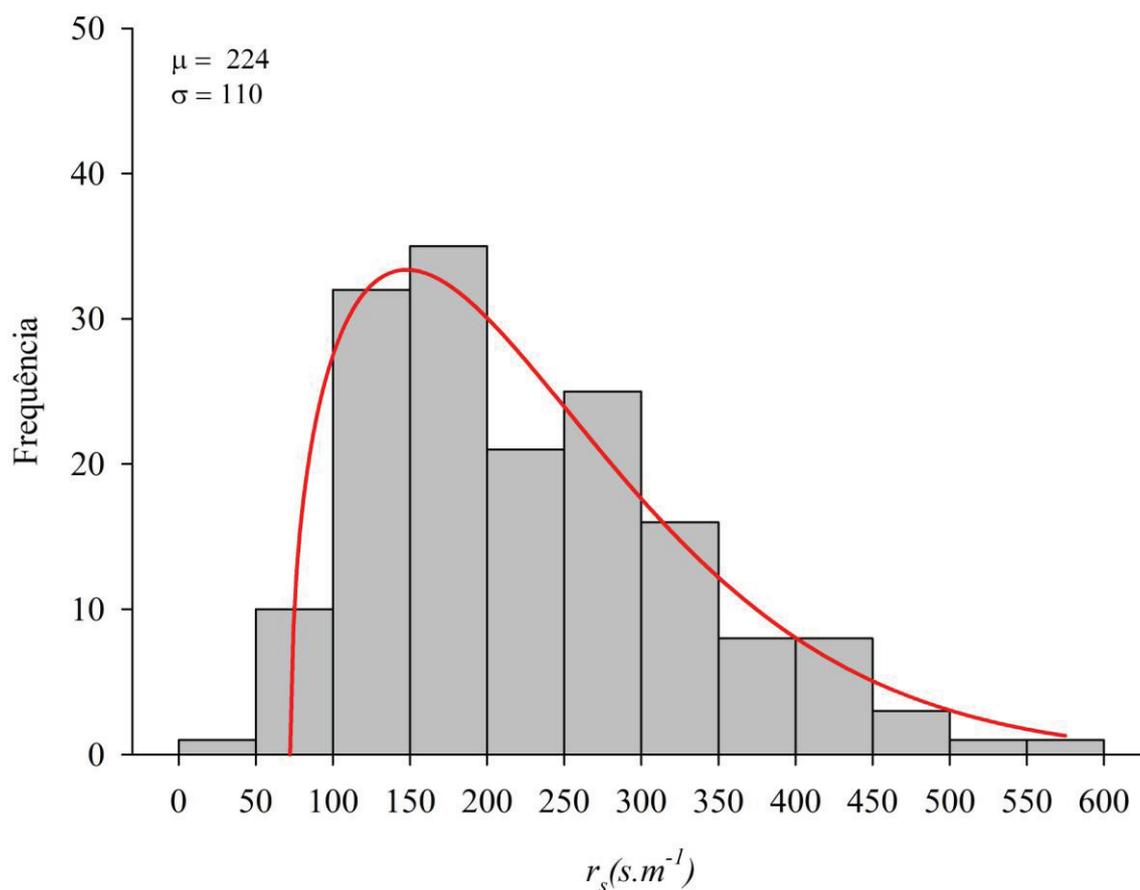


Figura 1. Distribuição de frequência da resistência a cobertura (r_s) para a grama considerando $\theta > 0,350 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ (μ = média; σ = desvio padrão).

O valor médio de r_s (224 s.m^{-1}) para a parametrização da equação de PM subestimou os valores de E_{T0} (Figura 2E), assim como a parametrização usando a moda de r_s (170 s.m^{-1}) (Figura 2C). Entretanto para a $r_s = 170 \text{ s.m}^{-1}$ a subestimativa foi mais evidente a partir de valores de E_{T0} superiores à 2 mm.d^{-1} . Uma terceira parametrização foi obtida a partir da otimização da Raiz Quadrada Média do Erro (RQME) utilizando o *Solver*. Para essa parametrização o ajuste foi bom, porém subestimou valores quando E_{T0} foi maior que 5 mm.d^{-1} (Figura 2B). Considerando o coeficiente angular a parametrização para $r_s = 70 \text{ s.m}^{-1}$ foi a que obteve o melhor ajuste, mas foi o que teve menor R^2 , o que resultou em uma maior dispersão.

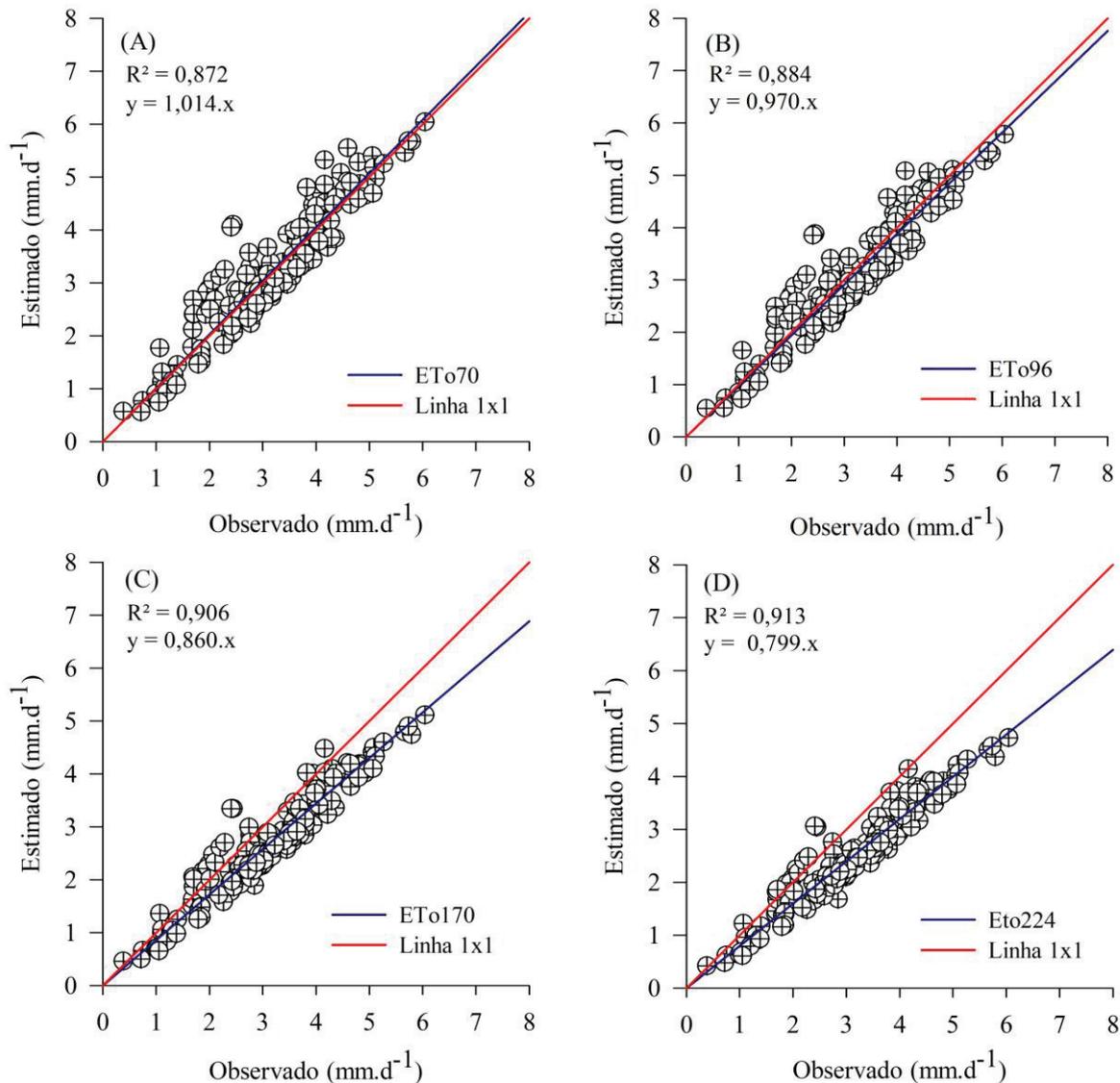


Figura 2. Dispersão entre valores observados de ETo (Razão de Bowen) e estimados para diferentes valores de rs: (A) 70 s.m-1, (B) 96 s.m-1, (C) 170 s.m-1 e (D) 224 s.m-1.

O coeficiente angular entre a razão da evapotranspiração de referência para r_s (ET₀₇₀) e a ET_{bw} diminuiu conforme os valores de ET₀₇₀ aumentaram, esse padrão foi causado por uma maior dispersão dos dados no intervalo de ET₀₇₀ < 2 mm.d⁻¹ (Figura 3A). O método ET₀₇₀, superou a evapotranspiração máxima (ET_{0Max} = (Rn-G)/2,45) em 10,5 % dos dias avaliados, resultando em 17 dias dos 162 analisados. Mesmo assim, no geral, o ET₀₇₀ representou 86,3 % da ET_{0Max} quando o conjunto de dados foi analisado sem critérios de intervalo (Figura 3B).

Os resultados por intervalos de ET₀₇₀, indicou que o método estimou valores superiores a energia disponível no sistema para os intervalos de ET₀₇₀ inferiores a 4 mm.d⁻¹ (Figura 4). Para o intervalo ET₀₇₀ < 2 mm.d⁻¹ o método superestimou aproximadamente 18 %, e 19% para o intervalo $2 \leq ET_{070} < 4$ mm.d⁻¹ (Tabela 1).

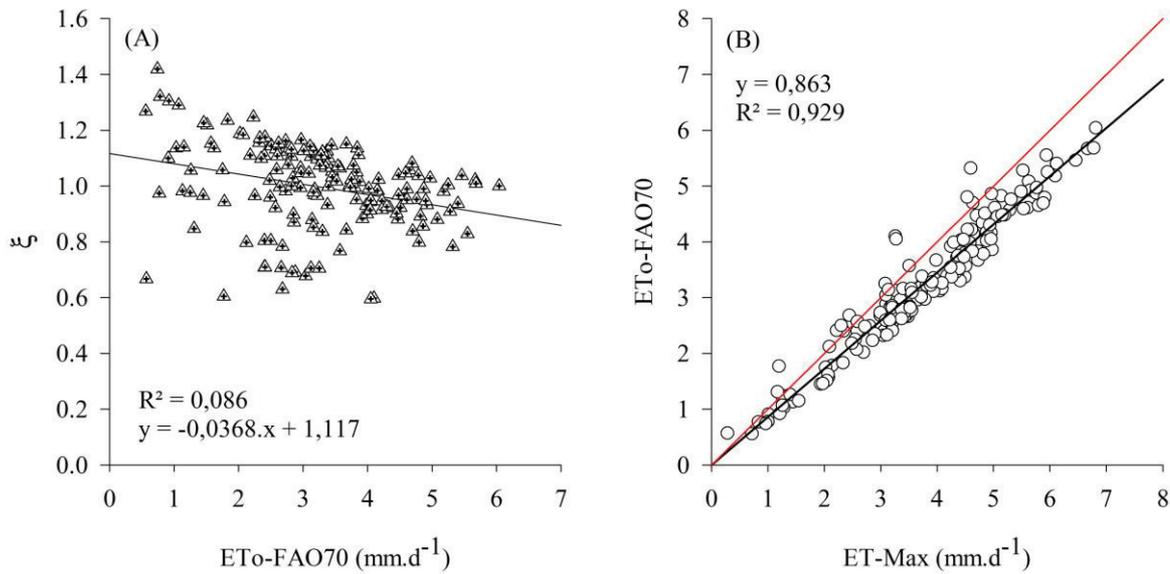


Figura 3. (A) Relação entre coeficiente angular da razão de: $\xi = ET_{bw} / ET_{070}$; (B) Relação entre a ET_0 calculada para $r_s = 70 \text{ s.m}^{-1}$ e a ET_0 máxima, calculada por $(R_n - G) / 2,45$.

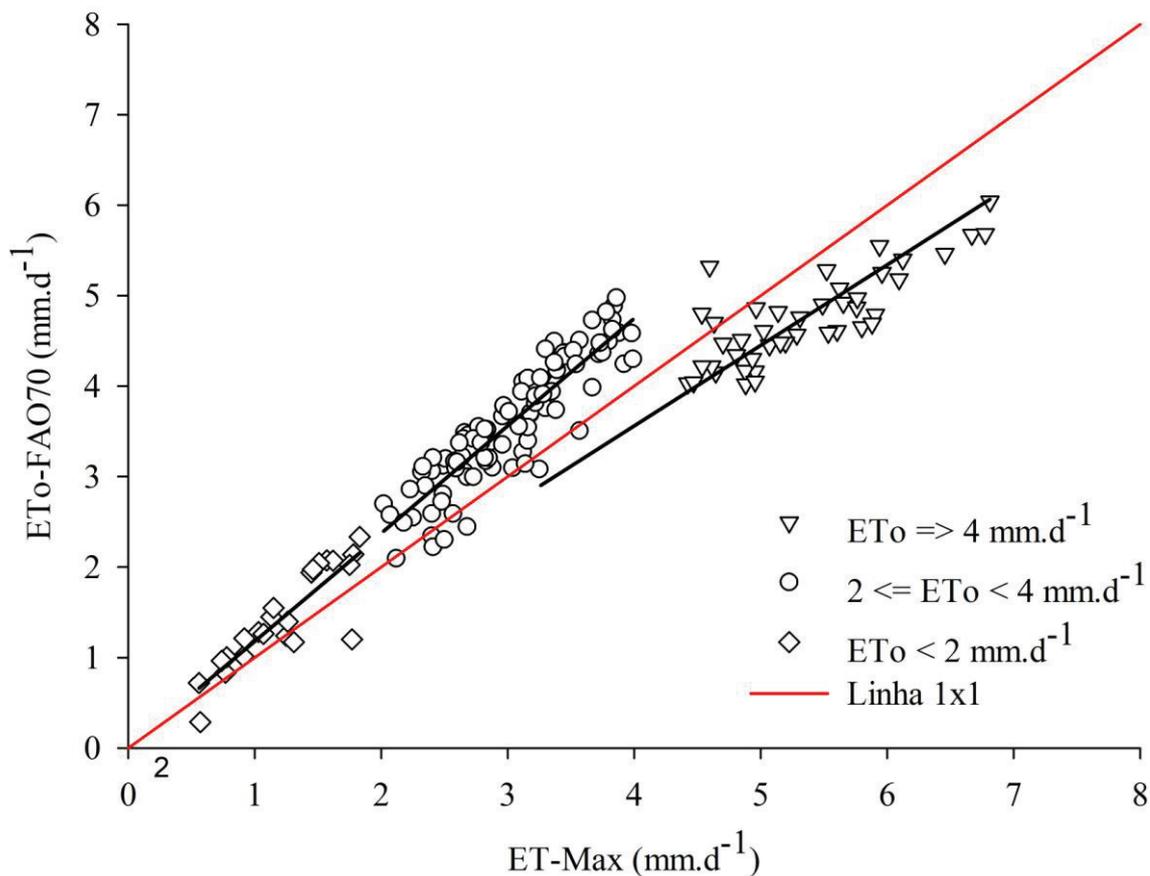


Figura 4. Análise de regressão para diferentes intervalos de ET_0 -FAO70 em relação a evapotranspiração máxima do sistema ($ET_{Max} = (R_n - G) / 2,45$).

Tabela 2. Valores referentes a regressão da Figura 4 para os diferentes intervalos de ET_0 analisados.

Intervalo ET_0 (mm.d^{-1})	Equação	R^2
$2 < ET_0$	$y = 1,178.x$	0,762

$2 \leq ETo < 4$	$y = 1,187.x$	0,810
$ETo \geq 4$	$y = 0,890.x$	0,337

Para os diferentes intervalos de ETo_{70} foi aplicado o *Solver*, com objetivo de encontrar o menor RQME para obter um valor de r_s ótimo. Observou-se que todos os valores de r_s otimizados são maiores que 70 s.m^{-1} e a maior diferença foi para o intervalo de $ETo_{70} < 2 \text{ mm.d}^{-1}$, com r_s de 167 s.m^{-1} , o que diminuiu a RQME em 31,81 % ($0,14 \text{ mm.d}^{-1}$). Em comparação com os dados medidos a campo, $r_s = 167 \text{ s.m}^{-1}$ foi próximo a moda obtida no conjunto de dados.

Tabela 3. Valores otimizados para diferentes intervalos de ETo_{70} medidos a partir da razão de Bowen. Os valores de r_s foram obtidos minimizando a RQME utilizando Solver.

Intervalo	$r_s \text{ (s.m}^{-1}\text{)}$	RQME* (mm.d^{-1})	RQME** (mm.d^{-1})
Sem Intervalo	96	0,40	0,43
$ETo_{70} < 2 \text{ mm.d}^{-1}$	167	0,30	0,44
$2 \text{ mm.d}^{-1} \leq ETo_{70} < 4 \text{ mm.d}^{-1}$	92	0,43	0,45
$ETo_{70} \geq 4 \text{ mm.d}^{-1}$	90	0,35	0,39

RQME* = menor RQME obtido usando *solver*; RQME** calculado usando $r_s = 70 \text{ s.m}^{-1}$

DISCUSSÃO

A partir dos dados medidos de r_s ficou evidente que houve uma grande variabilidade, tanto espacial quanto temporal nas medições de porometria, como destacam Angelocci et al (2004). Os valores obtidos de r_s , na maioria das medições, divergiram do valor de 70 s.m^{-1} , porém a parametrização com $r_s = 70 \text{ s.m}^{-1}$ ainda foi a recomendação adequada para estimativa de ETo para a escala diária. Porém quando se deseja estimar a ETo em escala horária, Allen et al., (2005) recomendação é utilizar $r_s = 50 \text{ s.m}^{-1}$ durante o dia e $r_s = 200 \text{ s.m}^{-1}$ durante o período noturno (ALLEN et al., 2005; PEREIRA et al., 2015). A variabilidade nas tendências de r_s de hora em hora entre os diferentes locais e datas torna difícil, se não impossível, estabelecer um algoritmo consistente para r_s (Allen et al., 2005).

Para a parametrização de $r_s = 70 \text{ s.m}^{-1}$ em alguns momentos houve uma inconsistência física nas estimativas de ETo_{70} , pois o método tem o balanço de energia como base física oriunda dos primeiros estudos desenvolvidos por Penman em 1948 (ALLEN et al., 1998). Assim, dado que a evapotranspiração máxima foi obtida por $(Rn-G)/2,45$, a ETo_{70} não deveria estimar valores superiores (Figura 3B e Figura 4). Essas inconsistências podem explicar em partes os questionamentos levantados em trabalhos relacionados ao uso do coeficiente de cultura (Kc) (SILVA et al., 2019; MARIN et al., 2016; SOBENKO et al., 2018).

O resultado da Figura 3A, mostrou que o coeficiente angular (ξ) diminui conforme a ETo_{70} aumenta. Considerando que o ξ é similar ao Kc , pode-se dizer que assim como a cana de açúcar, café e citros (MARIN et al., 2016), milho (Sobenko et al., 2018) e soja (SILVA et al., 2019) existe uma declividade na reta de tendência. O esperado era que ξ ficasse próximo a 1 e que a linha de tendência não tivesse nenhuma inclinação, uma vez que não deveria ter diferença entre as evapotranspirações, ETo_{70} e ET_{bw} , pois ambas as evapotranspirações são para um gramado. Essa declividade encontrada foi causada pela dispersão (Figura 3A) dos dados quando $ETo_{70} < 2 \text{ mm.d}^{-1}$.

CONCLUSÃO / CONCLUSION

CONCLUSÃO

O valor de r_s obtido para a análise global, sem restrição de intervalo de ET_o , foi 96 s.m^{-1} , sendo maior que o valor indicado pelo FAO56. Os valores de r_s obtidos a partir dos dados de r_1 medidos tiveram grande variação, em que a média (223 s.m^{-1}) e moda (170 s.m^{-1}) não tiveram um ajuste satisfatório ao estimar a ET_o .

Os resultados mostraram que existe uma dispersão dos dados estimados pelo método da FAO56 quando a ET_o70 é inferior a 2 mm.d^{-1} , evidenciando uma superestimativa (Figura 4) da ET_o70 . Essa dispersão justifica a tendência de queda para o ξ conforme o aumento da ET_o , talvez isso explique a tendência de queda do Kc discutido em diversos trabalhos.

REFERÊNCIAS / REFERENCES

ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. **FAO, Rome**, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.

ALLEN, R. G. et al. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ET o by the FAO56 Penman-Monteith method. 2005.

ANGELOCCI, L. R. et al. Transpiration, leaf diffusive conductance, and atmospheric water demand relationship in an irrigated acid lime orchard. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 16, n. 1, p. 53–64, abr. 2004.

SILVA, E. H. F. M. et al. Soybean irrigation requirements and canopy-atmosphere coupling in Southern Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 218, n. February, p. 1–7, 2019.

JARVIS, P. G.; MCNAUGHTON, K. G. Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. **Advances in ecological research**, v. 15, p. 1–49, 1986.

MARIN, F. R. et al. EVAPOTRANSPIRATION AND IRRIGATION REQUIREMENTS OF A COFFEE BREAK PLANTATION IN SOUTHERN BRAZIL. **Experimental Agriculture**, v. 41, n. 2, p. 187–197, 2005.

MARIN, F. R. et al. Crop coefficient changes with reference evapotranspiration for highly canopy-atmosphere coupled crops. **Agricultural Water Management**, v. 163, p. 139–145, 2016.

MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R. Irrigation requirements and transpiration coupling to the atmosphere of a citrus orchard in Southern Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 6, p. 1091–1096, abr. 2011.

PENMAN, H. L. **Natural evaporation from open water, bare soil and grass**. Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. **Anais...The Royal Society**, 1948

PEREIRA, L. S. et al. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. **Agricultural Water Management**, v. 147, p. 4–20, jan. 2015.

PEREZ, P. J. et al. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 97, p. 141–150, 1999.

RIGHI, E. Z. **Balço de energia e evapotranspiração de cafezal adensado em crescimento sob irrigação localizada**. Piracicaba: Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, 28 jan. 2004.

SOBENKO, L. R. et al. Irrigation Requirements Are Lower Than Those Usually Prescribed for a Maize Crop in Southern Brazil. **Experimental Agriculture**, p. 1–10, 2018.