

EFEITO DO AJUSTE LINEAR DO SALDO DE RADIAÇÃO NA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

**FERNANDO CAMPOS MENDONÇA¹, IEDO PEROBA DE OLIVEIRA TEODORO²,
ANGELO TIAGO AZEVEDO³, FELIPE GUSTAVO PILAU⁴, TIMOTEO
HERCULINO DA SILVA BARROS⁵, LUIZ FERNANDO DA SILVA NASCIMENTO⁶**

¹Eng. Agrônomo, Prof. Associado, Doutor, Depto. de Engenharia de Biossistemas, ESALQ/USP, Piracicaba/SP, fernando.mendonca@usp.br

²Eng. Agrônomo, Mestrando em Engenharia de Sistemas Agrícolas, Depto. de Engenharia de Biossistemas, ESALQ/USP, Piracicaba/SP.

³Eng. Agrônomo, Doutorando em Engenharia de Sistemas Agrícolas, Depto. de Engenharia de Biossistemas, ESALQ/USP, Piracicaba/SP.

⁴Eng. Agrônomo, Prof. Associado, Depto. de Engenharia de Biossistemas, ESALQ/USP, Piracicaba/SP

⁵Eng. Agrônomo, Doutor em Engenharia de Sistemas Agrícolas, Depto. de Engenharia de Biossistemas, ESALQ/USP, Piracicaba/SP.

⁶Graduando em Agronomia na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), Piracicaba/SP.

Apresentado no
LIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2024
6 a 8 de agosto de 2024 – Natal – RN, Brasil

RESUMO: A relação entre saldo de radiação (R_n) e evapotranspiração de referência (E_{To}) é crucial para entender as trocas de energia e água na superfície terrestre. O ajuste linear do R_n estimado visa ajustar fatores ambientais locais. Este estudo objetivou ajustar uma equação de regressão linear para estimar R_n pelo método de Allen et al. (1998), e analisar a interação entre R_n e E_{To} para Piracicaba, SP. Os dados do posto meteorológico da ESALQ/USP foram utilizados para calibração (2020 e 2021) e validação (2022 e 2023). R_n foi medido com um saldo-radiômetro e estimado de acordo com Allen et al. (1998). Avaliou-se a precisão e a acurácia do ajuste com índices estatísticos: coeficientes de determinação (R^2) e de correlação (r), índice de concordância de Willmott (d), raiz quadrada do erro médio (RMSE) e índice de confiança (c). O modelo linear gerado teve alto coeficiente de determinação ($r > 90\%$) e ótima confiança ($c = 0,93$), com bom ajuste de R_n , e pode ser utilizado em estações que não possuam saldo-radiômetros. Os valores de E_{To} estimada com R_n ajustado e medido foram similares, possibilitando reduzir lâminas de irrigação calculadas em função da E_{To} estimada por R_n estimado e contribuir para o melhor uso da água.

PALAVRAS-CHAVE: Saldo de radiação, Evapotranspiração, Manejo da irrigação.

EFFECT OF LINEAR ADJUSTMENT OF NET RADIATION ON REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION

ABSTRACT: The relationship between net radiation (R_n) and reference evapotranspiration (E_{To}) is crucial for understanding energy and water exchanges at the Earth's surface. The linear adjustment of estimated R_n aims to account for local environmental factors. This study aimed to adjust a linear regression equation to estimate R_n according to Allen et al. (1998) and analyze the interaction between R_n and E_{To} for Piracicaba, SP. We used meteorological data from the weather station of ESALQ/USP for calibration (2020 and 2021) and validation (2022 and 2023). R_n was measured with a radiometer and estimated according to Allen et al. (1998). The

accuracy and precision of the adjustment were evaluated using statistical indices. The generated linear model had a high coefficient of determination ($r > 90\%$) and excellent confidence ($c = 0.93$), with good R_n adjustment, and can be used in stations without radiometers. Estimated E_{To} values with adjusted and measured R_n were similar, enabling to reduce irrigation water depths based on estimated E_{To} with estimated R_n .

KEYWORDS: Net-radiation, Evapotranspiration, Irrigation management.

INTRODUÇÃO: A relação entre o saldo de radiação (R_n) e a evapotranspiração de referência (E_{To}) é fundamental para entender balanços de energia e água na superfície terrestre. R_n representa o balanço de energia entre ondas curtas e longas (ROSENBERG et al., 1983), e E_{To} é uma estimativa da quantidade de água evapotranspirada de uma superfície de referência, com 0,12m de altura, resistência de superfície de 70 s m^{-1} e albedo de 0,23 (ALLEN et al., 1998). O ajuste linear de R_n refere-se à regressão linear de R_n medido por instrumentação para ajustar os valores nas localidades em que não há saldo-radiômetro. Esse ajuste é necessário porque o R_n é influenciado por uma variedade de fatores, incluindo densidade de nuvens, umidade do solo e do ar, e a cobertura vegetal (MOURA et al., 2019), que podem variar ao longo do tempo e do espaço. O efeito do ajuste linear de R_n na E_{To} pode ser significativo, visto que a temperatura e a pressão de vapor são dinâmicas na atmosfera (QUERINO et al., 2020). Quando o saldo de radiação é ajustado considerando essas influências, a estimativa da E_{To} torna-se mais precisa e representativa das condições reais do ambiente (SANTOS et al., 2017). Isso é importante em várias aplicações, tais como a modelagem climática e a gestão dos recursos hídricos (LIU et al., 2009). O objetivo deste trabalho foi determinar uma equação de ajuste linear do saldo de radiação (R_n) estimado pelo método de Allen et al. (1998) e analisar sua interação com a evapotranspiração de referência (E_{To}) para o município de Piracicaba, SP.

MATERIAL E MÉTODOS: Os dados agrometeorológicos (2020 a 2023) necessários, temperatura (T , $^{\circ}\text{C}$), umidade relativa do ar (UR, %), mínima, máxima e média do ar, chuva (P , mm), velocidade média do vento a 2 m de altura (U_2 , m s^{-1}), radiação global e líquida (respectivamente Q_g e R_n , MJ dia^{-1}) foram obtidos do posto meteorológico da ESALQ/USP, em Piracicaba, SP (Figura 1). A classificação climática de Köppen local é A_w , clima tropical com inverno seco, com precipitação e temperatura normais (1987-2016) de 1.279 mm e $21,7^{\circ}\text{C}$, respectivamente (ALVARES et al., 2022).

O saldo de radiação medido foi obtido com um saldo-radiômetro NR lite2, instalado a 2 m de altura. O saldo de radiação (R_n) foi estimado conforme Allen et al. (1998). No processo de calibração foram utilizados dados agrometeorológicos de 2020 e 2021. A regressão linear entre R_n medido e R_n estimado foi obtida com auxílio do software Jupyter Notebook, com a biblioteca *linregress*, de *scipy.stats*, considerando R_n medido como variável dependente e R_n estimado como variável independente. No processo de validação foram utilizados dados de 2022 e 2023. R_n ajustado foi calculado com a equação linear obtida na calibração, usando R_n estimado do período de 01/01/2022 a 31/12/2023 como variável independente.



Figura 1. Geolocalização do município de Piracicaba, SP.

A precisão e acurácia do ajuste foram analisadas com os índices estatísticos: coeficiente de determinação (R^2), de Pearson (r), Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE), índice “d” de Willmott e de confiança “c” (CAMARGO & SENTELHAS, 1997).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - M_i)^2} \quad (1)$$

$$d = 1 - \left| \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|S'_i| + |M'_i|)^2} \right| \quad (2)$$

$$r = \frac{\sum S_i M_i - \frac{\sum S_i \sum M_i}{N}}{(N-1) S_{si} \times S_{mi}} \quad (3)$$

$$c = r \cdot d \quad (4)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO: Durante o processo de calibração, o maior Rn estimado ($18,51 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e medido ($17,76 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) ocorreram no dia 30/12/2020, um desvio percentual de 4,24%. Para os menores valores de Rn estimado ($2,65 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e medido ($1,20 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) ocorreram no dia 21/08/2021, com desvio percentual de 320,4%. Já no processo de validação, o maior Rn ocorreu em 03/12/2023, sendo Rn medido de $17,15 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e de $16,39 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ no ajuste linear, subestimando em 4,38%. Os menores valores de Rn obtidos na validação foram de $-0,39$; $2,40$ e $1,2439 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, para o Rn medido, estimado e ajustado nos dias 14/09/2023, 15/06/2023 e 15/06/2023, respectivamente. O modelo polinomial de primeiro grau ajustou as estimativas de Rn, com coeficiente de determinação superior a 90%, e proporcionou exatidão de 0,98 (Figura 2).

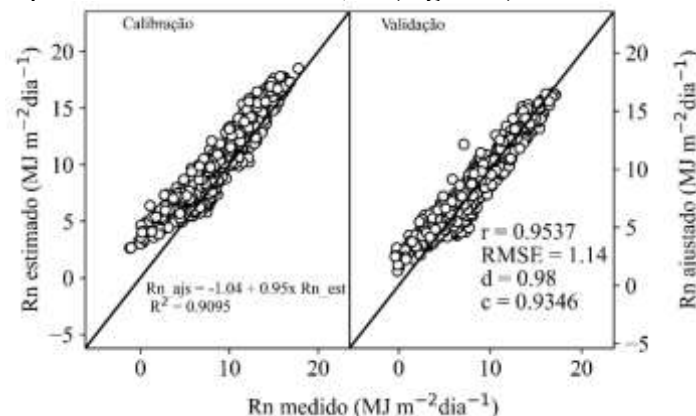


Figura 2 - Retas 1:1 para regressão entre valores de Rn medido x Rn estimado (Calibração) e Rn medido x Rn ajustado (Validação). Piracicaba, SP.

Pela classificação de Hopkins (2000) o coeficiente de Pearson ($r = 0,95$) mostra alta correlação, e o baixo valor do RMSE (1,14) evidencia a precisão dos dados, com baixo erro médio. De acordo com Camargo; Sentelhas (1997), o ajuste apresentou ótimo nível de confiança ($c = 0,93$). A ETo obtida com o Rn estimado teve acúmulo de 1.383,4 e 1.402,75,77 mm em 2022 e 2023, respectivamente. A ETo obtida com o Rn medido por instrumentação apresentou totais de 1.222,12 e 1.268,15 mm em 2022 e 2023, respectivamente. A ETo acumulada obtida com Rn ajustado (Regressão linear) foi de 1.236,87 mm em 2022 e 1.251,98 mm em 2023. Os resultados indicam diferenças notáveis na ETo obtida com diferentes métodos de estimativa de Rn (Fig. 3). As diferenças podem ser atribuídas a variações nas condições ambientais, qualidade dos dados de radiação e precisão dos modelos de estimativa.

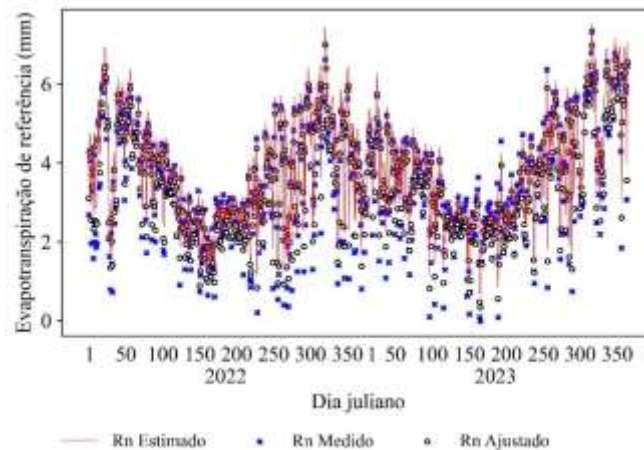


Figura 3 - Valores diários de ETo (mm/dia) estimados com dados de Rn estimados, medidos e ajustados, para os anos de 2022 e 2023. Piracicaba, SP.

CONCLUSÕES: O modelo polinomial foi eficaz para o ajuste de Rn com dados da estação utilizada, e pode ser usado em estações sem saldo-radiômetro. A ETo estimada com Rn ajustado foi semelhante à ETo estimada com Rn medido, reduzindo em 11,85% e 12,04% a ETo com Rn estimado nos anos de 2022 e 2023, resultando em menores lâminas de irrigação.

AGRADECIMENTOS:

Aos funcionários do Depto. de Biosistemas, responsáveis pelo posto meteorológico da ESALQ/USP. À FEALQ, pelos recursos financeiros para participação no CONBEA.

REFERÊNCIAS:

- ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Drainage. Paper, 56)
- ALVARES, C. A.; SENTELHAS, P. C.; DIAS, H. B. Southeastern Brazil inland tropicalization: Köppen system applied for detecting climate change throughout 100 years of meteorological observed data. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 149, n. 3, p. 1431-1450, 2022.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Rev. Bras. de Agrometeorologia**, v. 5, p. 89-97, 1997.
- HOPKINS, W.C. Measures of reliability in sport medicine and science. **Sports Medicine**, v. 30, n. 1, p. 1-15, 2000.
- LIU, X. et al. Evaluation of temperature-based global solar radiation models in China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 1433-1446, 2009.
- MOURA, A. R. M.; QUERINO, C. A. S.; QUERINO, J. K. A. S.; PEDREIRA JUNIOR, A. L.; SANTOS, L. O. F.; MACHADO, N. G.; BIUDES, M. S. Impact of a dam construction on the surface biophysical parameters in Amazonia. **Remote Sens. Appl.: Soc. and Envir.**, v. 15, 2019.
- QUERINO, C. A. S.; BIUDES, M. S.; MACHADO, N. G.; Querino, J. K. A. S.; MOURA, M. A. L.; ALVES, P. V. Modelling parametrization to estimate atmospheric long wave radiation in the Northern Mato Grosso, Brazil. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 42, n.105, 2020.
- ROSENBERG, N. J.; BLAD, B. L.; VERMA, S.B. **Microclimate: The biological environment**. 2nd Edition, Lincoln – Nebraska: John Wiley & Sons, 1983, 495p.
- SANTOS, M. A.; SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; TEODORO, I.; FERREIRA, R. A.; ALMEIDA, A. C. S.; LEMES, M. A. M. Observed and modelled solar radiation components in sugarcane crop grown under tropical conditions. **Int. Agrophysics**, v. 31, n. 2, p. 241–231, 2017.
- WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Phys. Geography**, v. 2, n. 2, 184-194, 1981.