

Edição Especial

Calibração do coeficiente de Priestley-Taylor para estimativa da evapotranspiração em áreas de cultivo de arroz irrigado

Calibration of the Priestley-Taylor parameter to estimate evapotranspiration in rice paddy areas

Vanessa de Arruda Souza^I , Tamíres Zimmer^I , Anderson Luis Ruhoff^{II} ,
Jônathan Dupont Tatsch^I , Michel Baptistella Stefanello^I ,
Gustavo Pujol Veeck^I , Débora Regina Roberti^I , Virnei Silva Moreira^{III} ,
Luis Gustavo de Gonçalves^{IV} , Rita de Cássia Marques Alves^{II} 

^I Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil

^{II} Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

^{III} Universidade Federal do Paraná, PR, Brasil

^{IV} Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici; Bologna, BO, Itália

RESUMO

O arroz é um dos principais grãos produzidos no mundo, demandando grande volume de d'água através do cultivo de irrigação por inundação. Estimar a evapotranspiração (ET) para áreas de arroz irrigado através de medidas in situ ainda é um fator limitante, devido ao alto custo dos equipamentos e mão de obra especializada. O método Penman-Monteith (PM) é conhecido como sendo o mais completo, porém necessita de um grande número de informações. O método Priestley-Taylor (PT) representa uma simplificação de PM, utilizando um menor número de variáveis ambientais e energia disponível no sistema. Na literatura, diversos trabalhos têm apresentado calibrações para o coeficiente α de PT. No entanto, essas calibrações devem ser realizadas de acordo com as características climáticas e da superfície de cada região. Desta forma, o objetivo deste trabalho é propor uma calibração do coeficiente de PT para estimativas de ET no arroz irrigado, visando a utilização de um método mais simples. Para isso, foram utilizados dois sítios experimentais no sul do Brasil. Os resultados simulados foram comparados com dados experimentais obtidos pela técnica de Eddy Covariance (EC), resultando em um valor de calibração de 1,22 do parâmetro α , mostrando-se eficiente para estimativas de ET em áreas de arroz irrigado.

Palavras-chave: Evapotranspiração; Método Priestley-Taylor; Arroz irrigado

ABSTRACT

Rice is one of the most important cereals in the world and requires a large amount of water due to flood irrigation cultivation. Estimation of evapotranspiration (ET) for rice paddy cropland by in situ measurements is still a limiting factor due to the high cost of equipment and specialized labor. The Penman-Monteith (PM) method is considered the most complete, but requires a large amount of information. The Priestley-Taylor method (PT) is a simplification of the PM method using a smaller number of environmental variables and the energy available in the ecosystem. Several papers in the literature have presented calibrations for the α -coefficient of PT. However, these calibrations must be performed according to the climatic and surface characteristics of each region. Therefore, the aim of this work is to propose a calibration of the PT coefficient for ET estimates in rice paddy areas, using a simpler method. For this purpose, two experimental sites in southern Brazil were used. The simulated results were compared with data obtained using the Eddy Covariance technique (EC). The α -parameter of 1.22 proved to be efficient for ET estimations in rice paddy areas.

Keywords: Evapotranspiration; Priestley-Taylor method; Rice paddy

1 INTRODUÇÃO

O processo de evapotranspiração (ET) é uma das principais componentes do balanço hídrico, e uma importante variável para modelagem de tempo e clima. Determinar as taxas de ET sobre áreas de cultivos agrícolas vem sendo muito explorada nas últimas décadas, estando ligada aos fatores sócio-econômicos, produtividade agrícola, questões ambientais, entre outros (Alberto *et al.*, 2011, 2014; Allen *et al.*, 1998; Souza *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2013). Em geral, o cultivo de arroz ocorre através do sistema irrigado por inundação, demandando um grande volume de água, afetando diretamente o balanço hídrico e de energia da região de cultivo. Estimativas do consumo de água por ET são fundamentais para a gestão de recursos hídricos (Bouraima; Weihua; Chaofu, 2015).

Atualmente o método de Penman-Monteith (PM) (Monteith, 1965; Penman, 1948) é considerado o mais completo para determinar as taxas de ET, e utilizado como o método padrão para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) (Allen *et al.*, 1998). No entanto, este método requer uma grande quantidade de parâmetros

meteorológicos e ambientais, muitas vezes difíceis de serem mensurados (Pereira; Pruitt, 2004). O Método Priestley-Taylor (PT) é baseado em uma simplificação do método PM, utilizando apenas a temperatura do ar e a energia disponível no sistema (Priestley; Taylor, 1972). Entretanto, a calibração do coeficiente adimensional α da equação PT deve ser realizada de acordo com as características climáticas e da superfície da região de estudo, sendo recomendado o valor de 1,26 para corpos d'água abertos. Na literatura, diversos trabalhos têm estimado diferentes valores de α , variando de 0,8 a 2,47, sobre diferentes tipos de vegetação e regiões (Castellvi *et al.*, 2001; CHO *et al.*, 2013; Gavin; Agnew, 2004; Priestley; Taylor, 1972; Qiu *et al.*, 2019).

O Brasil é um dos dez maiores produtores de arroz irrigado no mundo, sendo que somente o estado do Rio Grande do Sul produz aproximadamente 73% do total da produção brasileira (CONAB, 2021). Nesta região o cultivo ocorre apenas durante a estação primavera-verão, ficando o solo descoberto e com crescimento de vegetação espontânea no restante do tempo (Souza *et al.*, 2019). A metodologia covariância dos vórtices (EC, do inglês *Eddy Covariance*) é o estado da arte na estimativa das trocas líquidas de H₂O e CO₂ (Baldocchi *et al.*, 2012), no entanto, esta técnica tem elevado custo operacional, impossibilitando sua aplicação em larga escala. Desta forma, o objetivo deste trabalho é calibrar o coeficiente α da equação de PT para áreas de arroz irrigado, e por fim obter estimativas de ET mais acuradas através de uma metodologia mais simples. Para este propósito, serão utilizados dois sítios experimentais com torres de fluxo no sul do Brasil.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Sítios experimentais

Os sítios experimentais estão localizados em áreas de cultivo de arroz irrigado por inundação no sul do Brasil. O sítio experimental de Paraíso do Sul (PRS)

(29°44'39.6" S; 53°8'59.8" O, elevação do terreno 108 m) tem aproximadamente 50 hectares (ha). Em Cachoeira do Sul (CAS) a área com cultivo é de aproximadamente 1000 ha (30°16'37.59" S, 53°8'52.25" O, elevação do terreno 40,5 m). O clima da região é classificado como subtropical úmido, Cfa, de acordo com a classificação climática de Köppen (Peel; Finlayson; McMahon, 2007).

O período de estudo para o sítio de PRS foi de 21 julho de 2003 a 20 de julho de 2004, com cultivo do arroz ocorrendo de 25 de novembro a 4 de abril. Para CAS foi utilizado o período de 01 de agosto de 2012 a 31 de julho de 2013, sendo o arroz cultivado de 15 de outubro a 17 de março. Em ambos sítios experimentais, 30 dias após a semeadura, a lavoura de arroz foi inundada com aproximadamente 10 cm de lâmina d'água, permanecendo até a colheita.

2.2 Variáveis ambientais e processamento de dados

Os sítios experimentais estavam equipados com torres micrometeorológicas. Para medição das variáveis de fluxo foram utilizados os sensores anemômetro sônico 3D e analisador de gás de caminho aberto, sendo estimados através da Técnica EC. O software EddyPro Advanced (versão 5.1, LI-COR) foi utilizado para processar os dados de fluxo em médias de 30 minutos. Após o processamento de dados realizamos a filtragem de valores espúrios de fluxo de calor latente (LE) e fluxo de calor sensível (H). O pacote REddyProc (Reichstein *et al.*, 2005), disponível para a versão do software RStudio, foi utilizado no preenchimento de falha de dados. Diversos trabalhos apontam que a soma de LE+H é menor quando comparado à diferença entre o saldo de radiação (Rn) e fluxo de calor no solo (G), podendo variar entre 10 a 30%, necessitando ajuste nos valores destes parâmetros (Alberto *et al.*, 2011). Desta forma, o fechamento do balanço de energia foi forçado utilizando a técnica da razão de Bowen (Foken, 2008). Mais detalhes em Souza *et al.* (2019).

As variáveis ambientais utilizadas neste estudo foram: temperatura do ar (Temp), umidade relativa (UR), precipitação (Prec), radiação solar incidente (Rg), temperatura do

solo (T_{so}) e umidade do solo (θ). Uma descrição detalhada dos sítios experimentais e dos dados coletados pode ser encontrada em Souza *et al.* (2019) e Timm *et al.* (2014). Foram utilizados dados da estação meteorológica do INMet (Instituto Nacional de Meteorologia – OMM-86977) localizada em Santa Maria – RS, para o preenchimento de falha nas variáveis ambientais. Para a descrição da climatologia da região foram utilizados dados das normais climatológicas (NC) do INMet.

2.3 Método Priestley-Taylor (PT)

O método Priestley-Taylor considera somente parâmetros meteorológicos, tais como: temperatura do ar e energia disponível no ecossistema (Priestley; Taylor, 1972). Este método necessita de calibração na constante de proporcionalidade, α (coeficiente de Priestley-Taylor), variando conforme as características locais de clima e cobertura da superfície. Seguindo esta metodologia, o fluxo de calor latente é obtido através da equação:

$$\lambda ET = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (Rn - G) \quad (1)$$

onde: Δ é a inclinação da curva de pressão de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); Rn é a energia disponível no sistema (W m^{-2}). O fluxo de calor no solo pode ser estimado através da soma entre fluxo de calor conduzido pelo solo (F_g) e o armazenamento de calor no solo e lâmina d'água (ΔG):

$$G = F_g + \Delta G \quad (2)$$

Neste trabalho o armazenamento de calor na lâmina d'água foi calculado apenas para o período inundado.

A ET diária (mm d^{-1}), obtida pelo método PT, foi calculada através da seguinte relação:

$$ET = 10^{-9} \left(\frac{\lambda ET}{\rho_a \lambda} \right) \quad (3)$$

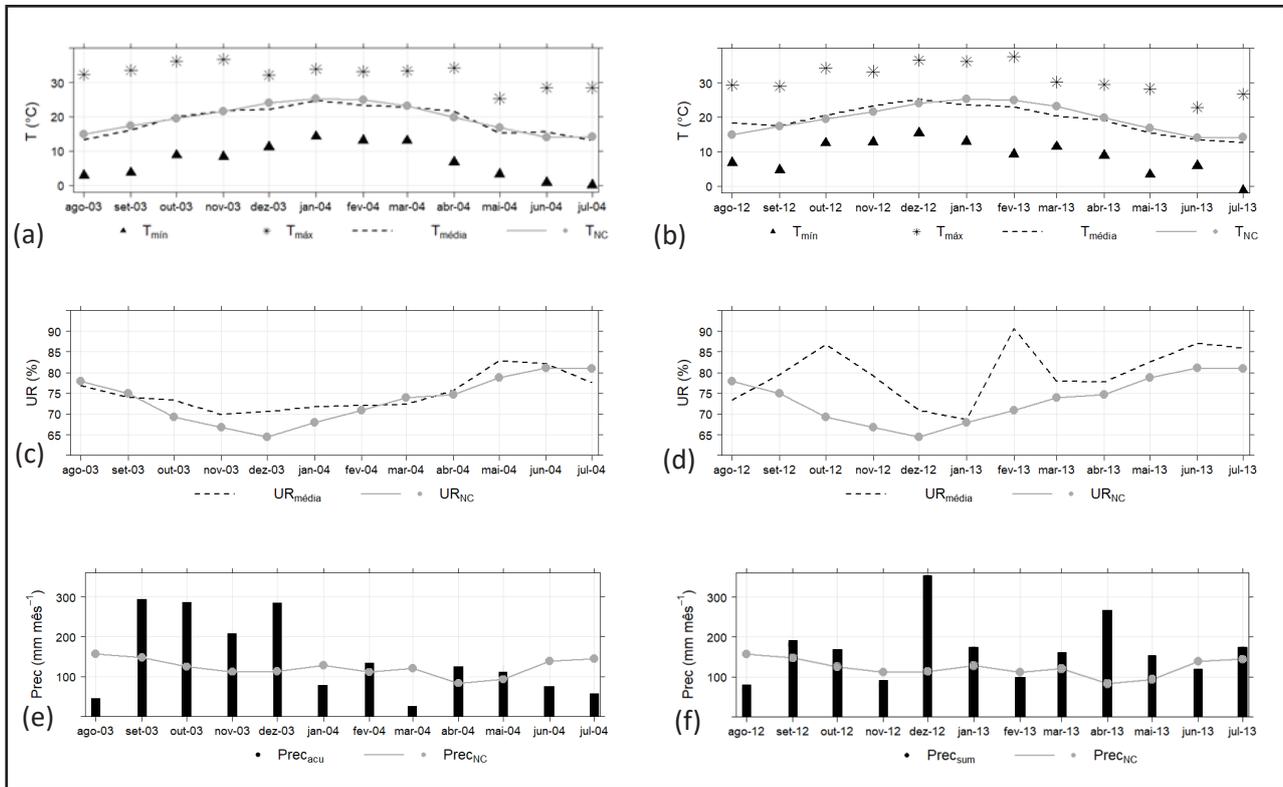
onde: λET é o fluxo de calor latente em $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, λ é o calor latente de evaporação ($2,45 \times 10^6 \text{ J Kg}^{-1}$) e ρ_a é a densidade da água ($998,21 \text{ Kg m}^{-3}$) para temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Condições ambientais

As variáveis Temp ($^\circ\text{C}$), UR (%), e o acumulado mensal de Prec (mm), para os sítios experimentais de PRS e CAS são apresentados na Figura 2. Observamos que os maiores valores de Temp ocorreram entre dezembro e fevereiro (estação de verão), apresentando comportamento semelhante a NC com variação máxima de $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ para PRS, e de até $3,4 \text{ }^\circ\text{C}$ para CAS (agosto). Durante o período de desenvolvimento do arroz irrigado (novembro – março) verificou-se que a Temp apresentou valores superior a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ em ambos locais, propiciando o bom desenvolvimento da cultura. A UR seguiu padrão semelhante a NC com valor em torno de 75% para PRS. CAS apresentou picos entre agosto de 2012 até fevereiro de 2013 variando $\pm 19\%$ em relação à NC. Em PRS o acumulado mensal de precipitação apresentou grande variação quando comparado a NC, com superestima para os meses de setembro a dezembro, e subestima de janeiro a março e junho a julho. Durante o período de plantio ocorreu um grande volume de precipitação (novembro e dezembro), acarretando no atraso do plantio do arroz em PRS. CAS apresentou quatro meses de Prec com valores abaixo da NC (agosto, novembro, fevereiro e junho), enquanto que para dezembro e abril os volumes foram bem expressivos, acima de 250 mm m^{-1} .

Figura 1 – Valores mensais das variáveis meteorológicas de temperatura do ar (a, b); umidade relativa (c, d); e precipitação (e, f) para os sítios experimentais de PRS e CAS, respectivamente



Fonte: Autores (2022)

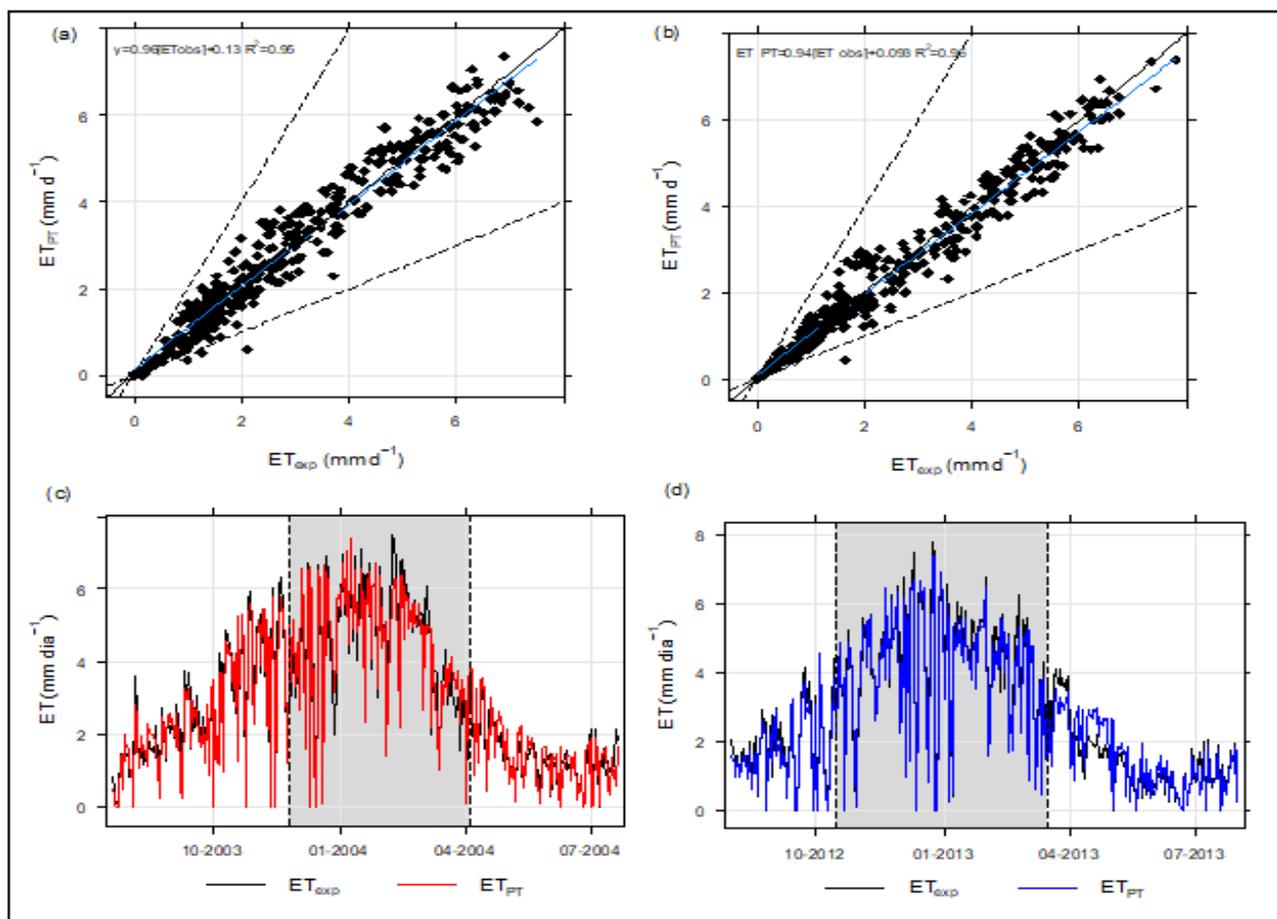
Legenda: Os pontos * representam os valores máximos; os pontos ▲ representam os valores mínimos; a linha tracejada em preto representa a média de cada variável meteorológica; a linha em cinza pontilhada representa os dados da normal climatológica. Nas figuras (e) e (f) as barras em preto representam a precipitação acumulada mensal

3.2 Calibração e validação do método de Priestley-Taylor (PT)

A calibração do coeficiente α para a estimativa da ET utilizando a Eq. 1 foi realizada através dos dados de PRS. Valores de α foram simulados entre os intervalos de 0,9 e 1,23, no qual o valor de 1,22 apresentou os melhores índices estatísticos de RMSE (0,45 mm dia⁻¹), PBIAS (0%), e R² (0,95) em relação aos dados experimentais. A validação do ajuste do coeficiente de PT foi realizada para o sítio de CAS, onde encontramos valores estatísticos igual a 0,39 mm dia⁻¹, -2,6% e 0,96 para RMSE, PBIAS e R², respectivamente. A variação sazonal da ET média diária experimental (ET_{exp}) e estimada através do método PT (ET_{PT}) podem ser observadas na Figura 2. De modo

geral, os valores estimados de ET_{PT} foram muito satisfatórios quando comparado a ET_{exp} (Figura 2a e 2b).

Figura 2 – Dispersão entre a evapotranspiração experimental (ET_{exp}) e estimada a partir do método Priestley-Taylor (ET_{PT}) para PRS (a) e CAS (b). Variação anual da ET média diária para PRS (c) e CAS (d)



Fonte: Autores (2022)

Legenda: Para referência nas figuras (a) e (b) a linha 1:1 é preta sólida, as linhas 1:0,5 e 1:2 são tracejadas e a linha azul representa o ajuste linear dos dados. Nas figuras (c) e (d) a área hachurada representa o período de cultivo do arroz irrigado

Durante a safra de arroz foram observados picos de ET superiores a 7 mm d^{-1} (Figura 2c e 2d). No período de pousio 1 (anterior a semeadura) observamos valores mais altos de ET em relação ao pousio 2 (após a colheita) (Figura 2c e 2d). Este fato, pode estar associado ao resíduo de palha sobre a superfície, em que diminui a exposição do solo e afeta diretamente o processo de evaporação. Li *et al.* (2009), encontraram

valores de ET variando entre 0,5 e 6 mm d⁻¹ para áreas agrícolas irrigadas em uma região de clima típico continental temperado na China. Conforme Tabbla *et al.* (2002), em grande parte da região dos trópicos a ET em áreas de arroz irrigado por inundação pode variar entre 4 a 5 mm d⁻¹ na estação chuvosa, e de 6 a 7 mm d⁻¹ para a estação seca. Alberto *et al.* (2011) descrevem a ET sobre o arroz irrigado nas Filipinas encontrando valores próximos aos obtidos neste estudo. Por fim, o acumulado de ET_{exp} e ET_{PT} para todo o período de estudo foi de 1076,02 e 1079,10 mm em PRS, enquanto que em CAS foi de 996,11 e 970,44 mm, respectivamente.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Método Priestley-Taylor mostrou-se muito eficiente para estimar a ET em grandes áreas de cultivo de arroz irrigado. No entanto, os valores propostos na literatura para o coeficiente α não se aplicam para esta cultura, variando conforme as condições locais. A partir da calibração e validação do coeficiente de PT, obtivemos resultados mais satisfatórios quando comparado aos obtidos por Timm *et al.* (2014) utilizando a equação Penman-Monteith sobre o mesmo sítio experimental de PRS. Desta forma, o método PT, apesar de ser mais simplificado que o método Penman-Monteith, indicou que grande parte da estimativa de ET depende somente da radiação que chega à superfície e de uma boa calibração no coeficiente α . Por fim, este trabalho sugere que o valor de α seja igual a 1,22 para equação PT em áreas de arroz irrigado por inundação no sul do Brasil.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às Agências Brasileiras de Pesquisa: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS).

REFERÊNCIAS

- ALBERTO, M. C. R. *et al.* Comparisons of energy balance and evapotranspiration between flooded and aerobic rice fields in the Philippines. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 9, p. 1417–1430, 2011.
- ALBERTO, M. C. R. *et al.* Actual evapotranspiration and dual crop coefficients for dry-seeded rice and hybrid maize grown with overhead sprinkler irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 136, p. 1–12, 2014.
- ALLEN, R. G. *et al.* **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56**. Rome: [s.n.]. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>.
- BALDOCCHI, D. *et al.* The challenges of measuring methane fluxes and concentrations over a peatland pasture. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 153, p. 177–187, 2012.
- BOURAIMA, A. K.; WEIHUA, Z.; CHAOFU, W. Irrigation water requirements of rice using Cropwat model in Northern Benin. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 2, p. 58–64, 2015.
- CASTELLVI, F. *et al.* Comparison of methods for applying the Priestley-Taylor equation at a regional scale. **Hydrological Processes**, v. 15, n. 9, p. 1609–1620, 2001.
- CHO, J. *et al.* Difference in the Priestley-Taylor coefficients at two different heights of a tall micrometeorological tower. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 180, p. 97–101, 2013.
- CONAB. **CONAB - Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 28 jan. 2022.
- FOKEN, T. The energy balance closure problem: An overview. **Ecological Applications**, v. 18, n. 6, p. 1351–1367, 2008.
- GAVIN, H.; AGNEW, C. A. Modelling actual, reference and equilibrium evaporation from a temperate wet grassland. **Hydrological Processes**, v. 18, n. 2, p. 229–246, 2004.
- LI, S. *et al.* Variability in energy partitioning and resistance parameters for a vineyard in northwest China. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 6, p. 955–962, 2009.
- MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. **Symposia of the Society for Experimental Biology**, v. 19, p. 205–234, 1965.
- PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 5, p. 1633–1644, out. 2007.
- PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society of London**, v. A193, p. 120–146, 1948.
- PEREIRA, A. R.; PRUITT, W. O. Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration. **Agricultural Water Management**, v. 66, n. 3, p. 251–257, 2004.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. **Monthly Weather Review**, v. 100, n. 2, p. 81–92, 1972.

QIU, R. *et al.* Evapotranspiration estimation using a modified Priestley-Taylor model in a rice-wheat rotation system. **Agricultural Water Management**, v. 224, p. 105755, set. 2019.

REICHSTEIN, M. *et al.* On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: Review and improved algorithm. **Global Change Biology**, v. 11, n. 9, p. 1424–1439, set. 2005.

SOUZA, V. DE A. *et al.* Evaluation of MOD16 Algorithm over Irrigated Rice Paddy Using Flux Tower Measurements in Southern Brazil. **Water**, v. 11, n. 9, p. 1911, 13 set. 2019.

TABBLA, D. F. *et al.* On-farm strategies for reducing water inputs in irrigated rice; Case studies in the Philippines. **Agricultural Water Management**, v. 56, n. 2, p. 93–112, 2002.

TIMM, A. U. *et al.* Energy Partitioning and Evapotranspiration over a Rice Paddy in Southern Brazil. **Journal of Hydrometeorology**, v. 15, n. 5, p. 1975–1988, 2014.

XU, J. *et al.* Modeling rice evapotranspiration under water-saving irrigation by calibrating canopy resistance model parameters in the Penman-Monteith equation. **Agricultural Water Management**, v. 182, p. 55–66, 2017.

ZHAO, N. *et al.* Dual crop coefficient modelling applied to the winter wheat-summer maize crop sequence in North China Plain: Basal crop coefficients and soil evaporation component. **Agricultural Water Management**, v. 117, p. 93–105, 2013.

Contribuição de autoria

1 – Vanessa de Arruda Souza

Meteorologista, Doutora em Sensoriamento Remoto

<https://orcid.org/0000-0002-8518-1271> • v.arruda.s@gmail.com

Contribuição: Curadoria de Dados, Análise Formal; Escrita – Primeira Redação

2 – Tamíres Zimmer

Física, Doutora em Física

<https://orcid.org/0000-0002-2384-0630> • tz.tamireszimmer@gmail.com

Contribuição: Escrita – Primeira Redação

3 – Anderson Luis Ruhoff

Geógrafo, Doutor em Recursos Hídricos

<https://orcid.org/0000-0002-3585-2022> • andersonruhoff@gmail.co

Contribuição: Escrita – Revisão e Edição

4 – Jônatan Dupont Tatsch

Meteorologista, Doutor em Meteorologia

<https://orcid.org/0000-0003-0930-9461> • jdtatsch@gmail.com

Contribuição: Análise Formal

5 – Michel Baptistella Stefanello

Físico, Doutor em Física

<https://orcid.org/0000-0002-6380-3252> • michelstefanello@gmail.com

Contribuição: Análise Formal ; Escrita – Revisão e Edição

6 – Gustavo Pujol Veeck

Físico, Mestre em Física

<https://orcid.org/0000-0002-1444-0360> • veeckgp@gmail.com

Contribuição: Análise Formal

7 – Débora Regina Roberti

Física, Doutora em Física

<https://orcid.org/0000-0002-3902-0952> • debora@ufsm.br

Contribuição: Supervisão; Administração do Projeto; Escrita – Revisão e Edição

8 – Virnei Silva Moreira

Físico, Doutor em Física

<https://orcid.org/0000-0001-9786-0469> • virneimoreira@gmail.com

Contribuição: Escrita – Revisão e Edição

9 – Luis Gustavo de Gonçalves

Meteorologista, Doutor em Hidrologia e Recursos Hídricos

<https://orcid.org/0000-0002-1571-0916> • Gustavo.deGoncalves@gmail.com

Contribuição: Escrita – Revisão e Edição

10 – Rita de Cássia Marques Alves

Meteorologista, Doutora em Meteorologia

<https://orcid.org/0000-0001-7804-8141> • rita.cma@terra.com.br

Contribuição: Supervisão; Administração do Projeto; Escrita – Revisão e Edição

Como citar este artigo

SOUZA, V. de A.; ZIMMER, T.; RUHOFF, A. L.; TATSCH, J. D.; STEFANELLO, M. B.; VEECK, G. P.; ROBERTI, D. R.; MOREIRA, V. S.; GONÇALVES, L. G. de; ALVES, R. de C. M. Calibração do coeficiente de Priestley-Taylor para estimativa da evapotranspiração em áreas de cultivo de arroz irrigado. *Ciência e Natura*, Santa Maria, v. 45, ed. esp. 2 e79096, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X79096>. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/79096>. Acesso em: dia mês abreviado ano.