

DESEMPENHO DE MÓDULO AUTOMÁTICO PARA ESTIMAR SÉRIES DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA DIÁRIA E HORÁRIA

SANTOS, A. A.¹; SOUZA, J. L. M.²

¹Pós-Graduação em Ciência do Solo, UFPR; ²Professor, DSEA/SCA/UFPR, e-mail:
jmoretti@ufpr.br

RESUMO

Teve-se por objetivo no presente estudo associar e analisar séries de evapotranspiração de referência diária ($ET_{OPM,d}$) e o somatório da ET_o horária em 24 horas ($ET_{OPM,24h}$), estimadas em um módulo desenvolvido em planilha eletrônica automática especialmente para essa finalidade, com a ET_o diária estimada no programa “FAO ET_o Calculator” ($ET_{FAO-C,d}$), para os tipos climáticos Cfa e Cfb do Estado do Paraná. Para obtenção das estimativas da ET_o com os dois programas foram necessários dados climáticos (horários e diários) de: umidade relativa máxima e mínima do ar (UR ; %); temperaturas máxima e mínima do ar (T ; °C); radiação solar incidente (R_s ; MJ m⁻² dia⁻¹); e, velocidade do vento a 2 m de altura (u_2 ; m s⁻¹). Os dados climáticos horários são das estações meteorológicas Castro (Clima Cfb) e Marechal Cândido Rondon (clima Cfa), pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), medidos no período entre 01 de janeiro de 2017 a 31 de março de 2017. A comparação dos resultados obtidos nas associações entre “ $ET_{OPM,d}$ vs $ET_{FAO-C,d}$ ” e “ $ET_{OPM,24h}$ vs $ET_{FAO-C,d}$ ” foi realizada por meio da raiz quadrada do erro quadrático ($RMSE$), coeficiente de correlação de Pearson (r) e índice de concordância “ d ”. Nas análises, verificou-se que: *i*) As associações entre “ $ET_{OPM,d}$ vs $ET_{FAO-C,d}$ ” e “ $ET_{OPM,24h}$ vs $ET_{FAO-C,d}$ ” indicaram excelente desempenho das estimativas da ET_o com o “Módulo Evapotranspiração da Plataforma Moretti”, em relação ao Programa “FAO ET_o Calculator”, para as estações Castro (clima Cfb) e Marechal Cândido Rondon (clima Cfa), do Estado do Paraná; *ii*) A $ET_{OPM,24h}$ obtida no “Módulo ET_o da Plataforma Moretti” tiveram médias diárias para os meses analisados (janeiro, fevereiro e março) muito próximas da $ET_{FAO-C,d}$ estimada com o programa “FAO ET_o Calculator” para o Estado do Paraná (climas Cfa e Cfb); *iii*) O “Módulo ET_o da Plataforma Moretti” evidenciou aspectos bem interessantes quanto a possibilidade de analisar série de dados climáticos de forma rápida e precisa, além de possibilitar estimativas de ET_o na periodicidade diária e horária

Palavras-chave: Ciclo hidrológico; relações hídricas; modelagem; agrometeorologia.

INTRODUÇÃO

A evaporação e transpiração compreendem o processo de evapotranspiração, sendo controlada pelo suprimento de água às plantas e interação entre variáveis meteorológicas. Ocorre naturalmente como forma de dissipar energia e manter o crescimento e desenvolvimento das plantas. A evapotranspiração (*ET*) é uma importante componente hidrológica aplicada ao processo de planejamento hídrico, uma vez que há necessidade de controle das entradas e saídas de água nos sistemas de cultivos. O conhecimento do valor da evapotranspiração ajuda na quantificação da saída de água do sistema de cultivo, possibilitando a realização do planejamento e manejo adequado dos recursos hídricos e do solo (Khazaei e Hosseini, 2015; Lopes e Leal, 2016; Ji et al., 2017).

Para melhor compreensão e utilização técnica, o conceito de evapotranspiração de referência (*ET_o*) foi idealizado e refere-se ao processo de perda de água para a atmosfera por evaporação do solo e transpiração de uma cultura hipotética de referência, como a grama (apresentando tamanho de 0,12 m) ou alfafa (com tamanho de 0,25 m), assumindo-se perfeito desenvolvimento vegetativo e condições ideais de suprimento de água. Padronizando-se os fatores internos e suprimento de água, tem-se a possibilidade de verificar a influência das variáveis externas sobre a *ET_o*, bem como sua tendência ao longo de determinado período (Allen, 1998; ASCE EWRI, 2005; Jerszurki et al., 2017).

A *ET_o* pode ser determinada diretamente com lisímetros ou evapotranspirômetros, e indiretamente com a utilização de equações (Souza, 2017). O uso das equações exige atenção e muito cuidado para que não haja erros nas estimativas. Por isso, a utilização de programas que permitem estimativas mais precisas da *ET_o* vem sendo cada vez mais procurados. Existem alguns pacotes e *Software* para o cálculo da *ET_o*, como o código “*Fortran Morton WREVP*” (McMahon et al., 2013), o pacote R “*Evapotranspiration*” (Guo et al., 2016) e o “*FAO ET_o calculator*” (FAO, 2009). Contudo, nem todos os programas disponíveis apresentam facilidade para analisarem períodos mais longos de *ET_o* (estimativa de séries diárias e horárias), e poucas opções são gratuitas, fato que dificulta a utilização dos mesmos. O programa “*FAO ET_o calculator*”, apresentado pela FAO (2009) é bastante difundido e utilizado para verificação da acurácia de outros sistemas ou programas desenvolvidos mais recentemente para estimar a *ET_o* (Sousa, 2012).

Buscando o desenvolvimento de uma ferramenta simples, de fácil utilização e sem custos, a “Plataforma Moretti / Laboratório de Modelagem e Sistemas Agrícolas (LAMOSA)” do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Paraná, está desenvolvendo um módulo de estimativa de séries de evapotranspiração de referência, constituído dentro de uma planilha eletrônica automática (Souza, 2019). O módulo estima a *ET_o* na periodicidade diária ou horária, tendo-se como base a equação Penman-Monteith apresentada por *American Society of Civil Engineers* (ASCE-EWRI, 2005; Souza, 2019).

Como o programa “*FAO ET_o Calculator*”, versão 3.2 (FAO, 2009) vem sendo utilizado e testado na literatura ao longo de vários anos, e apresenta bons resultados na estimativa da *ET_o* diária, acredita-se que as saídas obtidas com o programa (*ET_oFAO-C.d*) sejam as mais indicadas para comparar a exatidão de novas ferramentas desenvolvidas para essa finalidade.

Diante do contexto apresentado, teve-se por objetivo no presente estudo associar e analisar séries de ET_o diária ($ET_{oPM,d}$) e o somatório da ET_o horária em 24 horas ($ET_{oPM,24h}$), estimadas em um módulo desenvolvido em planilha eletrônica automática especialmente para essa finalidade, com a ET_o diária estimada no programa “FAO ET_o Calculator” ($ET_{oFAO-C,d}$), para os tipos climáticos Cfa e Cfb do Estado do Paraná.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi realizado com dados de duas estações meteorológicas do Estado do Paraná (Figura 1), região Sul do Brasil, localizadas em Castro (clima Cfb ; $-24,78^\circ$ S de Latitude; $-50,00^\circ$ W de Longitude; e 994 m de Altitude) e Marechal Cândido Rondon (clima Cfa ; $-24,53^\circ$ S de Latitude; $-54,02^\circ$ W de Longitude; e 392 m de Altitude). O clima subtropical Cfa apresenta boa distribuição da precipitação pluviométrica ao longo do ano, em média 1500 mm ano^{-1} , e temperatura média anual de 19°C . O clima subtropical Cfb apresenta precipitações bem distribuídas ao longo do ano, sendo superiores a 1200 mm ano^{-1} , e verões amenos com temperatura média anual de 17°C (Alvares et al., 2013). Foram utilizados os dados horários e diários disponíveis no Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), compreendendo o período entre 01 de janeiro de 2017 e 31 de março de 2017. Foram necessárias séries dos seguintes dados climáticos horários e diários: temperaturas máxima e mínima do ar (T ; $^\circ\text{C}$); umidade relativa máxima e mínima do ar (UR ; %); radiação solar incidente (R_s ; $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); e velocidade do vento a 2 m de altura (u_2 ; m s^{-1}). Resultando no uso de 1080 dados diários e 25920 dados horários.

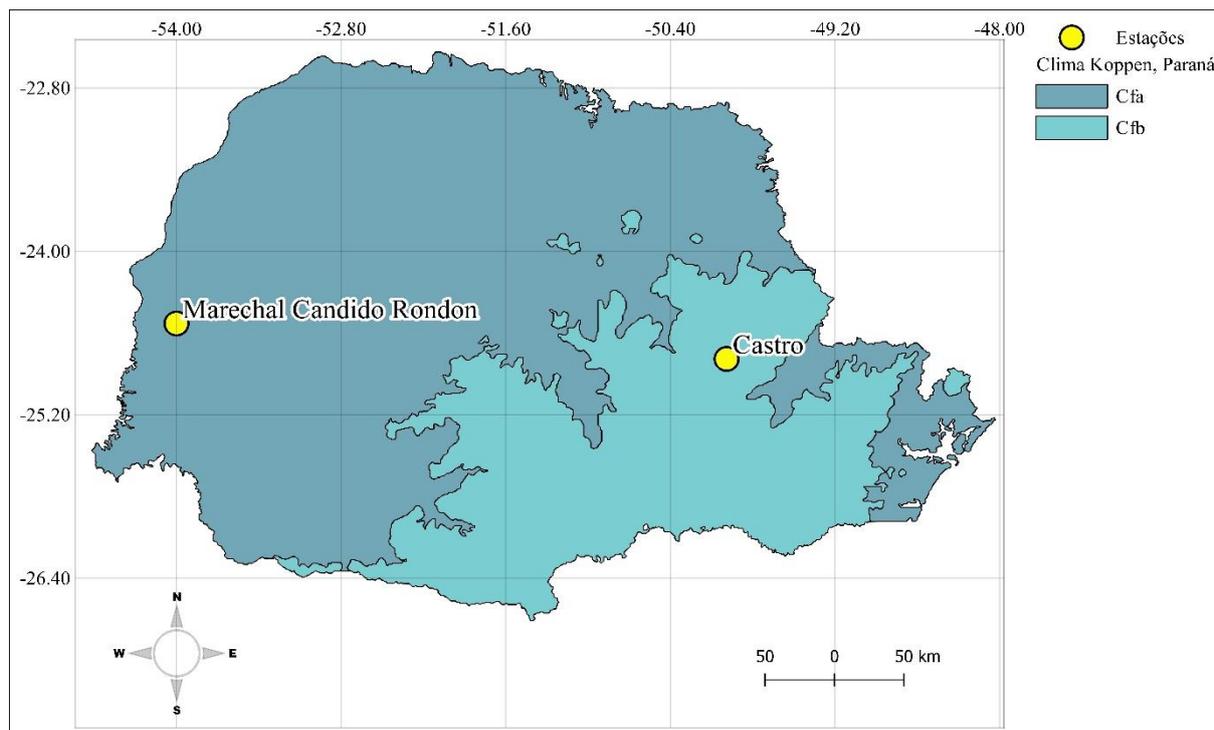


Figura 1 – Localização e tipo climático das estações meteorológicas de Castro (clima Cfb) e Marechal Cândido Rondon (Cfa). Fonte: Adaptado de IAPAR (2020).

Os valores de ET_o foram estimados com o “Módulo ET_o da Plataforma Moretti” (diária: $ET_{OPM,d}$ e horária: $ET_{OPM,h}$; Souza, 2019) e programa “FAO ET_o Calculator”, versão 3.2 (diária: $ET_{FAO-C,d}$). Os dois programas realizam os cálculos da ET_o baseando-se na equação de Penman-Monteith (Allen, 1998; ASCE-EWRI, 2005), utilizando cultura de porte baixo com 12 cm.

$$ET_o = \frac{(0,408 \cdot \Delta \cdot (Rn - G) + \gamma \cdot \frac{Cn}{(T + 273)} \cdot u_2 \cdot (es - ea))}{\Delta + \gamma \cdot (1 + Cd \cdot u_2)} \quad (1)$$

Sendo: ET_o – evapotranspiração de referência horária ou diária ($ET_{OPM,h}$, em mm h⁻¹; ou, $ET_{OPM,d}$ e $ET_{FAO-C,d}$ em mm dia⁻¹, respectivamente); 0,408 – coeficiente da equação (m² mm MJ⁻¹); Δ – declividade da curva de pressão de vapor da água à temperatura do ar (kPa °C⁻¹); Rn – saldo de radiação líquida na superfície (MJ m⁻² h⁻¹ ou MJ m⁻² dia⁻¹); G – balanço do fluxo de calor no solo (MJ m⁻² h⁻¹ ou MJ m⁻² dia⁻¹); γ – constante psicrométrica (kPa °C⁻¹); Cn – constante relacionada ao tipo de vegetação e escala de tempo considerado ($Cn_{horária} = 37$ K mm s³ Mg⁻¹ h⁻¹ ou $Cn_{diária} = 900$ K mm s³ Mg⁻¹ h⁻¹, para cobertura do solo com grama curta); T – temperatura média do ar (°C); u_2 – velocidade do vento a dois metros de altura (m s⁻¹); es – pressão de saturação de vapor (kPa); ea – pressão atual do vapor (kPa); Cd – constante relacionada ao tipo de vegetação e escala de tempo considerada ($Cd_{diurno} = 0,24$ s m⁻¹ para período diurno e grama curta; ou, $Cd_{noturno} = 0,96$ s m⁻¹ para período noturno e grama curta; ou, $Cd_{diária} = 0,34$ s m⁻¹ para grama curta).

Os 24 valores de evapotranspiração de referência horário ($ET_{OPM,h}$) de um dia, estimados com o “Módulo ET_o da Plataforma Moretti” (Souza, 2019), foram somados para comparação estatística com a $ET_{FAO-C,d}$ (“FAO ET_o Calculator”) do respectivo dia:

$$ET_{OPM,24h} = \sum_{h=1}^{n=24} ET_{OPM,h}$$

Sendo: $ET_{OPM,24h}$ – evapotranspiração de referência resultante do somatório do h -ésimo valor de evapotranspiração de referência horária de um mesmo dia (mm dia⁻¹); $ET_{OPM,h}$ – evapotranspiração de referência da h -ésima hora, estimados com o “Módulo ET_o da Plataforma Moretti” (mm h⁻¹); n – número de horas de um dia (adimensional; $n = 24$).

As associações entre os respectivos valores de “ $ET_{OPM,d}$ vs $ET_{FAO-C,d}$ ” e “ $ET_{OPM,24h}$ vs $ET_{FAO-C,d}$ ” foram verificadas em análises de regressão. Para comparação, utilizou-se os principais índices e coeficientes recomendados na literatura (Souza, 2018):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (Y_{p_i} - Y_{a_i})^2}$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(Y_{p_i} - \bar{Y}_p) \cdot (Y_{a_i} - \bar{Y}_a)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{p_i} - \bar{Y}_p)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Y_{a_i} - \bar{Y}_a)^2}}$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{ai} - Y_{pi})^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (|Y_{ai} - \bar{Y}_p| \cdot |Y_{pi} - \bar{Y}_p|)^2}}$$

Sendo: $RMSE$ – raiz quadrada do erro quadrado médio (%); r – coeficiente de correlação de Pearson (adimensional); d – índice de concordância “ d ” de Willmott (1982) (adimensional); Y_{pi} – valores de ETo obtidos com o método padrão no i -ésimo dia (mm dia^{-1}); Y_{ai} – valor de ETo obtido com o método alternativo no i -ésimo dia (mm dia^{-1}); n – número de dias analisados (adimensional); \bar{Y}_p – média dos valores de ETo obtidos com o método padrão para todos os dias analisados (mm dia^{-1}); \bar{Y}_a – média dos valores de ETo obtidos com o método alternativo para todos os dias analisados (mm dia^{-1}).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A disponibilidade de dados de evapotranspiração de referência (ETo) é importante para pesquisadores e técnicos de diversas áreas. Dados confiáveis ETo são fundamentais para orientar e auxiliar em inúmeras pesquisas na área de engenharia de água e solo, além de contribuir na tomada de decisões para o planejamento, projeto e manejo das melhores práticas agrícolas a serem realizadas para manter ou melhorar a produção agrícola. Pensando em atender a essa demanda, o desenvolvimento de *softwares* pode servir como ferramenta auxiliar na obtenção desses dados. Nesse contexto, a “Plataforma Moretti” desenvolveu um Módulo em planilha eletrônica e com o auxílio da linguagem de programação *Visual Basic for Applications* (VBA-Macro), para realizar cálculos da evapotranspiração de referência horária e diária, baseando-se na equação de Penman-Monteith (Allen, 1998; ASCE-EWRI, 2005). O uso do Módulo é muito simples, basta o usuário escolher algumas opções e entrar com as séries de dados climáticos necessários, no período e periodicidade desejada (Figura 2).

Para as periodicidades diária ou horária o “Módulo ETo da Plataforma Moretti” ajusta os valores de velocidade do vento, quando estas não encontram-se medidas na altura padrão de 2 metros, bastando adicionar a altura em que foi medida. Permite também que sejam computados dados em diferentes alturas sem haver necessidade de cálculos manuais de conversão. Para radiação solar incidente (R_s) diária, tem-se a opção de entrar com valores medidos, ou estima-los com as equações de Angström-Prescott e Hargreaves-Samani (Souza, 2017).

O Programa “FAO ETo Calculator” não realiza conversões automaticamente, sendo necessário que os valores estejam pré-estabelecidos nas unidades exigidas, não estima ETo em periodicidade horária e, considerando os valores das variáveis de entrada, estabelece valores máximos e mínimos para o período e localidade. Desta forma, no caso de algum erro do sensor, tendo-se valor acima do máximo estabelecido pelo “FAO ETo Calculator”, o programa realizará as estimativas somente se for admitido o valor máximo estabelecido.

Considerando os valores máximos de radiação solar incidente (R_s) estabelecidos no programa “FAO ETo Calculator” para a estação Cândido Rondon (clima *Cfa*), foi necessário excluir os períodos diários em que o programa acusou exceder o limite permitido (Figura 3). Assim, foram utilizados 76 dos 90 dias analisados, estando os erros associados à radiação incidente (R_s), principalmente no mês de fevereiro.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ / SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGENHARIA AGRÍCOLA
UFPR **Plataforma Moretti**
LAMOS - LABORATÓRIO DE MODELAGEM DE SISTEMAS AGRÍCOLAS

PLATAFORMA MORETTI: MÓDULO - CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_o) DIÁRIA E HORÁRIA COMO MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH

Autor:
Jorge Luiz Moretti de Souza (LAMOS/ DSEA/ SCA/ UFPR)

Endereço:
Rua dos Funcionários, 1540 - Curitiba, PR
CEP: 80035-050 Telefone: (041) 3350-5689
e-mail: jmoretti@ufpr.br
Site: http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/

ET_{oPM}-Diária **ET_{oPM}-Horária** **Fechar**

Versão 3.0 / 2019
(p. Moretti_ET_{oPM}_2019)

(a)

CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_{oPM}) DIÁRIA COM O MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH

Informações gerais do local analisado: Data inicial dos cálculos: 01/01/2018 dia / mês / ano
Latitude (ϕ): 16.2 graus
Altitude do local (Z): 49.0 m
Altura da medição do vento (Z): 2.0 m
Unidade de medida da velocidade do vento: m/s

Opções sobre a radiação solar incidente (Rs) do local: Radiação solar incidente (Rs): Os valores foram medidos
Coeficiente linear "a" de Angström-Prescott: adimensional
Coeficiente angular "b" de Angström-Prescott: adimensional
Coeficiente K_{RS} de Hargreaves e Samani: $^{\circ}\text{C}^{-1}$

Declaração de constantes: Constante solar (G_{sc}): 4.92 $\text{MJ m}^{-2}\text{h}^{-1}$
Albedo da cultura (α_f): 0.23 adimensional
Constante de Stefan-Boltzmann (σ): 4.90E-09 $\text{MJ K}^{-4}\text{m}^{-2}\text{dia}^{-1}$

Dados e intervalos de tempo				Dados de entrada				Atmosfera e psicrometria												
Item	DATA			Hora (UTC)	Temperaturas ($^{\circ}\text{C}$)		Umidade Relativa (%)		u_z	Rs	T_{med}	UR _{med}	$U_{zcorrigida}$	P_{atm}	γ	es	ea	Δ		
	Data	Dia	Mês	Ano	Início	Fim	T_{min}	T_{max}	UR _{min}	UR _{max}	m / s	$\text{MJ} / (\text{m}^2\text{dia})$	$^{\circ}\text{C}$	%	m s^{-1}	kPa	$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$	kPa	kPa	$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$
1	01/01/2018	1	1	2018	0	24	10,0	28,0	80,0	70,0	1,7	0,00	19,0	75,0	1,7	100,7	0,0670	2,5039	1,8142	0,1371
2	02/01/2018	2	1	2018	0	24	16,0	23,0	80,0	70,0	1,5	0,00	19,5	75,0	1,5	100,7	0,0670	2,3139	1,7106	0,1409
3	03/01/2018	3	1	2018	0	24	10,0	10,0	90,0	90,0	1,9	0,00	10,0	90,0	1,9	100,7	0,0670	1,2280	1,1052	0,0823

(b)

CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_{oPM}) HORÁRIA COM O MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH

Informações gerais do local analisado: Data inicial dos cálculos: 01/07/2017 dia / mês / ano
Latitude (ϕ): -9.4 graus
Longitude central do local considerado (Lz): 45.0 graus
Longitude do local de medição da radiação solar (Lm): 40.5 graus
Altitude do local (Z): 370.5 m
Altura da medição do vento (Z): 2.0 m
Unidade de medida da velocidade do vento: m/s

Opções sobre a radiação solar incidente (Rs) do local: Radiação solar incidente (Rs): Os valores foram medidos
Coeficiente linear "a" de Angström-Prescott: adimensional (Obs.: Ajustado para período horário)
Coeficiente angular "b" de Angström-Prescott: adimensional (Obs.: Ajustado para período horário)
Coeficiente K_{RS} de Hargreaves e Samani: $^{\circ}\text{C}^{-1}$ (Obs.: Ajustado para período horário)

Declaração de constantes: Constante solar (G_{sc}): 4.92 $\text{MJ m}^{-2}\text{h}^{-1}$
Albedo da cultura (α_f): 0.23 adimensional
Constante de Stefan-Boltzmann (σ): 2.04E-10 $\text{MJ K}^{-4}\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$

Dados e intervalos de tempo				Dados de entrada				Atmosfera e psicrometria												
Item	DATA			Hora (UTC)	Temperaturas ($^{\circ}\text{C}$)		Umidade Relativa (%)		u_z	Rs	T_{med}	UR _{med}	$U_{zcorrigida}$	P_{atm}	γ	es	ea	Δ		
	Data	Dia	Mês	Ano	Início	Fim	T_{min}	T_{max}	UR _{min}	UR _{max}	m / s	$\text{MJ} / (\text{m}^2\text{h})$	$^{\circ}\text{C}$	%	m s^{-1}	kPa	$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$	kPa	kPa	$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$
	1	7	2017	0	1	25,1	25,9	45,0	47,0	2,9	0,00	25,5	46,0	2,9	97,0	0,0645	3,2634	1,5011	0,1936	
	1	7	2017	1	2	24,4	25,1	47,0	51,0	2,6	0,00	24,8	49,0	2,6	97,0	0,0645	3,1209	1,5292	0,1862	
	1	7	2017	2	3	23,3	24,4	51,0	57,0	3,7	0,00	23,9	54,0	3,7	97,0	0,0645	2,9572	1,5969	0,1777	

(c)

Figura 2 – Formulários do Módulo da “Plataforma Moretti”, para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o) com método de Penman-Monteith: a) Formulário de abertura; b) Formulário para o cálculo da ET_o na periodicidade diária ($ET_{oPM,d}$); e, c) Formulário para o cálculo da ET_o na periodicidade horária ($ET_{oPM,h}$).

Data range.....

DataUndefined Value -999.000

Column Max....	29.9	28.2	91.5	88.2	3.95	35.29
Column Min....	22.2	21.0	58.5	49.1	0.17	2.11

Program limits (Data Range)

Upper limit....	45.0	45.0	100.0	100.0	8.00	34.34
Lower limit....	-15.0	-15.0	15.0	15.0	0.00	0.00

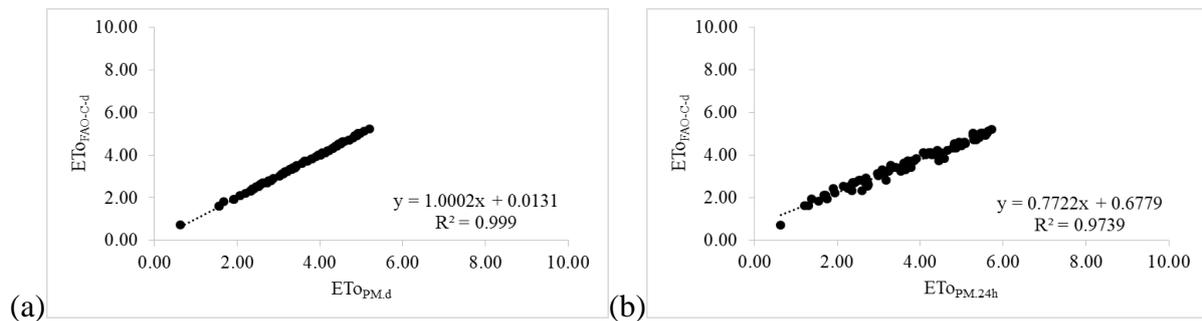
Figura 3 – Limites dos valores de radiação solar incidente (R_s) estabelecidos pelo programa “FAO ET_o Calculator”.

Verificou-se boa associação entre os valores de $ET_{OPM,d}$ e $ET_{FAO-C,d}$ (Tabela 1 e Figura 4), indicando boa precisão dos valores ET_o estimados com o “Módulo ET_o da Plataforma Moretti”, em relação ao Programa “FAO ET_o Calculator”. Em média, as correlações foram estreitas, houve boa concordância entre os valores e os erros foram baixos, sendo: $RMSE = 0,03$ mm dia⁻¹, $d = 1,0$ e $r = 1,0$ para a estação Castro (clima *Cfb*); e, $RMSE = 0,04$ mm dia⁻¹, $d = 1,0$ e $r = 1,0$ para a estação Marechal Cândido Rondon (clima *Cfa*).

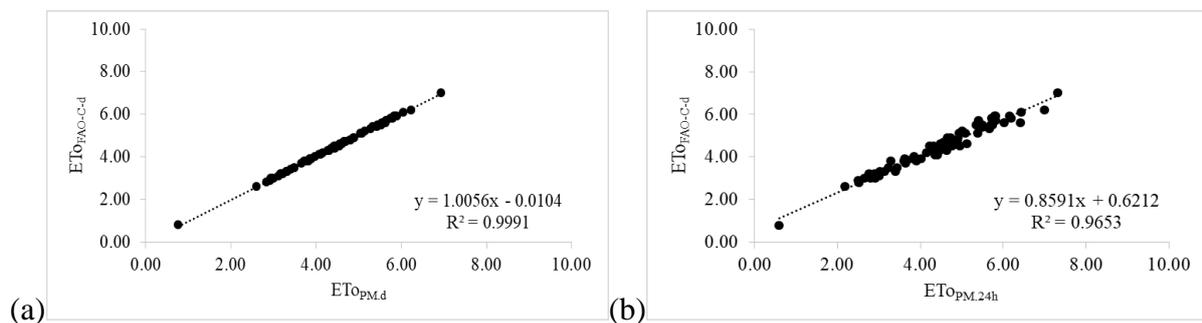
As associações entre os valores de $ET_{OPM,24h}$ e $ET_{FAO-C,d}$ (Tabela 1 e Figura 4) também resultaram em correlações estreitas, boa concordância e baixos erros com os valores de ET_o estimados no “Módulo ET_o da Plataforma Moretti”. De forma geral, verificou-se: $RMSE = 0,37$ mm dia⁻¹, $d = 0,97$ e $r = 0,99$, para a estação Castro (clima *Cfb*); e, $RMSE = 0,27$ mm dia⁻¹, $d = 0,98$ e $r = 0,98$ para a estação Marechal Cândido Rondon (clima *Cfa*). Os erros da $ET_{OPM,24h}$ foram superior aos verificados $ET_{OPM,d}$ (Tabela 1), em relação a $ET_{FAO-C,d}$.

Tabela 1. Raiz quadrada do erro quadrado médio ($RMSE$; mm dia⁻¹), índice “ d ” de concordância (adimensional), coeficiente de correlação (r ; adimensional) obtidos nas associações entre “ $ET_{OPM,d}$ vs $ET_{FAO-C,d}$ ” e “ $ET_{OPM,24h}$ vs $ET_{FAO-C,d}$ ”, no período entre 01 de janeiro de 2017 e 31 de março de 2017, para os climas *Cfa* e *Cfb*, predominantes no Estado do Paraná.

Estações	Métodos	Período	$RMSE$ (mm dia ⁻¹)	d (ad.)	r (ad.)		
Castro	“ $ET_{OPM,d}$ vs $ET_{FAO-C,d}$ ”	Janeiro	0,03	1,00	1,00		
		Fevereiro	0,03	1,00	1,00		
		Março	0,04	1,00	1,00		
		Média para clima <i>Cfb</i>	0,03	1,00	1,00		
	“ $ET_{OPM,24h}$ vs $ET_{FAO-C,d}$ ”	Janeiro	0,37	0,97	0,99		
		Fevereiro	0,40	0,96	1,00		
		Março	0,33	0,97	0,98		
		Média para clima <i>Cfb</i>	0,37	0,97	0,99		
		Marechal Cândido Rondon	“ $ET_{OPM,d}$ vs $ET_{FAO-C,d}$ ”	Janeiro	0,04	1,00	1,00
				Fevereiro	0,04	1,00	1,00
Março	0,03			1,00	1,00		
Média para clima <i>Cfa</i>	0,04		1,00	1,00			
“ $ET_{OPM,24h}$ vs $ET_{FAO-C,d}$ ”	Janeiro		0,22	0,98	0,98		
	Fevereiro		0,35	0,98	0,98		
	Março	0,23	0,99	0,99			
	Média para clima <i>Cfa</i>	0,27	0,98	0,98			



I) Estação Castro (clima *Cfb*)



II) Estação Marechal Cândido Rondon (clima *Cfa*)

Figura 4 – Análises de regressão linear entre respectivos valores de ET_o calculados no “Módulo ET_o da Plataforma Moretti” e programa “FAO ET_o Calculator”, para as estações climatológicas Castro (clima *Cfb*) e Marechal Cândido Rondon (clima *Cfa*), no período entre 01 de janeiro de 2017 e 31 de março de 2017, sendo: a) “ $ET_{OPM,d}$ vs $ET_{OFAO-C,d}$ ”; e, b) “ $ET_{OPM,24h}$ vs $ET_{OFAO-C,d}$ ”.

Sousa (2012) comparando valores de ET_o estimados em um aplicativo com os obtidos no software “FAO ET_o Calculator”, encontraram diferença média $0,56 \text{ mm dia}^{-1}$ nos resultados dos programas. Conforme o autor a diferença não representa grandes riscos ao manejo da irrigação. No presente estudo foram encontradas as seguintes diferenças médias: $0,01 \text{ mm dia}^{-1}$ para Castro (clima *Cfb*) e Marechal Cândido Rondon (clima *Cfa*), nas associações “ $ET_{OPM,d}$ vs $ET_{OFAO-C,d}$ ”; e, $0,14 \text{ mm dia}^{-1}$ para Castro (clima *Cfb*) e $0,01 \text{ mm dia}^{-1}$ para Marechal Cândido Rondon (clima *Cfa*), nas associações “ $ET_{OPM,24h}$ vs $ET_{OFAO-C,d}$ ”. Os resultados evidenciaram boa acurácia das estimativas $ET_{o,d}$ e $ET_{o,h}$ obtidas no “Módulo ET_o da Plataforma Moretti”.

Os resultados evidenciaram também que a $ET_{OPM,24h}$ diária, obtida com o somatório de 24 horas no “Módulo ET_o da Plataforma Moretti”, tiveram médias diárias para os meses de janeiro, fevereiro e março muito semelhantes a $ET_{OFAO-C,d}$ obtidas no programa “FAO ET_o Calculator”, para os climas *Cfa* e *Cfb* analisados no Estado do Paraná (Figura 5).

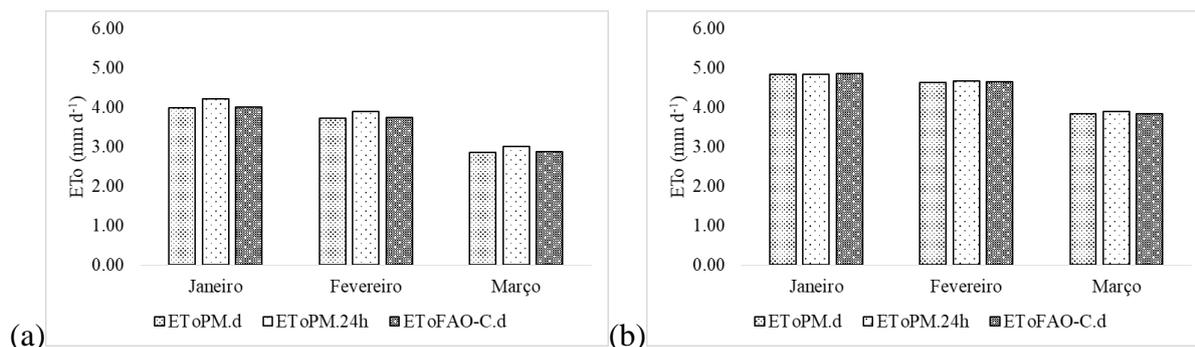


Figura 5 – Valores de ET_0 , média diária (mm dia^{-1}), obtidos com o “Módulo ET_0 da Plataforma Moretti” ($ET_{0PM.d}$ e $ET_{0PM.24h}$) e programa “FAO ET_0 Calculator” ($ET_{0FAO-C.d}$), para duas estações meteorológicas no Estado do Paraná, no período entre 01 de janeiro de 2017 e 31 de março de 2017: a) Castro (clima Cfb); e, b) Marechal Cândido Rondon (clima Cfa).

O “Módulo ET_0 da Plataforma Moretti” mostrou-se vantajoso por possibilitar a análise de série de dados necessitando de pouco tempo para execução e obtenção dos resultados. Os dados climáticos podem ser dispostos (copiados) por bloco no formulário do Módulo, o que é vantajoso, visto que no “FAO ET_0 calculator” exige-se alguns tipos de arquivo para que seja possível a realização de importação dos dados, bem como o programa não prossegue com as estimativas ET_0 no caso de haver alguma lacuna nos dados de entrada. O “Módulo ET_0 da Plataforma Moretti” permite deixar lacunas, realizando a estimativa dos demais períodos em que são dispostos todos os dados.

O uso do programa “FAO ET_0 calculator” é mais restrito por não realizar o cálculo da ET_0 horária. O “Módulo ET_0 da Plataforma Moretti” possibilita o cálculo da ET_0 na periodicidade horária, descrita por alguns estudos como mais confiável para a estimada na evapotranspiração na periodicidade diária (Sobrinho et al., 2011; Treder e Klamcowski, 2017). Nolz e Rodný (2019) consideram que os cálculos da ET_0 na periodicidade diária são mais simples, mas as estimativas horárias permitem acompanhar sua tendência ao longo das 24 horas do dia, inclusive no período noturno.

CONCLUSÕES

- As associações entre “ $ET_{0PM.d}$ vs $ET_{0FAO-C.d}$ ” ($RMSE \leq 0,04 \text{ mm dia}^{-1}$; $d = 1,00$; $r = 1,00$) e “ $ET_{0PM.24h}$ vs $ET_{0FAO-C.d}$ ” ($RMSE \leq 0,37 \text{ mm dia}^{-1}$; $d \geq 0,97$; $r \geq 0,98$) indicaram excelente desempenho das estimativas da ET_0 com o “Módulo ET_0 da Plataforma Moretti”, em relação ao Programa “FAO ET_0 Calculator”, para as estações Castro (clima Cfb) e Marechal Cândido Rondon (clima Cfa), do Estado do Paraná.
- A $ET_{0PM.24h}$ obtida no “Módulo ET_0 da Plataforma Moretti” tiveram médias diárias para os meses analisados (janeiro, fevereiro e março) muito próximas da $ET_{0FAO-C.d}$ estimada com o programa “FAO ET_0 Calculator” para o Estado do Paraná (climas Cfa e Cfb).
- O “Módulo ET_0 da Plataforma Moretti” mostrou aspectos bem interessantes quanto a possibilidade de analisar série de dados climáticos de forma rápida e precisa, além de possibilitar estimativas de ET_0 na periodicidade diária e horária.

LITERATURA CITADA

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage**, Paper n. 56, Roma, FAO, 1998.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ASCE-EWRI. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. Report of the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. Reston: **Institute of the American Society of Civil Engineers**; 2005.
- FAO - Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura. **ETo Calculator. Manual (38p) e software Version 3.1. 2009**. Land and Water Digital Media Series Nº 36.
- GUO, D.; WESTRA, S.; MAIER, H. R. An R package for modelling actual, potential and reference evapotranspiration. **Environmental Modelling & Software**, v.78, p.216–224, 2016.
- IAPAR. Instituto agrônomo do Paraná. Download de shapefile contendo a classificação climática predominante do Estado do Paraná. Acesso em: > <http://www.iapar.br/><. 2020.
- JERSZURKI, D.; SOUZA, J. L. M.; SILVA, L. C. R. Expanding the geography of evapotranspiration: An improved method to quantify land-to-air water fluxes in tropical and subtropical regions. **PLOS ONE**, v.12, n.6, 2017. Doi:10.1371/journal.pone.0180055.
- JI, X. B.; CHENC, J. M.; ZHAOA, W. Z.; KANGA, E. S.; JINA, B. W.; XUD, S.Q. Comparison of hourly and daily Penman-Monteith grass- and alfalfa-reference evapotranspiration equations and crop coefficients for maize under arid climatic conditions. Contents lists available at ScienceDirect. **Agricultural Water Management**, p.1-11. 2017. Doi:10.1016/j.agwat.2017.06.019.192.
- KHAZAEI, B.; HOSSEINI, S. M. Improving the performance of water balance equation using fuzzy logic approach. **Journal of Hydrology**, v.524, p.538-548, 2015.
- LOPES, I.; LEAL, B. G. Evapotranspiração horária x diária utilizando Penman-Monteith para o polo de desenvolvimento Petrolina-PE/Juazeiro-BA. **Revista Brasileira e Agricultura Irrigada**, v.10, n.5, p. 914-924. 2016.
- McMAHON, T. A.; PEEL, M. C.; LOWE, L.; SRIKANTHAN, R.; MCVICAR, T. R. Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, p. 1331–1363. 2013.
- NOLZ, R.; RODNÝ, M. Evaluation and validation of the ASCE standardized reference evapotranspiration equations for a subhumid site in northeastern Austria. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v.67, n.3, p.289-296. 2019. Doi: 10.2478/johh-2019-0004.
- SOBRINHO, T. A.; RODRIGUES, D. B. B.; OLIVEIRA, P. T. S.; REBUCCI, L. C. S.; et al. Estimativa da evapotranspiração de referência através de redes neurais artificiais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.26, n.2, p.197-203. 2011.
- SOUSA, J. S. C. Procal_ETo: programa computacional para cálculo da ETo pelo método de Penman-Monteith. Irriga, Botucatu, Edicao Especial, p. 380 - 395, 2012.

SOUZA, J. L. M. **Ciclo da água na agricultura: fundamentos para o estudo do sistema solo-planta-atmosfera.** Curitiba: Plataforma Moretti/DSEA/SCA/UFPR, 2017. (Manual didático).

SOUZA, J. L. M. **Plataforma Moretti: Módulo – Cálculo da evapotranspiração de referência (ETo) diária e horária com método de Penman-Monteith.** Curitiba: LAMOS/DSEA/UFPR. 2019.

SOUZA, J. L. M. **Fundamentos de matemática e estatística para formulação de modelos e análise de dados: aplicado às ciências agrárias.** Curitiba, Plataforma Moretti/DSEA/SCA/UFPR, 2018. (Manual didático)

TREDER, W.; KLAMKOWSKI, K. An hourly reference evapotranspiration model as a tool for estimating plant water requirements. Polska Akademia Nauk, Oddział w Krakowie. **Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich infrastructure and ecology of rural areas**, v.2, n. 1, p.469-481. 2017. Doi: 10.14597/infraeco.2017.2.1.035.

WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin American Meteorology Society**, v.63, n.11, p.1309-1313, 1982.