

ANÁLISE DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL NO MUNICÍPIO DE CAMBARÁ DO SUL/RS

Analysis of the potential evapotranspiration in Cambará do Sul municipality, Rio Grande do Sul state

Vinícius Santanna Castiglio
Graduando do curso de Engenharia Hídrica, UFRGS
viniciuscastiglio@hotmail.com

Karla Campagnolo
Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS
karlac@ufrgs.br

Masato Kobiyama
Professor, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS
masato.kobiyama@ufrgs.br

Recebido em 14/01/2021

Aceito em 21/04/2021

RESUMO: A evapotranspiração, como parte do ciclo hidrológico, é classificada em duas categorias: real e potencial, onde a primeira representa a perda natural de água para a atmosfera, e a segunda, retrata condições ótimas de equilíbrio entre a evaporação e a transpiração. Neste trabalho foi caracterizado a evapotranspiração potencial (ETP) pelos métodos de Thornthwaite e Penman modificado e analisados os dados medidos em duas estações meteorológicas instaladas na cidade de Cambará do Sul (RS), no período de outubro/2017 a setembro/2019, e os dados de insolação diária de uma estação convencional para o mesmo período no município de Bom Jesus (RS). Então, foram analisadas as diferenças dos dados medidos de precipitação, temperatura, umidade relativa e velocidade do vento entre as duas estações meteorológicas, bem como da ETP estimada, no qual uma se encontra em uma região de preservação ambiental e a outra em uma área urbanizada. Com o método de Penman modificado, a Estação INMET apresenta uma evapotranspiração média de 1075 mm/ano e a Estação GPDEN 684 mm/ano. No caso do método de Thornthwaite com os dados da Estação GPDEN, o valor mensal da ETP foi sempre subestimado, com exceção de janeiro. Os resultados obtidos permitem concluir que o método de Penman modificado gera os valores da ETP maiores do que o de Thornthwaite.

Palavras-chave: Evapotranspiração; Método de Thornthwaite; Método de Penman modificado; Hidroclimatologia.

ABSTRACT: Evapotranspiration, as a part of the hydrological cycle, is classified into two categories: real and potential, where the first represents the natural loss of water to the atmosphere, and the second portrays optimal conditions of balance between evaporation and transpiration. In this work, potential evapotranspiration (ETP) was characterized by the methods of Thornthwaite and modified Penman, and analyzed the data measured at two meteorological stations installed in Cambará do Sul city (RS), during the period from October/2017 to September/2019, and daily insolation data from a conventional station for the same period in the municipality of Bom Jesus (RS). Thus, the main existing discrepancies in the data (precipitation, temperature, relative humidity and wind velocity) measured between the two meteorological stations and the estimated ETP were evaluated, in which one is in an environmentally preserved region and the other in an urbanized area. With the modified Penman method, the INMET Station presents estimate mean evapotranspiration of 1075mm/year meanwhile the GPDEN Station 684mm/year. In the case of the Thornthwaite method with data from the GPDEN Station, the monthly values of ETP were always underestimated, with the exception of January. The obtained results permit to conclude that the modified Penman method generates higher ETP values than those of Thornthwaite method.

Keywords: Evapotranspiration; Thornthwaite Method; Modified Penman Method; Hydroclimatology.

INTRODUÇÃO

O clima é formado por vários elementos, entre eles: radiação solar, precipitação, umidade do ar, vento e evapotranspiração, sendo de extrema importância analisar a ação de cada um deles no ambiente (FRANCISCO et al., 2017). No ciclo hidrológico, a evapotranspiração é o segundo componente mais importante nos termos de quantidade de água transportada, atrás apenas da precipitação (BRUTSAERT, 2005). A evapotranspiração é classificada em duas categorias: real e potencial, onde a primeira representa a perda natural de água para a atmosfera, e a segunda, condições ótimas de equilíbrio entre a evaporação e a transpiração. O estudo da evapotranspiração potencial (ETP) é um dos fatores mais relevantes para estudos hidrológicos e de irrigação na agricultura. Sua análise permite estimar por meio do balanço hídrico o excedente e a deficiência hídrica em uma determinada região, auxiliando na gestão de recursos hídricos.

O primeiro modelo para estudo da ETP foi proposto por Thornthwaite (1944), levando em consideração apenas a temperatura média mensal para a sua estimativa. Com o avanço do conhecimento e refinamento nos estudos sobre o tema, o método de Penman (1948) mostrou-se mais completo por combinar, segundo Camargo e Sentelhas (1997), o efeito do balanço de energia como poder evaporante do ar, além de ter a sua natureza puramente física. Por outro lado, se mostrou complexo, por necessitar de dados de difícil medição (AYOADE, 1983). Surgiram outros métodos para estimativa da ETP, sempre buscando simplificar e aprimorar essa estimativa, havendo, atualmente, diversos métodos disponíveis, sendo que muitos têm ampla aceitação, enquanto outros são bastante criticados e até desprezados (CAMARGO; SENTELHAS, 1997).

Conforme Chauhan e Shrivastava (2009) e Oliveira et al. (2019), o método de Penman-Monteith parametrizado pela FAO (ALLEN et al., 1998) é considerado como o padrão para estimar a ETP. De fato, Muhammad et al. (2019), que utilizaram os dados de 10 estações meteorológicas na Malásia e aplicaram 31 modelos, demonstraram que o método de Penman-Monteith-FAO apresentou os melhores resultados. Entretanto, é muito comum ocorrer situações onde alguns parâmetros necessários para esse método não são medidos, em diversas regiões no Brasil (ALENCAR; SEDIYAMA; MANTOVANI, 2015) e também no mundo (GURSKI; JERSZURKI; SOUZA, 2018). Portanto, sempre permanece a importância do uso de métodos mais simples, ou seja, métodos que exigem menor número de parâmetros (CHAUHAN; SHRIVASTAVA, 2009; CARVALHO et al., 2011).

Avaliando 11 métodos para estimar a ETP no município de Uberama (MG), Melo e Fernandes (2012) observaram um desempenho não satisfatório de Penman. Souza e Campelo Júnior (2017) realizaram estudo comparativo entre 5 métodos com dados obtidos no município de Santo Antônio de Leverger (MT), e relataram que o método de Penman foi satisfatório enquanto os métodos de Penman-Monteith-FAO e de Thornthwaite não funcionaram bem. Caporusso e Rolim (2015) realizaram estudo comparativo de 19 métodos para estimar a ETP no município de Jaboticabal (SP) e mostraram que os métodos de Penman e de Thornthwaite tiveram um bom desempenho. No estudo de balanço hídrico na bacia do rio Cubatão-Sul (SC), Kobiyama e Chaffe (2008) demonstraram uma boa aplicabilidade dos modelos de

Penman modificado e também de Thornthwaite. Além disso, utilizando o método de Penman modificado, Vestena e Kobiyama (2007) e Chaffe, Silva e Kobiyama (2008) estudaram o balanço hídrico em bacias hidrográficas na região metropolitana de Curitiba (PR) e obtiveram conhecimentos hidrológicos interessantes, o que implica um bom desempenho do modelo de Penman modificado.

O conhecimento de evapotranspiração é de extrema importância para um manejo integrado de recursos hídricos e bacias hidrográficas (WARD; TRIMBLE, 2004; FALAMARZIA et al., 2014). No município de Cambará do Sul (RS), o ecoturismo vem sendo impulsionado nos últimos anos principalmente pela divulgação das paisagens características da região, como cânions e cascatas (SUERTEGARAY; FUJIMOTO, 2004). Por consequência, seu desenvolvimento eleva as interferências antropogênicas no meio, trazendo alterações nas paisagens e possíveis mudanças climatológicas na região, bem como nos recursos hídricos.

O objetivo principal do presente trabalho foi caracterizar e comparar a ETP entre outubro/2017 e setembro/2019 na região central do município de Cambará do Sul (RS) e no Parque Nacional de Aparados da Serra (PNAS), sendo estimada por meio dos métodos de Penman (1948) modificado por Doorenbos e Pruitt (1977), e Thornthwaite (1944). Esses dois métodos são relativamente simples e requerem pouco parâmetros para estimar a ETP. A ETP mensal é muito útil para o planejamento da gestão integrada regional. A fim de compreender melhor os resultados, foram comparados os aspectos meteorológicos tais como umidade relativa do ar, precipitação, temperatura e velocidade do vento, entre as estações utilizadas para análise.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

Cambará do Sul é um município localizado na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul. Segundo a classificação do Sistema de Köppen, o clima da região é subtropical úmido sem estação seca definida, com verão ameno (Cfb). O bioma é Mata Atlântica, com vegetação formada pela Floresta Ombrófila Mista e campos de altitude, onde as araucárias (*Araucaria angustifolia*) estão associadas a outras espécies como o pinheiro-bravo (*Podocarpus lambertii*) e a bracatinga (*Mimosa scabrella*) (PILLAR et al., 2009; IGANCI et al., 2011).

Dados utilizados

Foram utilizados os dados de duas estações meteorológicas instaladas no município de Cambará do Sul. A estação automática “Davis Vantage Pro 2” foi instalada pelo Grupo de Pesquisas em Desastres Naturais (GPDEN) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) junto à sede do PNAS, a cerca de 15 km da área urbana de Cambará do Sul. A fim de compreender os processos hidrológicos, especialmente da bacia do rio Perdizes, e também contribuir à gestão de desastres naturais no PNAS, o GPDEN vem realizando o monitoramento hidrológico na região desde 2017 (CAMPAGNOLO et al., 2019).

Outra estação meteorológica utilizada foi a “Cambará do Sul-A897”, instalada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), do modelo “Vaisala MAWS 301”. Os dados foram obtidos diretamente com o INMET. Essa estação fica localizada no centro do município e coleta dados desde 2016. Além disso, o Penman (1948) modificado por Doorenbos e Pruitt (1977) necessita de dados de insolação diária e, por não estarem disponíveis nas estações meteorológicas automáticas, essa informação foi obtida da estação meteorológica convencional de Bom Jesus (Bom Jesus-RS, OMM 83919) implantada pelo INMET e em funcionamento desde 1948. Essa estação fica localizada a 50 km do município de Cambará do Sul. A Figura 1 apresenta os locais dessas três estações, cujas descrições se encontram na Tabela 1. Descrição das Estações Meteorológicas.

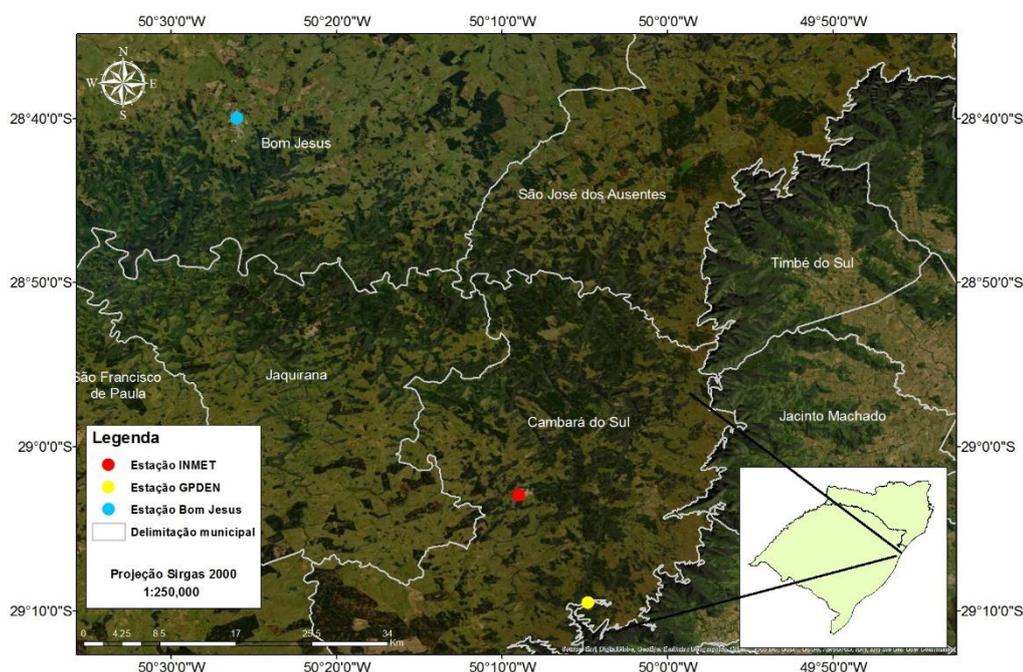


Figura 1. Localização das estações meteorológicas na região do município de Cambará do Sul/RS. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Tabela 1. Descrição das Estações Meteorológicas.

Nome da estação	Descrição	Início da operação	Intervalo de medições	Latitude (S)*	Longitude (W)*	Altitude (m)	Distância da Estação INMET (km)
INMET	Cambará do Sul A897	24/11/2016	10 minutos	29,049125°	50,149636°	1017,0	-
GPDEN	GPDEN PNAS	03/10/2017	10 minutos	29,158387°	50,079778°	917,0	13,8

Bom Jesus	Bom Jesus RSOMM 83919	01/05/1948	6 horas	28,666667°	50,433333°	1047,5	50,6
-----------	-----------------------------	------------	---------	------------	------------	--------	------

*Datum Sirgas 2000.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Método de Penman modificado

Foram comparados os dados de umidade relativa do ar (%), temperatura (°C) e velocidade do vento (km/h), precipitação (mm/dia) das duas estações automáticas no período de outubro/2017 a setembro/2019. Posteriormente foi realizado o cálculo da evapotranspiração potencial com o método de Penman (1948) modificado por Doorenbos e Pruitt (1977):

$$ETP = C \cdot [W \cdot R_n + ((1 - W) \cdot f(u) \cdot (e_a - e_d))] \quad (1)$$

Em que,

ETP é a evapotranspiração potencial (mm/dia);

C é a correção dos efeitos de dia e da noite sobre a radiação solar (adimensional), umidade relativa (adimensional) e velocidade do vento (km/h);

W é o fator de ponderação relacionado com a temperatura e altitude (adimensional);

R_n é o saldo de radiação (W/m²);

f(u) é a função de relação da velocidade do vento (adimensional);

e_a é a pressão de vapor da água saturada (mbar); e

e_d é a pressão de vapor real (mbar).

O valor de *C* pode ser encontrado através da tabela expandida de Doorenbos e Pruitt (1977), que relaciona a velocidade do vento com a radiação solar. O presente trabalho adotou o valor de 1,10 para *C*. O valor de *W* foi calculado com a seguinte equação:

$$W = (0,02 \cdot 10^{-16}) \cdot T^3 + (0,02 \cdot 10^{-2}) \cdot T^2 - (1,78 \cdot 10^{-2}) \cdot T + 5,78 \quad (2)$$

Em que,

T é a temperatura (°C).

Utilizando esse *T*, o valor de *e_a* foi calculado:

$$e_a = 6,11 \cdot 10^{\frac{7,50 \cdot T}{237,30 + T}} \quad (3)$$

Relacionando *e_a* com umidade relativa, foi estimado o valor de *e_d*. A insolação foi relacionada com a insolação potencial máxima diária (*N*) por hora interpolada através dos dados de Smithsonian Institution (1951). Tendo como dado de entrada a latitude e o mês da insolação, os valores de *N* usados no trabalho estão na Tabela 2.

Tabela 2. Insolação Máxima conforme a latitude e o mês, em horas.

Latitude	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
30°	13,9	13,1	12,3	11,4	10,6	10,3	10,4	11,0	11,9	12,8	13,6	14,1

Fonte: Adaptado de Smithsonian Institution (1951).

O saldo de radiação foi determinado pelo balanço entre a radiação de ondas curtas e a radiação de ondas longas, sendo a primeira medida pela estação meteorológica de Bom Jesus, e a segunda calculada como:

$$Rl = 4,0 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 + 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 + 0,15 \cdot T + 11,05 \cdot (0,34 \cdot 0,044 \cdot \sqrt{e_d}) \cdot \left(0,1 \cdot 0,9 \cdot \frac{n}{N}\right) \quad (4)$$

Em que,

Rl é a radiação de ondas longas (mm/dia);

e_d é a pressão de saturação real (mbar); e

n é a insolação medida (h).

A função da velocidade do vento $f(u)$, no qual a medição de velocidade se encontra a 2 metros acima da superfície é:

$$f(u) = 0,27 \cdot \left(1 + \frac{u}{100}\right) \quad (5)$$

Em que,

U é a velocidade do vento na altura de 2 m (km/dia).

Aqui, nota-se que a velocidade do vento, pela Estação INMET estar na altura de 10 m, foi convertida para a altura de 2 m:

$$u = \frac{V \cdot 4,87}{\ln(67,8 \cdot h - 5,42)} \quad (6)$$

Em que,

V é a velocidade do vento (km/h) medida na altura h do instrumento (m).

Método de Thornthwaite

A ETP foi estimada também com o método de Thornthwaite (1944), sendo comparado com os valores estimados da Estação do GPDEN:

$$ETP = fc \cdot 16 \cdot \left(\frac{10 \cdot Tc}{I}\right)^b \quad (7)$$

Em que,

fc é o fator de correção da latitude para o hemisfério Sul (adimensional), obtido na Tabela 3;

Tc é a temperatura média do mês calculado (°C); e

b e I são coeficientes adimensionais:

$$b = 6,75 \cdot I^3 \cdot 10^{-7} - 7,71 \cdot I^2 \cdot 10^{-6} + 1,792 \cdot I \cdot 10^{-2} + 0,49239 \quad (8)$$

$$I = \sum_1^{12} \left(\frac{T_c}{5}\right)^{1,514} (9)$$

Tabela 3. Correção (*f_c*) para o método de Thornthwaite.

Latitude	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
30° S	1,20	1,03	1,06	0,95	0,92	0,85	0,90	0,96	1,00	1,12	1,14	1,21

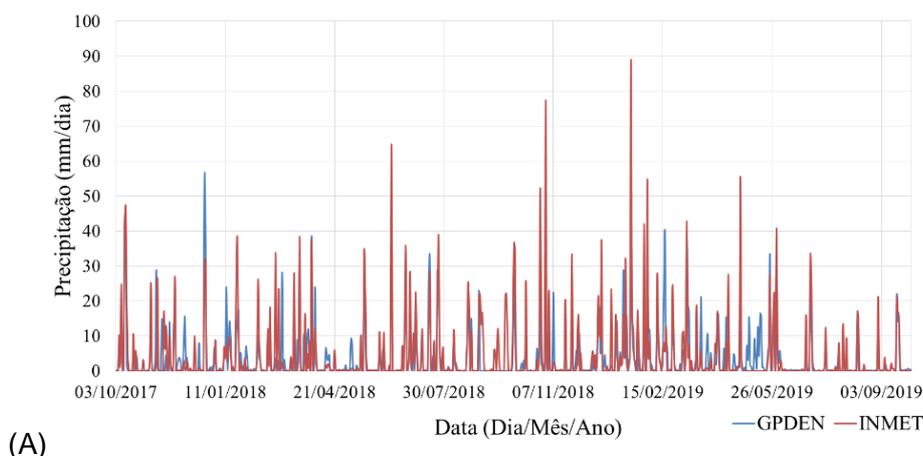
Fonte: Adaptado de Tucci (1993).

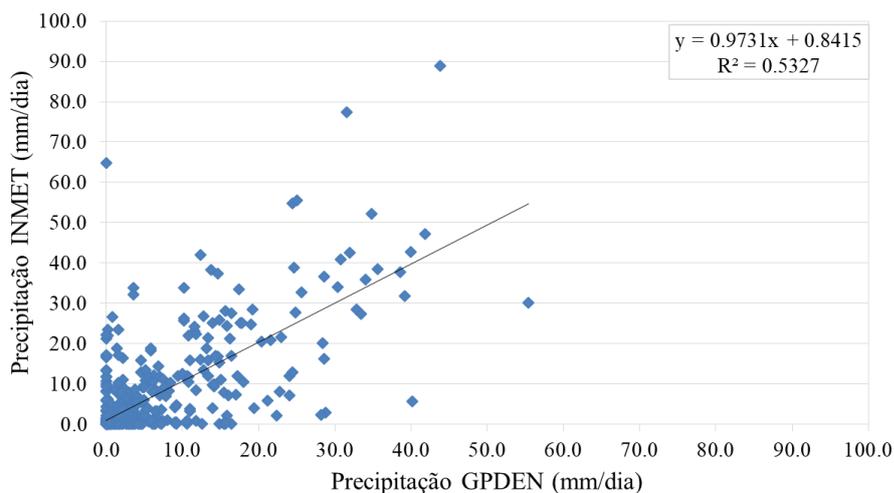
A Estação GPDEN (GPDEN PNAS) não possui um piranômetro, desta forma a radiação solar utilizada foi a obtida pela Estação INMET (Cambará do Sul A897). Contudo, os valores de precipitação, umidade relativa do ar, temperatura e velocidade do vento foram mantidos de cada estação meteorológica. Assim, comparou-se os dados medidos de cada estação para analisar a diferença de valores de ETP existente nas regiões. Além disso, por falhas nas séries, os meses de setembro/2018 e maio/2019 não puderam ser analisados.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Análise dos parâmetros meteorológicos

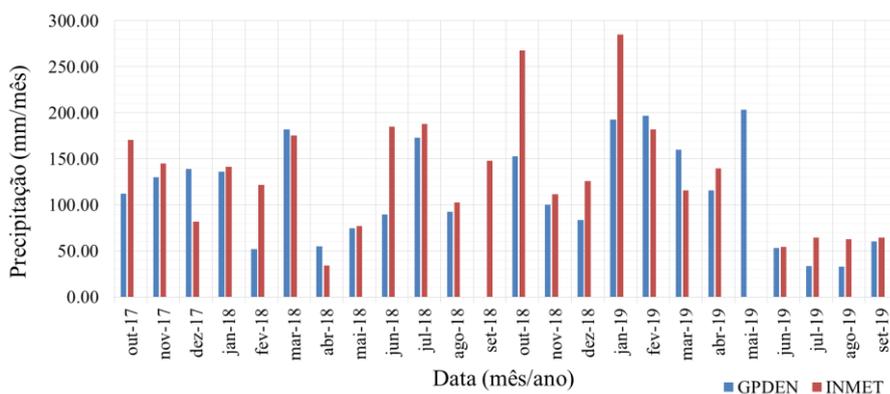
Nas Figura 2A e 3A foram comparados os valores de precipitação diários e mensais, respectivamente, entre 03/10/2017 e 31/09/2019. As precipitações medidas apresentaram uma correlação (Figuras 2B e 3B) entre os declives e os aclives, ocorrendo medições similares na maior parte do período. Entretanto, a precipitação mensal apresentou diferenças significativas nos meses de outubro/2017, dezembro/2017, fevereiro/2018, junho/2018, outubro/2018 e janeiro/2019. Sendo a amplitude máxima de 115,2 mm em outubro/2018, tendo a Estação GPDEN acumulado 152,6 mm de precipitação e a Estação INMET 267,8 mm de chuva (Figura 3A). Observou-se uma tendência de ocorrer precipitação maior na estação INMET do que na GPDEN.



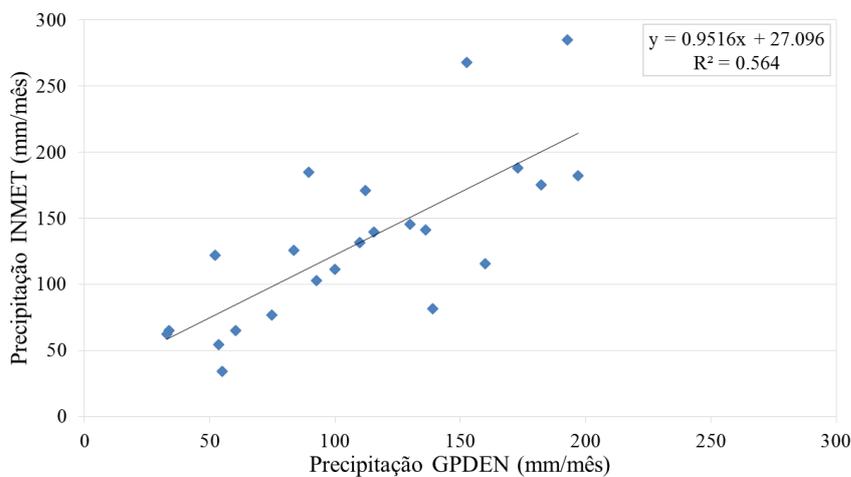


(B)

Figura 2. Comparação dos dados da precipitação diária obtidos em duas estações: (A) série temporal; e (B) correlação com regressão linear. **Fonte:** Elaborado pelo autor.



(A)

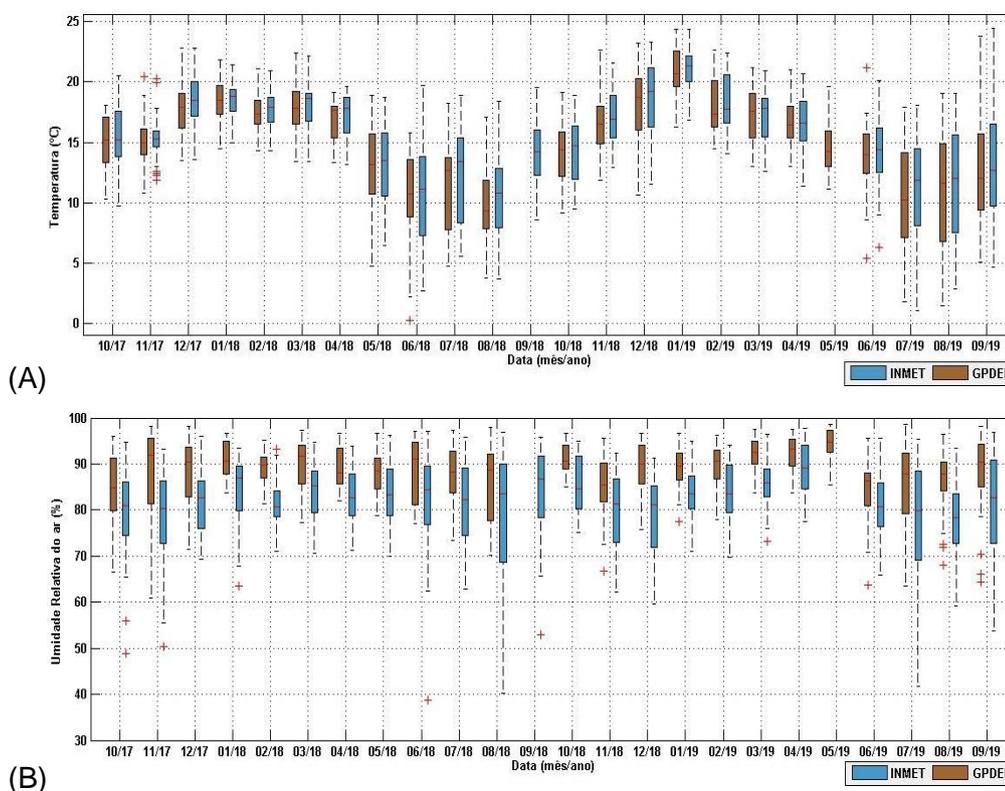


(B)

Figura 3. Comparação dos dados da precipitação mensal obtidos em duas estações: (A) série mensal; e (B) correlação com regressão linear. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Salienta-se que o valor máximo da precipitação mensal obtido na Estação GPDEN foi de 203,6 mm em maio/2019. Porém, a Estação INMET apresentou uma inconsistência nos dados durante esse mês, impedindo a comparação. Nessa situação, o valor máximo mensal registrado na Estação INMET foi de 285 mm em janeiro/2019 (Figura 3A). As maiores discrepâncias nos dados ocorreram próximo à estação de verão, com exceção de junho/2018, no qual se têm a distribuição irregular da precipitação através de chuvas convectivas. As precipitações diárias e as precipitações mensais (Figura 2B e Figura 3B), respectivamente, apresentaram uma correlação entre as precipitações acumuladas, sendo elas um pouco maior do que 0,5.

A temperatura média diária demonstrada na Figura 4A apresentou uma tendência similar nos quartis e em suas medianas, e uma amplitude maior no inverno. Além disso, os limites extremos das temperaturas diárias mostraram poucos meses com diferenças acentuadas, sendo eles outubro/2017, junho/2018, novembro/2018 e junho/2019. Comparando o mesmo mês na série, percebe-se que em 2019 registrou-se temperaturas mais elevadas, principalmente janeiro/2019 e setembro/2019. Os valores médios da umidade relativa medida na Estação GPDEN (Figura 4B) apresentaram pouca variação no verão, não havendo valores extremos menores que 70% nesse período e sua mediana próxima ou acima de 90%. As maiores amplitudes da umidade ocorrem entre os meses de junho e agosto. Isso ocorre naturalmente devido à baixa temperatura na região.



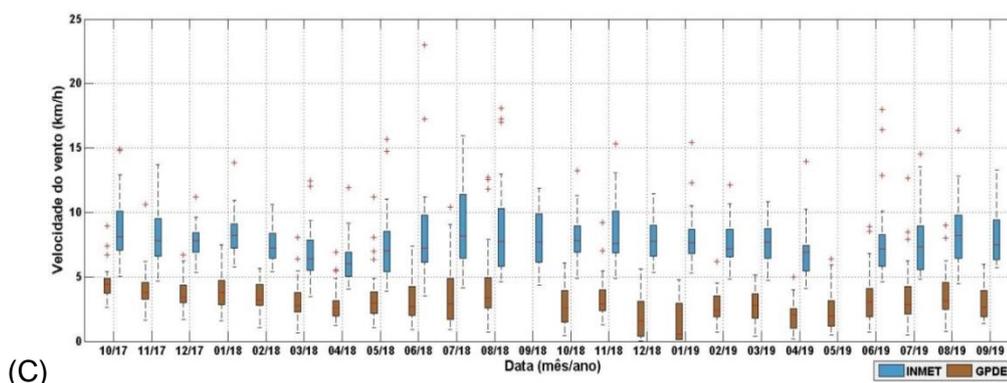


Figura 4. Comparação de variação mensal dos dados climáticos entre duas estações: (A) Temperatura; (B) umidade relativa; e (C) velocidade do vento. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

A Estação INMET apresentou uma elevada amplitude nos quartis e nos extremos do Boxplot em quase todo o ano, com exceção entre os meses de março até maio. Sendo maior a amplitude da umidade relativa no inverno, com variações entre 90% e 40% nos extremos superior e inferior, respectivamente, principalmente em agosto/2018 e julho/2019 (Figura 4B). As medições de umidade se comportaram de forma similar em todo o período, incluindo declives e acíves. Contudo, essa Estação apresentou, em todos os meses, uma amplitude maior na umidade relativa. Um dos fatores que pode ter influenciado foi a predominância de vegetação na região do PNAS, que favorece a manutenção da umidade nos quartis, próxima ou acima de 80%.

Os dados de velocidade do vento (Figura 4C) medidos da Estação INMET apresentaram valores elevados, principalmente entre julho/agosto e outubro/novembro de 2017. Percebe-se uma variação bem distribuída da velocidade diária do vento, apresentando uma diminuição entre o outono e o verão, e uma elevação na primavera e no inverno. A Estação GPDEN apresentou uma variação menor da amplitude durante o ano (Figura 4C), com distribuição homogênea. Entre junho e agosto, como ocorreu com a Estação INMET, tiveram as maiores variações, com velocidade do vento diária acima de 10 km/h. As Estações GPDEN e INMET tiveram uma tendência similar, com boa correspondência nos pontos de elevação e diminuição. Contudo, a Estação INMET apresentou maiores velocidades médias diárias que a Estação GPDEN, com uma velocidade do vento médio anual 40% maior, vale ressaltar que os dados de velocidade de vento da Estação INMET foram corrigidos para 2 m. A Estação GPDEN está instalada próxima a sede administrativa do PNAS, e essa condição pode ter influenciado nas medições de velocidade do vento e ser uma das causas para a acentuada diferença nas medições entre as estações meteorológicas.

Estimativa da ETP com método de Penman modificado

Os valores da ETP da Estação GPDEN (Figura 5), entre fevereiro e julho de 2018 e 2019, obtidos com o método de Penman modificado, apresentaram baixa amplitude tanto em seus quartis quanto em seus limites inferiores e superiores, variando de 0,1 até 5 mm/dia. Nos demais meses a amplitude nos limites variou de forma mais significativa, porém os quartis não excederam 4 mm/dia. A maior diferença entre os

limites foi no mês de novembro de 2017, sendo o limite inferior de 0,98 mm/dia e o superior de 6,87 mm/dia.

Na Estação INMET, a ETP estimada apresentou resultados mais elevados que a Estação GPDEN, com outliers acima de 10 mm/dia em alguns meses. Além disso, a amplitude foi maior nos períodos mais extremos, verão e inverno. Isso está relacionado com a variação mais acentuada da temperatura e da velocidade do vento nesses períodos.

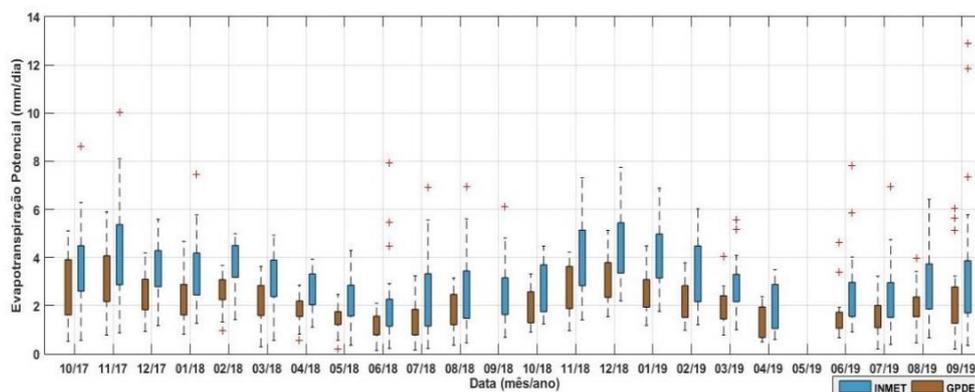


Figura 5. Evapotranspiração potencial diária calculado pelo método de Penman (1948) combinado com Doorenbos e Pruitt (1977). **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Os valores de ETP obtidos com os dados de cada estação apresentaram similaridades, com acíves e declives correspondentes durante o ano. No inverno e no verão, ocorre um aumento na amplitude da ETP, na qual há uma variação brusca nos parâmetros medidos. Contudo, a Estação INMET apresentou resultados mais acentuados que os estimados com os dados da Estação GPDEN. Isso ocorreu devido à Estação INMET ter registrado valores mais elevados para a velocidade do vento e menores para a umidade relativa.

A Figura 6 mostra uma boa correlação dos valores da ETP diária entre as Estações GPDEN e INMET, sendo o valor de R^2 de 0,793. A Estação GPDEN, em 51,4% dos dias analisados, teve resultados abaixo ou igual a 2 mm/dia, em 43,6%, valores entre 2 e 4 mm/dia e, nos dias restantes, ocorreram resultados acima de 4 mm/dia. A Estação INMET teve, em 27,0% dos dias analisados, a ETP igual ou abaixo de 2 mm/dia, em 49,9%, valores entre 2 e 4 mm/dia. Além disso, apresentou, em 23,1% dos dias, a ETP entre 4 e 6 mm/dia.

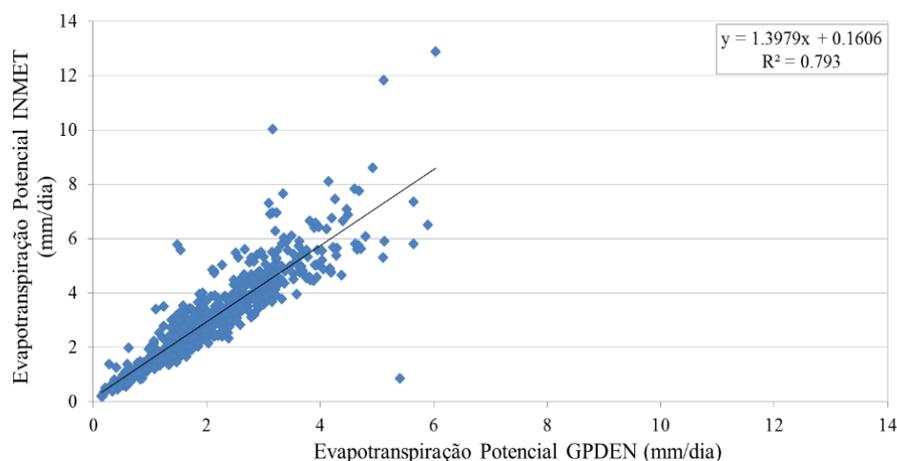


Figura 6. Regressão linear da Evapotranspiração Potencial diária. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Comparando as ETP diárias, a Estação INMET teve maiores resultados, com apenas 27% dos dias abaixo de 2 mm/dia, enquanto a Estação GPDEN teve metade dos dias analisados com ETP abaixo deste limiar. As duas estações tiveram resultados próximos no número de dias com ETP entre 2 e 4 mm/dia. No entanto, para a estimativa acima de 4 mm/dia, a Estação INMET apresentou mais de 20% de ocorrência e a Estação GPDEN, apenas 5,4%.

A regressão da ETP mensal foi satisfatória, apresentando uma boa relação nos aclives e declives (Figura 7). Os valores da ETP mensal estimados na estação INMET foram aproximadamente 1,5 vezes maiores do que aqueles na estação GPDEN. Porém, na Estação INMET, ocorreram variações superiores em todos os meses, sendo, em média, 65% maior que o estimado na Estação GPDEN.

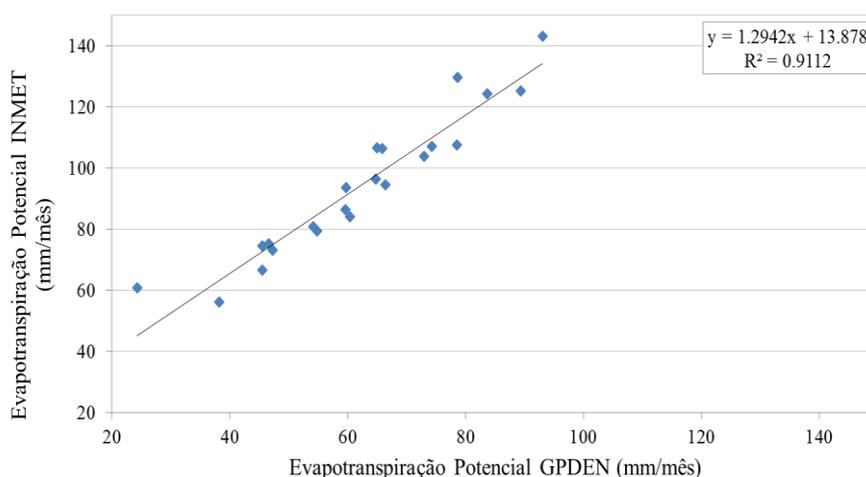


Figura 7. Regressão linear da Evapotranspiração Potencial mensal. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

A diferença entre os valores de ETP das duas estações pode ser observada na Figura 8. Como já mencionado, tal diferença pode resultar da diferença da umidade relativa

e da velocidade registradas. Além disso, a temperatura teve maior destaque no aumento e na diminuição da ETP, mas pouco influenciou na diferença entre os dados.

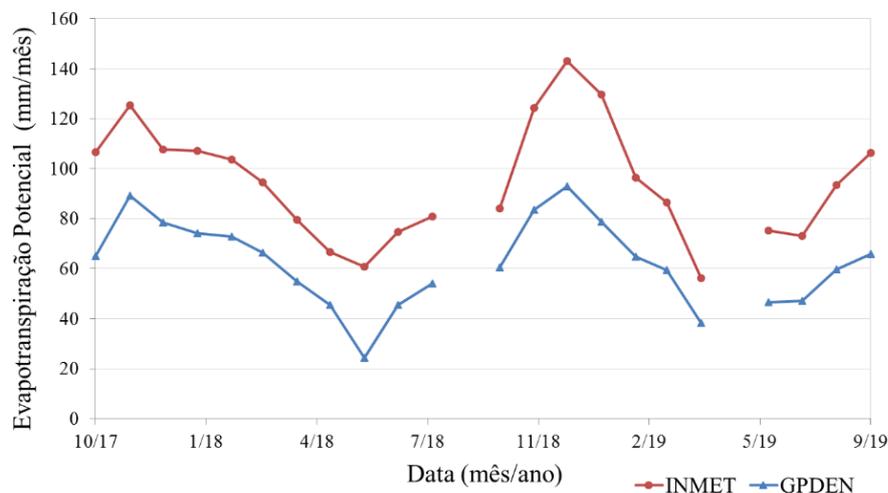


Figura 8. Evapotranspiração Potencial mensal estimada com método de Penman modificado. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Por apresentar medições de 2 anos, foi estimado a ETP média anual de cada estação. Além disso, devido a falhas nas séries, foi estimado a média mensal para cada estação, tendo como resultado a ETP de 62,2 mm/mês para a Estação GPDEN e 94,4 mm/mês para a Estação INMET. Assim, calculando a média da ETP anual para cada estação, foi estimado a ETP de 746,6 mm/ano para a Estação GPDEN e 1132,8 mm/ano para a Estação INMET.

A ETP anual na Estação INMET foi 51,7% maior que a estimada na Estação GPDEN. Além disso, a Estação INMET mediu uma precipitação de 1580 mm/ano enquanto que, na Estação GPDEN, obteve-se 1318 mm/ano. Dessa forma, calculando o balanço hídrico, temos um excedente de 572,3 e 447,4 para a Estação GPDEN e INMET, respectivamente, não apresentando uma diferença de 125 mm/ano entre as estações. Conforme Francisco et al. (2017), através do balanço hídrico é possível perceber que a evapotranspiração real se comporta de forma semelhante à precipitação pluvial, e quando houver um maior índice de precipitação, ocorrerá também aumento nas taxas evapotranspiratórias.

Comparação dos métodos de Thornthwaite e de Penman modificado

O método de Thornthwaite (1944) estima a ETP utilizando a temperatura média mensal. Como as temperaturas medidas nas estações apresentaram baixa variação, não foram comparados os resultados estimados por esse método entre as Estações GPDEN e INMET. Assim, comparou-se a ETP pelo método de Thornthwaite (1944) com os registros da Estação GPDEN e pelo método Penman (1948) modificado por Doorenbos e Pruitt (1977) com as Estações GPDEN e INMET.

Matzenauer et al. (2011), estimou a ETP pelo método de Thornthwaite para a região de Cambará com uma série histórica de dados com 30 anos de medição, período entre

1976 e 2005. Dessa forma, buscando validar e corroborar com o estudo proposto, as ETP foram comparadas com os dados estimados pela normal climatológica de Matzenauer et al. (2011).

A estimativa da ETP pelo método de Thornthwaite subestimou, com exceção de janeiro, a estimativa da normal climatológica de Matzenauer et al. (2011), tendo essa um resultado próximo à Estação GPDEN. A Estação INMET superestimou, na maioria dos meses, a estimativa histórica de Matzenauer et al. (2011), principalmente no inverno (Figura 9). As diferenças identificadas nas estimativas ocorreram, principalmente, entre os meses de abril e novembro (2018/2019). As similaridades ocorreram nos verões, com exceção no mês de janeiro/2019 no qual o método de Thornthwaite superestimou drasticamente a ETP. A Figura 10 apresenta a regressão entre os métodos de Thornthwaite e Penman modificado com os dados da Estação GPDEN, sendo o R² de 0,396.

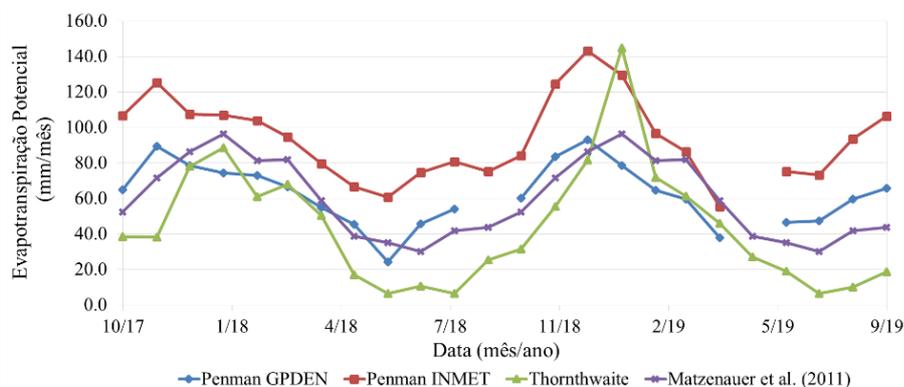


Figura 9. Evapotranspiração Potencial utilizando os métodos de Penman modificado e Thornthwaite (1944). **Fonte:** Elaborado pelo autor.

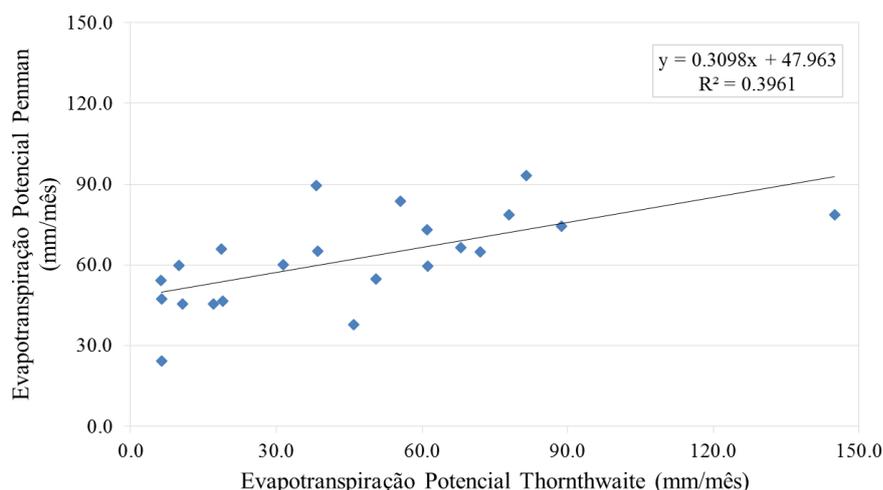


Figura 10. Correlação dos valores mensais da Evapotranspiração Potencial, calculados com os métodos de Penman modificado e de Thornthwaite. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

O método de Thornthwaite (1944) representou, sem contabilizar os meses de verão, 45,2%, em média, da ETP estimada com o método de Penman e, no verão, o método

de Thornthwaite foi cerca de 11,3% maior que a ETP estimada pelo método de Penman. Desta forma observamos que o método de Thornthwaite subestimou, na maioria dos meses, a ETP. Essa tendência foi observada também por Kobiyama e Chaffe (2008).

Conforme Camargo e Camargo (2000), o método de Thornthwaite, apesar de utilizar apenas a temperatura, consegue estimar de forma satisfatória a ETP para locais úmidos. Contudo, para períodos de seca, não se recomenda sua utilização. Fato confirmado por Dorfman (1977), que cita que no Rio Grande do Sul o método de Thornthwaite para valores mensais é frequentemente utilizado, apesar de subestimar os valores, principalmente no outono e inverno.

O método de Thornthwaite (1944), por não relacionar os fatores umidade relativa do ar, velocidade do vento e saldo de radiação em sua estimativa, não apresentou resultados satisfatórios nos períodos de menores temperaturas e inverno, sendo estes os períodos de menores precipitações. Nos períodos em que a temperatura foi mais elevada, as estimativas de ETP pelo método apresentaram resultados próximos ao método Penman Modificado, sendo, também, o período de maior precipitação. A normal climatológica estimada por Matzenauer et al. (2011) ficou relativamente próxima à estimativa da Estação GPDEN e apresentou aclives e declives similares à estimativa com Thornthwaite. Isso pode implicar que esse método poderá ser utilizado como padrão da ETP média na região para períodos úmidos.

CONCLUSÕES

- Os valores registrados em vários parâmetros foram diferentes entre as estações meteorológicas na região de Cambará do Sul/RS, mesmo em distâncias próximas, de forma acentuada principalmente em relação à umidade relativa do ar e velocidade do vento. A precipitação apresentou uma diferença de quase 100 mm/mês em alguns meses;
- Desta forma, a diferença nos dados meteorológicos influenciou diretamente na ETP, tendo a Estação INMET estimado valores acumulados superiores aos da Estação GPDEN;
- A correlação do método de Thornthwaite e o de Penman modificado foi de 0,396, sendo que o método Thornthwaite subestimou na maioria das vezes o valor da ETP. Contudo, no período do verão, os métodos apresentaram resultados similares;
- Com o método de Penman modificado, os valores da ETP foram estimados em 1075 mm/ano e 684 mm/ano para as estações INMET e GPDEN, respectivamente.

AGRADECIMENTO

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Programa Pró-Recursos Hídricos, Chamada nº 16/2017. Os autores agradecem aos funcionários do Parque Nacional de Aparados da Serra pelo apoio operacional de monitoramento.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, L.P.; SEDIYAMA, G.C.; MANTOVANI, E.C. Estimation of reference evapotranspiration (ET_o) under FAO standards with missing climatic data in Minas Gerais, Brazil. *Engenharia Agrícola*, v.35, n.1, p. 39-50, 2015.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper*, n. 56, FAO, Rome, Italy, 300p, 1998.
- AYOADE, J.O. *Introdução à climatologia para os Trópicos*. 4 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1983, p. 128-138.
- BRUTSAERT, W. *Hydrology: an introduction*. 1 ed. New York, Cambridge: Cambridge University, 2005, p. 117-158.
- CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C.; Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.5, n.1, p. 89-97, 1997.
- CAMARGO, A.P.; CAMARGO, M.B.P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. *Revista Bragantia*, v.59, n.2, p. 125-137, 2000.
- CAMPAGNOLO, K.; CASTIGLIO, V.S.; VASCONCELLOS, S.M. KOBAYAMA, M. Aplicação do Tank Model para a bacia do rio Perdizes em Cambará do Sul/RS. In: *XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, Foz do Iguaçu. Anais, 2019, 10p.
- CAPORUSSO, N.B.; ROLIM, G.S. Reference evapotranspiration models using different time scales in the Jaboticabal region of São Paulo, Brazil. *Acta Scientiarum Agronomy*, v.37, n.1, p. 1-9, 2015.
- CARVALHO, L.G.; RIOS, G.F.A.; MIRANDA, W.L.; CASTRO NETO, P. Evapotranspiração de referência: Uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v.41, p. 456-465, 2011.
- CHAFFE, P.L.B.; SILVA, R.V.; KOBAYAMA, M. Rainfall-runoff process analysis of the Pequeno River catchment, Curitiba metropolitan region, Brazil, with two hydrological models. *Revista Ambi-Água*, v.3., n.3, p. 43-54, 2008.
- CHAUHAN, S.; SHRIVASTAVA, R.K. Performance evaluation of reference evapotranspiration estimation using climate based methods and artificial neural networks. *Water Resource Management*, v. 23, n. 5, p. 825-837, 2009.
- DOORENBOS, J.; PRUIT, W.O. Crop Water Requirements. *Irrigation and Drainage Paper*, n. 24, FAO, Rome, Italy, p. 15-29, 1977.

DORFMAN, R. *Crítérios de avaliação de alguns métodos de estimativa da evapotranspiração potencial*. Dissertação (Mestrado em Hidráulica Aplicada), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 130p, 1977.

FALAMARZIA, Y.; PALIZDANA, N.; FENG, H.T.; SHUILEE, Y. Estimating evapotranspiration from temperature and wind speed data using artificial and wavelet neural networks (WNNs). *Agricultural Water Management*, v.140, p. 26-36, 2014.

FRANCISCO, P.R.M.; MEDEIROS, R.M.; MATOS, R.M., SANTOS, D.; SABOYA, L.M.F. Evapotranspiração de referência mensal e anual pelo método de Thornthwaite para o estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Climatologia*, v.20, p. 135-147, 2017.

GURSKI, B.C.; JERSZURKI, D.; SOUZA, J.M. Alternative Methods of Reference Evapotranspiration for Brazilian Climate Types. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.33, n.3, p. 567-578, 2018.

IGANCI, J.R.V.; HEIDEN, G.; MIOTTO, S.T.S.; PENNINGTON, R.T. Campos de Cima da Serra: the Brazilian Subtropical Highland Grasslands show an unexpected level of plant endemism. *Botanical Journal of the Linnean Society*, v. 167, p. 378-393, 2011.

KOBIYAMA, M.; CHAFFE, P.L.B. Water balance in Cubatão-Sul river catchment, Santa Catarina, Brazil. *Revista Ambi-Água*, v.3, n.1, p. 5-17, 2008.

MATZENAUER, R.; RADIN, B.; ALMEIDA, I.R. *Atlas Climático: Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura Pecuária e Agronegócio; Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO), Porto Alegre, 2011.

MELO, G.L.de; FERNANDES, A.L.T. Evaluation of empirical methods to estimate reference evapotranspiration in Uberaba, State of Minas Gerais, Brazil. *Engenharia Agrícola*, v.32, n.5, p. 875-888, 2012.

MUHAMMAD, M.K.; NASHWAN, M.S.; SHAHID, S.; ISMAIL, T.B.; SONG, Y.H.; CHUNG, E.S. Evaluation of Empirical Reference Evapotranspiration Models Using Compromise Programming: A Case Study of Peninsular Malaysia. *Sustainability*, 11, 4267, 2019.

OLIVEIRA, L.A.; CASAROLI, D.; ALVES JÚNIOR, J.; EVANGELISTA, A.W.P. Evapotranspiration: A scientometric analysis. *Científica*, v.47, n.1, p. 8–14, 2019.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London*, n.193, p. 120–145, 1948.

PILLAR, V.P.; MULLER, S.C.; CASTILHOS, Z.M.S.; JACQUES, A.V.A. *Campos Sulinos – conservação e uso sustentável da biodiversidade*. 1 ed. Brasília, Ministério do Meio Ambiente, 2009, 403p.

SMITHSONIAN INSTITUTION. *Smithsonian Meteorological Tables*. 6th ed, U.S. Govt. Print. Off., Washington, 527p, 1951.

SOUZA, A.F.; CAMPELO JÚNIOR, J.H. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para região da Baixada Cuiabana, MT. *Agrometeoros*, v.25, n.2, p. 395-403, 2017.

SUERTEGARAY, D.M.A.; FUJIMOTO, N.S.V.M. Morfogênese do relevo do Rio Grande do Sul. In: VERDUM, R.; BASSO, L.A.; SUERTEGARAY, D.M.A. (orgs.). *Rio Grande do Sul: paisagens e territórios em transformação*. Ed. UFRGS, Porto Alegre, p. 11-26, 2004.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, v.38, p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C.W.; WILM, H.G. Report of the Committee on evapotranspiration and transpiration, 1943-1944. *Transactions of the American Geophysical Union*, v.25, n.5, p. 686-693, 1944.

VESTENA, L.R.; KOBİYAMA, M. Water balance in Karst: study of the Ribeirão da Onça catchment in Colombo City, Paraná State – Brazil. *Brazilian Archives of Biology and Technology an International Journal*, v.50, n.5, p. 905-912, 2007.

WARD, A.D.; TRIMBLE, S.W. *Environmental Hydrology*. 2nd ed. Boca Raton: Lewis Publishers, 2004, 475p.