



## METODOLOGIAS DE CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA E O BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO (1972-2012) EM DIAMANTINA - MG

Maria José Hatem de Souza<sup>1</sup>, Audenis Fagner de Jesus Nascimento<sup>2</sup>, Fulvio Cupolillo<sup>3</sup>, Denise Aparecida Antunes<sup>4</sup>, Reynaldo Campos Santana<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Eng<sup>a</sup>. Agrícola, Prof<sup>a</sup>. Adjunta, Departamento de Agronomia /Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (DAG/UFVJM), Diamantina-MG, Fone: 38 3532 1200, [mariahatem@yahoo.com.br](mailto:mariahatem@yahoo.com.br).

<sup>2</sup>Eng. Florestal, Estudante de Mestrado em Ciências Florestais, Dep. Eng. Florestal (UFVJM).

<sup>3</sup>Geógrafo, Prof. D.1 do Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG), Campus Governador Valadares – MG.

<sup>4</sup>Tecnóloga em Gestão Ambiental, IFMG, Governador Valadares – MG.

<sup>5</sup>Eng. Florestal, Prof. Adjunto Dep. Eng. Florestal (UFVJM).

Apresentado no XVIII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – 02 a 06 de setembro de 2013- Centro de Convenções e Eventos Benedito Nunes, Universidade Federal do Para, Belém, PA.

**RESUMO:** Avaliou-se, neste trabalho, o balanço hídrico climatológico de Thornthwaite e Mather, em Diamantina-MG; calculado a partir do modelo de estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) de Thornthwaite (1948), e com os dados de evaporação obtidos no atmômetro de Piche. O modelo de estimativa de ET<sub>o</sub> de Penman-Monteith (1991) foi considerado o padrão para fins de comparação. Utilizou-se de dados climáticos referentes ao período de 1972 a 2012. No geral, pode-se dizer que o modelo de Thornthwaite (TM) subestima a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), superestima o armazenamento da água no solo (ARM) e o excedente hídrico (EXC) e subestima a evapotranspiração real (ETR) e a deficiência hídrica (DEF). O atmômetro de Piche superestima a ET<sub>o</sub> quando considera-se os 12 meses do ano, subestimando-a na estação chuvosa (de novembro a abril) e superestimando-a na estação seca (de maio a outubro), refletindo na subestimativa do ARM e da ETR, e na superestimativa da DEF e no EXC. Os resultados mostram que sempre que houver dados disponíveis deve-se optar estimar a ET<sub>o</sub> por Penman-Monteith.

**Palavras chaves:** atmômetro de Piche, Thornthwaite e Mather, Penman-Monteith

### CALCULATION METHODS OF EVAPOTRANSPIRATION REFERENCE AND CLIMATIC WATER BALANCE (1972-2012) IN DIAMANTINA - MG

**ABSTRACT:** It was evaluated in this work, the climatic water balance of Thornthwaite and Mather, in Diamantina-MG; calculated from the model to estimate reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) developed by Thornthwaite (1948), and the evaporation data obtained from Piche Evaporimeter. Penman-Monteith (1991) model was considered the standard for comparison purposes. It was used climate data for the period 1972-2012. Generally it can be said that the Thornthwaite model (TM) underestimates the reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>), overestimates the water storage in the soil (ARM) and water excess (EXC) and underestimates the real evapotranspiration (ETR) and water deficit (DEF). The Piche Evaporimeter overestimates ET<sub>o</sub> when one considers the 12 months of the year, underestimating the rainy season (November to April) and overestimating it in the dry season (May to October), reflecting the underestimation of ARM and ETR, and overestimation of DEF and EXC. The results show that wherever there are data available to be chosen by estimating the ET<sub>o</sub> Penman-Monteith.

**Keywords:** Piche Evaporimeter, Thornthwaite e Mather, Penman-Monteith





## INTRODUÇÃO

O cálculo do balanço hídrico é de extrema importância para se verificar o déficit e o excedente hídrico de uma área. É utilizado na agricultura, em práticas de plantios e irrigação, e na climatologia, para mapeamento de regiões climatologicamente homogêneas. No balanço hídrico climatológico, a precipitação é a entrada e a evapotranspiração a saída de água no solo, e o armazenamento máximo é considerado de 100 mm. O Balanço hídrico proposto por THORNTHWAITE e MATHER (1955) considera para cálculo da evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>) o modelo de estimativa proposto por Thornthwaite em 1948. O método de Thornthwaite foi um dos pioneiros nos cálculos de ET<sub>0</sub>, levando em consideração as temperaturas médias do local. Porém, esse método foi elaborado e bem avaliado para a região norte-americana onde se tem um predomínio de clima temperado. A Organização Mundial da Agricultura (FAO) recomenda que o cálculo da ET<sub>0</sub> seja feito pelo método de Penman-Monteith (1991), por este apresentar um melhor resultado, sendo desta forma considerado o método padrão de estimativa da ET<sub>0</sub> (PEREIRA et al., 1997 e 2002). Muitas vezes não é possível utilizar o método de Penman-Monteith (PM), uma vez que este requer muitas variáveis meteorológicas para o seu cálculo. A evaporação é mensurada indiretamente pelo atmômetro de Piche, em que a evaporação é verificada em uma superfície porosa úmida. No Brasil, ele é o mais usado em meteorologia e é também conhecido como evaporímetro de Piche. Ele é normalmente instalado no abrigo meteorológico e a maioria das estações do INMET possui este sensor (VARAJÃO-SILVA, 2006).

Este trabalho teve como objetivo comparar o balanço hídrico climatológico calculado utilizando o modelo de Penman-Monteith, na estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>), com o balanço hídrico obtido com o método originalmente proposto por Thornthwaite na estimativa da ET<sub>0</sub> e, também com o balanço hídrico calculado com os dados de evaporação obtidos no atmômetro de Piche. Sendo o balanço hídrico calculado com o método de Penman-Monteith considerado o padrão para comparação.

## MATERIAIS E MÉTODOS

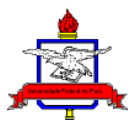
Utilizaram-se dados climáticos mensais, da Estação Climatológica Principal do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em Diamantina-MG (1296 m de altitude, latitude de 18,15°S e longitude de 43,36°W). Os dados são referentes ao período de 1972 a 2012 e obtidos no INMET (INMET-BDMEP, 2013).

Calculou-se o balanço hídrico climatológico utilizando-se três metodologias para determinação da evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>): o método de Thornthwaite, de Penman-Monteith, e empregou-se também os dados de evaporação do atmômetro de Piche.

O método de evapotranspiração de Thornthwaite, 1948, é o método original proposto para o cálculo do balanço hídrico (VIANELLO e ALVES, 2012) e baseia-se principalmente na temperatura média do ar:

$$ET_{0\text{ TH}} = 1,6(10T/I)^a \quad (1)$$

Em que ET<sub>0</sub> é a evapotranspiração de referência (mm.mês<sup>-1</sup>), calculada para um mês de 30 dias (considerando um dia de 12 horas de duração), sendo corrigido por um fator que depende da latitude local; T é a temperatura média mensal (°C); I o índice térmico anual e a é uma constante que varia para cada local, calculados conforme as equações abaixo:





$$I_n = \sum^{12} I_n ; I_n = (T_n/5)^{1,514} \quad (2)$$

$$a = (6,75 \times 10^{-7} \times I^3 - 7,71 \times 10^{-5} \times I^2) + (1,792 \times 10^{-2} \times I) + 0,49239 \quad (3)$$

sendo  $T_n$  a temperatura média mensal ( $^{\circ}\text{C}$ ) para o  $n$ -ésimo mês; e o índice  $n$  representa os meses do ano.

Utilizou-se a metodologia desenvolvida por Penman-Monteith (apresentada por PEREIRA et al. 1997 e 2002) como método padrão, sendo:

$$ET_{0\text{ PM}} = \frac{0,408 (R_n - G) + \gamma (900/T + 273) u^2 (e_s - e_a)}{\Delta + \Delta (1 + 0,34u_2)} \quad (4)$$

Em que  $ET_{0\text{ PM}}$  é a evapotranspiração de referência ( $\text{mm.dia}^{-1}$ );  $R_n$  a radiação líquida na superfície das culturas ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ );  $G$  é a densidade do fluxo de calor do solo ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ), que no presente trabalho foi desprezado;  $T$  a temperatura média do ar ( $^{\circ}\text{C}$ );  $u^2$  a velocidade do vento a 2m do solo ( $\text{m/s}^{-1}$ );  $e_s$  a pressão de saturação de vapor (kPa);  $e_a$  a pressão atual de vapor (kPa);  $e_s - e_a$  o déficit de pressão de saturação de vapor (kPa);  $\Delta$  é a declividade da curva de pressão de vapor de saturação ( $\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ); e  $\gamma$  a constante psicrométrica ( $\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ). A  $ET_0$  mensal foi obtida multiplicando a estimativa diária (equação 4) multiplicando-se pelo número de dias do mês.

Para comparar os métodos calculou-se o erro percentual (E%), em %, o erro médio (EM) e o erro padrão de estimativa (EPE), em mm, considerando o modelo de Penman-Monteith como padrão, empregando-se as seguintes equações:

$$E\% = \frac{(\text{Método} - \text{PM}) \cdot 100}{\text{PM}} \quad (5)$$

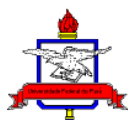
$$EM = \frac{\sum (\text{Método} - \text{PM})}{n} \quad (6)$$

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum (\text{Método} - \text{PM})^2}{n}} \quad (7)$$

em que  $n$  é o número de observações, que no caso são os 12 meses.

## RESULTADOS

Ao avaliar o desempenho das estimativas da evapotranspiração de referencia ( $ET_0$ ), tendo como referencia o modelo padrão de Penman-Monteith (PM), com as estimativas do modelo de Thornthwaite-Mather (TM) e as medições de evaporação obtidas no evaporímetro de Piche (PICHE), verifica-se na Figura 1 que o PICHE superestima a  $ET_0$  nos meses de maio a outubro (estação seca na região) e apresenta valores intermediários aos obtidos por TM e PM nos meses de novembro a abril. Na Tabela 1, observa-se que o coeficiente de correlação ( $r$ ) entre  $ET_0$  PM e  $ET_0$  PICHE foi muito baixo ( $r = 0,499$ ) e indica que a correlação é muito fraca entre as variáveis (BARBETTA et al., 2004); enquanto que o  $r$  obtido na comparação de  $ET_0$  PM e  $ET_0$  TM foi de 0,93, indicando uma correlação relativamente forte; fato este que também pode ser visualizado na Figura 1a, em que se observa comportamento semelhante ao longo do ano para os dois modelos ( $ET_0$  PM e  $ET_0$  TM). No que diz respeito aos erros apresentados na Tabela 1, verifica-se que os valores estimados de  $ET_0$  por TM são subestimados e os de  $ET_0$  por PICHE são superestimados, quando comparados com PM.



Os valores do erro percentual (erro%) e do erro médio (EM) são menores para ETo PICHE e ETo PM, do que quando comparados com os obtidos com a comparação entre ETo TM e ETo PM, porque nos meses de novembro a abril (estação chuvosa) PICHE subestima ETo e nos meses de maio a outubro este método superestima ETo, amenizando, assim, o resultado final do erro% e do EM.

Quando se analisa os resultados obtidos no balanço hídrico, verifica-se que para o armazenamento de água no solo (ARM) TM apresenta o maior erro percentual (73%), e que este superestima o ARM (Tabela 1 e Figura 1c). Uma vez que a ETo foi subestimada pelo método de TM, refletindo, assim, de maneira contrária no ARM e no excedente hídrico (EXC), com erros positivos (Erro% e EM, Tabela 1) para ambos.

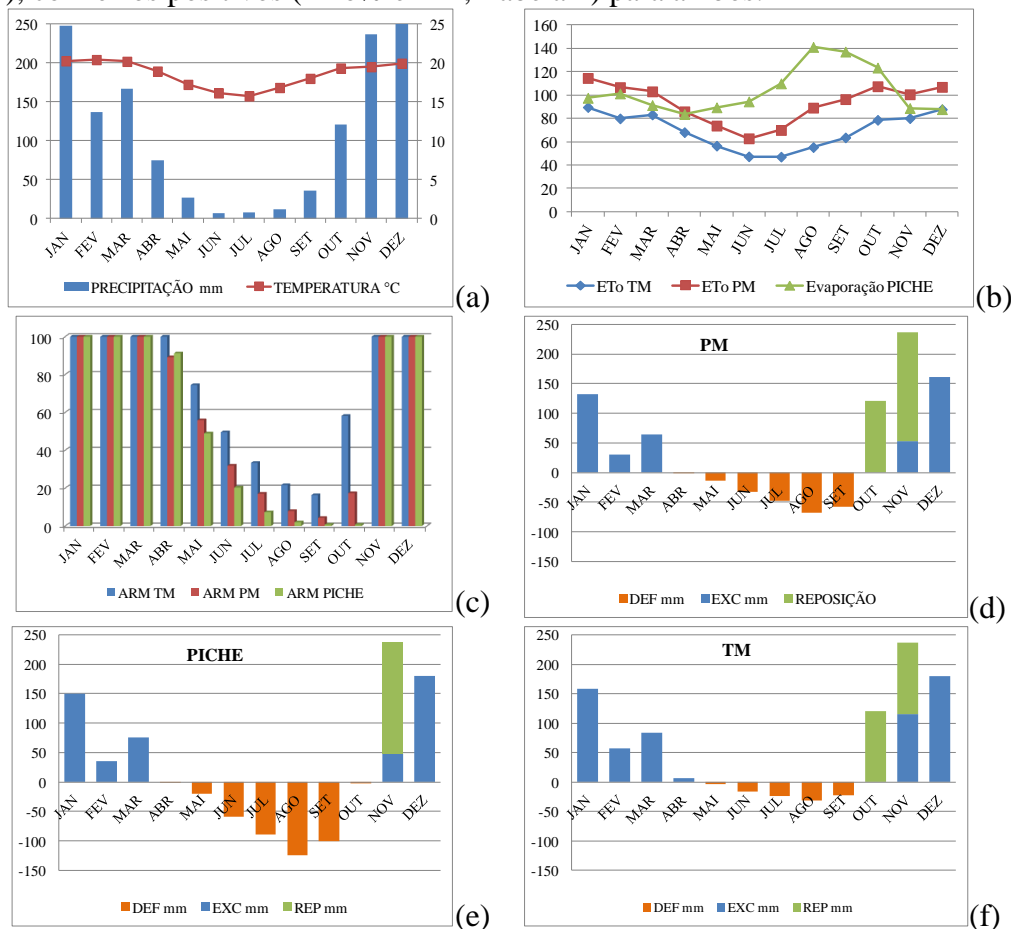


Figura 1 – Precipitação e temperatura médias mensais; evapotranspiração de referência obtida pelos métodos de Thornthwaite (TM) e Penman-Monteith (PM) e no atmômetro de Piche, em mm; armazenamento de água (ARM) e balanços hídricos calculados com as evapotranspirações obtidas por Thornthwaite (TM) e Penman-Monteith (PM) e no atmômetro de Piche (PICHE), em mm. EXC é o excedente hídrico, DEF a deficiência hídrica, e REP a reposição de água no solo, em mm.

Tabela 1. Evapotranspiração de referência (ETo) obtida pelos métodos de Thornthwaite (TM) e Penman-Monteith (PM) e no atmômetro de Piche (PICHE), armazenamento de água (ARM), deficiência hídrica (DEF), excedente hídrico (EXC) calculados com as





evapotranspirações obtidas por Thornthwaite (TM) e Penman-Monteith (PM) e no atmômetro de Piche (PICHE); erro percentual (E%), em %, o erro médio (EM) e o erro padrão de estimativa (EPE), em mm, e coeficiente de correlação (r).

Método Padrão	Média mm/mês	Método Avaliado	Média mm/mês	Erro % %	EM mm	EPM mm	r
ETo PM	93,0	ETo TM	69,7	-25,4	-23,3	24,1	0,9311
ETo PM	93,0	ETo PICHE	103,8	15,1	10,7	26,5	0,0499
ARM PM	60,3	ARM TM	71,1	73,9	10,8	15,9	0,9698
ARM PM	60,3	ARM PICHE	55,9	-29,8	-4,4	7,1	0,9967
ETR PM	74,8	ETR TM	61,6	-11,5	-13,2	17,6	0,9941
ETR PM	74,8	ETR PICHE	70,7	-4,5	-4,0	10,3	0,9654
DEF PM	18,3	DEF TM	8,1	-32,2	-10,1	17,0	0,9935
DEF PM	18,3	DEF PICHE	33,0	28,5	14,8	25,0	0,9990
EXC PM	36,8	EXC TM	50,0	22,0	13,2	22,2	0,9720
EXC PM	36,9	EXC PICHE	40,9	4,3	4,0	8,4	0,9984

Quando se verifica os resultados de ARM e EXC para o balanço hídrico obtido com a ETo de PICHE, observa-se, na Tabela 1, uma correlação forte com r de 0,9967 para o ARM PICHE e ARM PM. Resultados semelhantes são constatados, quando se compara os dois modelos, para a evapotranspiração real (ETR), o EXC e a DEF, isso porque, como já foi explicado acima, PICHE superestima a ETo nos meses de maio a novembro (estação seca na região).

Na estação seca P-ETo é negativo e, no balanço hídrico quando P-ETo é negativo, o cálculo da ETR é influenciado somente pela precipitação (P) e pela alteração de água no solo (ARM do mês em questão menos o ARM do mês anterior. Este fato acaba refletindo no cálculo da DEF, reduzindo, assim, os erros de PICHE quando comparado com PM. O EXC também é influenciado, uma vez que não existe excedente hídrico na estação seca (aumentando a correlação e diminuindo os erros quando se compara ETR, EXC e DEF de PICHE com PM).

## CONCLUSÕES

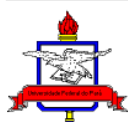
O modelo de Thornthwaite (TM) quando comparado com o de Penman-Monteith (PM) subestima a evapotranspiração de referência (ETo), superestima o armazenamento da água no solo (ARM) e o excedente hídrico (EXC) e subestima a evapotranspiração real (ETR) e a deficiência hídrica (DEF).

O atmômetro de Piche superestima a ETo quando considera-se os 12 meses do ano, subestimando-a de novembro a abril e superestimando-a de maio a outubro, refletindo na subestimativa do ARM e da ETR, e na superestimativa da DEF e no EXC.

Considerando que o modelo de Penman-Monteith é tido como padrão na estimativa da evapotranspiração de referência, aconselha-se cuidado ao utilizar o método de Thornthwaite na estimativa da ETo para computo do balanço hídrico, devendo este método ser testado e aferido sempre que for possível. E que sempre que houver dados disponíveis deve-se optar estimar a ETo por Penman-Monteith.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Meteorologia – INMET pelos dados meteorológicos disponibilizados para este trabalho.





## REFERÊNCIAS

- BARBETTA, P. A. *et al.* **Estatística para cursos de engenharia e informática**. São Paulo: Atlas, 2004. 410 p.
- INMET-BDMEP - Instituto Nacional de Meteorologia. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 30 de maio de 2013.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba – RS: Livraria e editora Agropecuária, 478p, 2002.
- PEREIRA, A. R.; NOVA, N. A. V.; SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração**. Fundação de estudos agrários Luiz de Queiroz - FEALQ. Piracicaba, SP, Brasil, 183p. 1997.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance: publications in climatology**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955.104p.
- VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Versão Digital. Brasília: INMET, 2006. 449p.
- VIANELLO, R.L., ALVES, A.R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: UFV, 460p, 2012.

