

**ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO NOS RESERVATÓRIOS DE SOBRADINHO E TRÊS MARIAS USANDO DIFERENTES MODELOS**

Doi:<http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n3p433-448/2016>

**NAYARA P. A. VIEIRA<sup>1</sup>, SILVIO B. PEREIRA<sup>2</sup>, MAURO A. MARTINEZ<sup>3</sup>,  
DEMETRIUS D. DA SILVA<sup>4</sup>, FELIPE B. SILVA<sup>5</sup>**

**RESUMO:** Estudos que possibilitem a obtenção de estimativas precisas de evaporação em reservatórios representam uma importante ação para o adequado gerenciamento e manejo dos recursos hídricos. Dessa forma, objetivou-se comparar as estimativas de evaporação, dos reservatórios de Três Marias e Sobradinho, calculadas pelos modelos de LINACRE et al. (1993), KOHLER et al. (1995), THORNTHWAITTE (1948), CRLE e o método do tanque Classe A com o valor estimado pelo modelo de PENMAN et al. (1948). Também foram comparados os valores de evaporação estimados a partir de dados de estações meteorológicas situadas no entorno do reservatório com o valor estimado com dados da estação localizada na área da barragem. Os resultados permitiram constatar que, em relação ao modelo de PENMAN et al. (1948), o modelo LINACRE et al. (1993), superestima a evaporação nos reservatórios de Sobradinho e Três Marias e os modelos KOHLER et al. (1955) e THORNTHWAITTE (1948) subestimam a evaporação nos dois reservatórios. O método que proporcionou resultados mais próximos daqueles obtidos por PENMAN et al. (1948), no reservatório de Sobradinho, foi o do tanque Classe A, utilizando o coeficiente de 0,6; já em Três Marias, foram os modelos PENMAN et al. (1948) e CRLE, que apresentaram resultados de evaporação estatisticamente iguais. Os valores de evaporação estimados pelas estações meteorológicas ao entorno dos reservatórios não são estatisticamente iguais aos estimados pelas estações localizadas na área da barragem.

**PALAVRAS-CHAVE:** modelos evaporimétricos, parâmetros meteorológicos, Rio São Francisco.

**EVAPORATION ESTIMATES FOR SOBRADINHO AND TRÊS MARIAS RESERVOIRS THROUGH DIFFERENT METHODS**

**ABSTRACT:** Accurate studies on reservoir evaporations are important for proper management of water resources. Therefore, this study aimed to compare evaporation estimates for Três Marias and Sobradinho reservoirs made by Linacre, Kohler et al., Thornthwaite, Complementary Relationship Lake Evaporation (CRLE) and A class pan method, which was calculated by the Penman method. We also compared evaporation values from weather stations located within areas of the reservoirs against data from stations located near the reservoir areas. Our results showed that the Linacre model overestimated evaporation for both reservoirs compared to the Penman method. However, Kohler et al. and Thornthwaite underestimated the evaporation for both areas. Evaporation estimates near those obtained by the Penman model were found for the class A pan model in Sobradinho reservoir, using a  $k_p$  of 0.6. Moreover, in Três Marias, the Penman and CRLE models had statistically equal evaporation estimates. The estimates calculated from data of meteorological stations within reservoir areas were statically different from those obtained using data of stations near them.

**KEY WORDS:** evaporimetric models, meteorological parameters, São Francisco river.

<sup>1</sup> Eng<sup>a</sup> Agrônoma, Doutoranda em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, Departamento de Engenharia, UFPA/Lavras – MG, Fone: (38) 9 9191-7506, [nayara.paula.ufpa@gmail.com](mailto:nayara.paula.ufpa@gmail.com)

<sup>2</sup> Eng<sup>o</sup> Agrônomo, Prof. Doutor, Departamento de Engenharia Agrícola, UFV/Viçosa - MG, [silviopereira@ufv.br](mailto:silviopereira@ufv.br)

<sup>3</sup> Eng<sup>o</sup> Agrônomo, Prof. Doutor, Departamento de Engenharia Agrícola, UFV/Viçosa - MG, [mmauro@ufv.br](mailto:mmauro@ufv.br)

<sup>4</sup> Eng<sup>o</sup> Agrônomo, Prof. Doutor, Departamento de Engenharia Agrícola, UFV/Viçosa – MG, [demetrius@ufv.br](mailto:demetrius@ufv.br)

<sup>5</sup> Eng<sup>o</sup> Agrônomo, Doutorando em Eng<sup>a</sup> Agrícola, Departamento de Engenharia Agrícola, UFV/Viçosa – MG, [felipe.bernardes.ufv@hotmail.com](mailto:felipe.bernardes.ufv@hotmail.com)

Recebido pelo Conselho Editorial em: 28/05/2015

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 21/12/2015

## INTRODUÇÃO

Em reservatórios e lagos, a evaporação é um dos principais processos envolvidos no balanço hídrico e de calor. Os impactos da evaporação dos reservatórios, na gestão da água, variam com a localização, com as diferenças climáticas, com as características do reservatório e com as práticas de uso e manejo (WURBS & AYALA, 2014).

No planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, assim como em estudos de impacto ambiental, estimativas confiáveis da evaporação nos reservatórios são de extrema relevância. Os planejadores dos recursos hídricos consideram o processo como “perda” pelo significativo volume de água que passa para a atmosfera, sendo importante sua obtenção tanto na fase de elaboração do projeto quanto no decorrer do período de operação do reservatório (DIAS & KELMAN, 1987).

Um fator de grande importância na análise da vazão máxima permissível para a concessão de outorga refere-se às perdas de água por evaporação nos reservatórios de regularização (PEREIRA et al., 2009). Nas usinas hidrelétricas, o montante de água evaporada que deixa de passar diariamente pelas turbinas geradoras de energia promove significativas perdas no setor elétrico.

A determinação do volume disponível no reservatório, para os usos múltiplos, depende de um criterioso conhecimento das perdas por evaporação, informação de suma importância para políticas de manejo dos recursos hídricos, gestão, operação dos reservatórios e garantia ao atendimento das demandas de água (FONTES, 2005). De acordo com WURBS & AYALA (2014), os impactos na capacidade de abastecimento de água, durante as estações de seca prolongada, são ainda maiores.

No Brasil, são escassas as atividades de pesquisa e experimentação no campo específico da evaporação em reservatórios, além da incontestável carência de informações básicas nas diferentes regiões climáticas do País para atender a diversos objetivos (PEREIRA et al., 1997). Como a medida da evaporação real de superfícies de lagos é difícil de ser efetuada diretamente, CURTARELLI et al. (2013) afirmam que é imprescindível estimá-la usando metodologias indiretas.

A estimativa da evaporação pode ser realizada pela utilização de modelos fundamentados no balanço de energia, nos processos de transferência, balanço hídrico, métodos aerodinâmicos e métodos combinados por meio de formulações empíricas ou semiempíricas, e pelos tanques de evaporação (LEÃO et al., 2013).

Está disponível uma vasta gama de modelos para a predição da evaporação em reservatórios que se baseiam em informações meteorológicas, dentre os quais os propostos por: PENMAN (1948), MORTON (1983), LINACRE (1993) e KOHLER et al. (1955), entre outros (PEREIRA et al., 2009).

Dessa forma, o objetivo do trabalho foi comparar as estimativas de evaporação, dos reservatórios de Sobradinho e Três Marias, calculadas pelos modelos de LINACRE et al. (1993), KOHLER et al. (1955), THORNTHWAITTE (1948), CRLE e o método do tanque Classe A com o valor estimado pelo modelo de PENMAN et al. (1948). Também foram comparados os valores de evaporação estimados a partir de dados de estações meteorológicas situadas no entorno do reservatório com o valor estimado com dados da estação localizada na área da barragem.

## MATERIAL E MÉTODOS

Os dados meteorológicos para estimar a evaporação nos reservatórios de Sobradinho e Três Marias foram obtidos na CHESF (Companhia Hidrelétrica do São Francisco), CEMIG (Companhia Energética do Estado de Minas Gerais) e INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). As informações referentes às estações utilizadas encontram-se na Tabela 1.

TABELA 1. Estações meteorológicas utilizadas. **Meteorological stations used for evaporation estimates.**

Estação	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Período (19../ 20..)
Sobradinho	-09°25'59"	-40°49'40"	371	80, 84, 86-91, 94, 96-98, 03-12
Petrolina	-09°22'48"	-40°28'48"	370	83, 96-98, 02-07, 09-13
Remanso	-09°37'48"	-42°06'00"	400	79, 80, 01, 02, 06-08, 10, 12
Três Marias	-18°12'54"	-45°15'33"	597	00, 01, 02
Três Marias –A528	-18°12'00"	-45°28'00"	931	07-13
Curvelo	-18°45'00"	-44°27'00"	672	81, 82, 86-90, 94, 99
Pompéu	-19°12'36"	-45°00'00"	691	75-78, 86, 89-93, 95-04

Na Figura 1, encontra-se a localização espacial das estações meteorológicas utilizadas no trabalho.

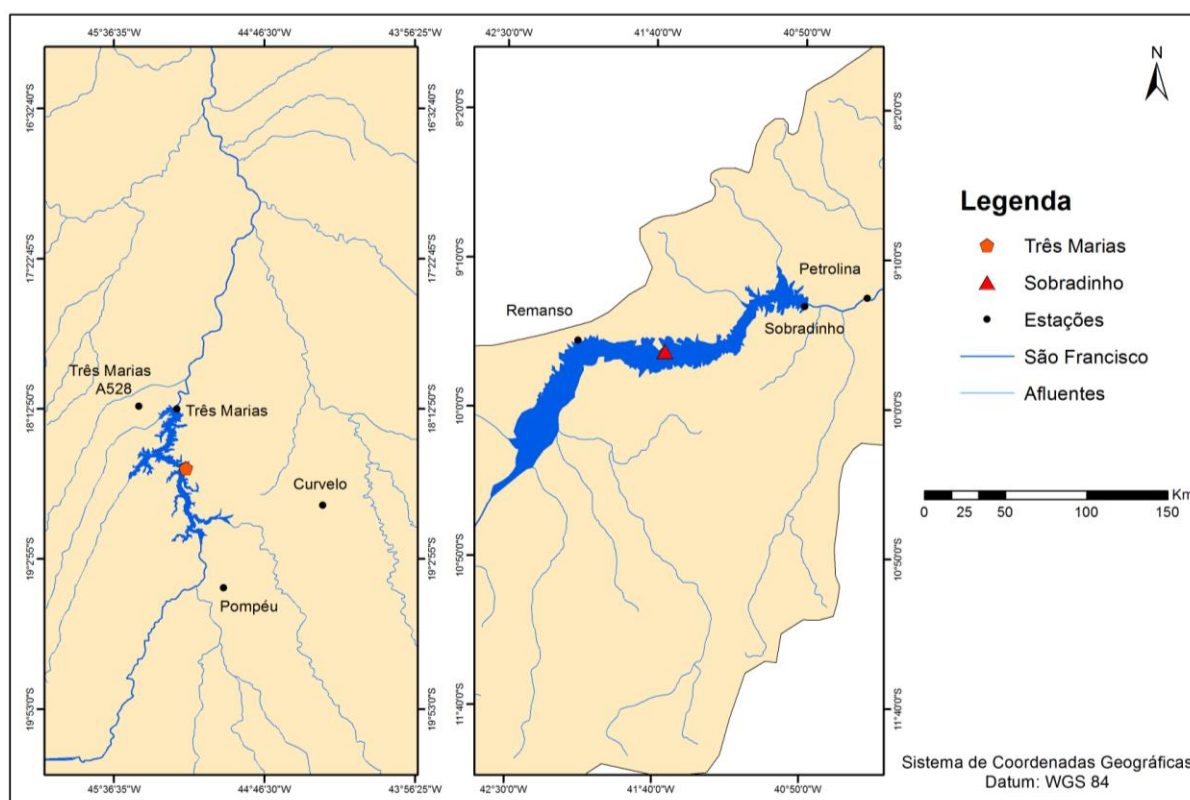


FIGURA 1. Localização geográfica das Estações no reservatório de Sobradinho e Três Marias e no entorno das barragens. **Geographical location of the meteorological stations in and near Sobradinho and Três Marias reservoirs.**

Para cada estação, foram obtidas as médias mensais de temperatura máxima e mínima, umidade relativa do ar, velocidade do vento, precipitação pluvial e insolação.

A estimativa da evaporação foi realizada com base nos modelos: PENMAN et al. (1948), LINACRE et al. (1993), KOHLER et al. (1995), THORNTHWAITE (1948), modelo conceitual de relação complementar (CRLE) e tanque Classe A (ECA).

O modelo proposto por PENMAN et al. (1948), envolve duas considerações teóricas, de transferência de massa e do balanço de energia radiante (LEÃO et al., 2013). Assim, a equação da evaporação no reservatório (mm por mês), de acordo com o modelo proposto por PENMAN et al. (1948), é:

$$E_L = 86,4 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} - \frac{R_n - G}{\lambda \rho} + \frac{\gamma}{\Delta + \lambda} 0,26(0,5 + 0,54u_2)(e_s - e_a) \quad (1)$$

em que,

$E_L$  - evaporação no reservatório (mm por mês);

$\Delta$  - declividade da curva de pressão de saturação de vapor ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ );

$\gamma$  - coeficiente psicrométrico ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ );

$R_n$  - saldo de radiação ( $\text{W m}^{-2}$ );

$G$  - calor armazenado no curso d'água ( $\text{W m}^{-2}$ );

$\lambda$  - calor latente de vaporização ( $\text{MJ kg}^{-1}$ );

$\rho$  - massa específica da água ( $\text{kg m}^{-3}$ );

$u_2$  - velocidade do vento tomada 2 m acima da superfície ( $\text{m s}^{-1}$ );

$e_s$  - pressão de saturação de vapor à temperatura do ar (mb), e

$e_a$  - pressão de vapor atual (mb).

O calor armazenado no curso d'água ( $G$ ) foi desconsiderado em virtude da carência de informações sobre a temperatura da água em ambos os reservatórios. A obtenção dos demais parâmetros, propostos pela [eq. (1)], seguiu a metodologia descrita por ALLEN et al. (1998).

A equação proposta por LINACRE et al. (1993), para o cálculo da evaporação em reservatório, quando são conhecidos os dados de temperatura média, precipitação e velocidade do vento, é:

$$E_L = (0,015 + 0,00042T + 10^{-6}h) [0,8R_s - 40 + 2,5F u_2(T - T_d)] \quad (2)$$

em que,

$R_s$  - radiação solar na superfície do reservatório ( $\text{W m}^{-2}$ );

$F$  - fator de correção devido à altitude do local, adimensional;

$h$  - altitude do local (m);

$T$  - temperatura do ar ( $^\circ\text{C}$ ), e

$T_d$  - temperatura do ponto de orvalho ( $^\circ\text{C}$ ).

No modelo LINACRE et al. (1993), a radiação solar na superfície do reservatório é calculada com base em dados de precipitação. O conjunto de equações para a obtenção da radiação solar e o fator de correção devido à altitude estão descritos em LINACRE et al. (1993).

KOHLER et al. (1955) fundamentaram o modelo a partir da adaptação da equação de PENMAN et al. (1948), para o cálculo da evaporação em reservatórios. Trabalhos como os de LEITÃO et al. (2007), PEREIRA et al. (2009) e LEÃO et al. (2013) obtiveram resultados satisfatórios com o modelo. De acordo com o modelo, a evaporação foi estimada a partir da equação:

$$E_L = 0,7 \left( \frac{\Delta R_{ne}}{\Delta + \gamma_L} + \frac{\gamma_L E_a}{\Delta + \gamma_L} \right) \quad (3)$$

em que,

$E_a$  - poder evaporante do ar ( $\text{mm d}^{-1}$ ), e

$R_{ne}$  - saldo de radiação, em equivalente de lâmina de água evaporada ( $\text{mm d}^{-1}$ ).

O cálculo do poder evaporante de ar e do saldo de radiação foi realizado de acordo com KOHLER et al. (1955).

A estimativa de evaporação no reservatório pelo modelo de Thornthwaite foi feita com base na equação (ROSENBERRY et al. 2007):

$$E_L = \left( 1,6 \left( \frac{10 T_a}{I} \right)^{6,75 \times 10^{-7} I^3 - 7,71 \times 10^{-5} I^2 + 1,79 \times 10^{-2} I + 0,49} \right) \left( \frac{10}{d} \right) \quad (4)$$

em que,

$T_a$  - temperatura média do ar (C°);

I - índice de calor anual, e

D - número de dias do mês.

O índice de calor anual foi calculado pela equação:

$$I = \sum_{n=1}^{12} i, \quad i = \left( \frac{T_a}{5} \right)^{1,514} \quad (5)$$

em que,

i corresponde ao mês do ano (i=1, janeiro; ...; i=12, dezembro).

A estimativa da evaporação no reservatório pelo modelo CRLE foi realizada com base na metodologia desenvolvida por MORTON (1983), a partir de modificação da equação de Priestley e Taylor:

$$E_w = 13 + 1,12 \left( 1 + \frac{0,66 \frac{P}{\Delta_p}}{\frac{O_s}{\Delta_p}} \right)^{-1} R_{TP} \quad (6)$$

em que,

$E_w$  - evaporação no reservatório (mm por mês);

P - pressão atmosférica na localidade considerada (mb);

$o_s$  - pressão atmosférica ao nível do mar (mb);

$\Delta_p$  - declividade da curva de pressão de saturação de vapor na temperatura de equilíbrio, (mb°C<sup>-1</sup>), e

$R_{TP}$  - saldo de radiação na temperatura de equilíbrio (W m<sup>-2</sup>).

MORTON (1983) obteve os valores das constantes empíricas “13” e “1,12” por meio de calibrações realizadas em diversas regiões áridas do mundo. Para a resolução da [eq. (6)], seguiu a metodologia descrita em MORTON (1983).

Para o tanque Classe A, a estimativa de evaporação no reservatório foi realizada de acordo com a equação:

$$E_L = k_p \text{ ECA} \quad (7)$$

em que,

$k_p$  - coeficiente do tanque, adimensional, e

ECA - evaporação no tanque Classe A (mm por mês).

Foram avaliados diferentes valores do coeficiente (0,4; 0,6 e 0,8) a fim de verificar se, para regiões áridas e semiáridas, o valor 0,6 é o mais representativo, como referenciado na literatura

(ROQUE & SANSIGOLO, 2001; PEREIRA et al., 2009). O tanque que gerou os dados para a determinação da evaporação encontra-se localizado na área da barragem, pois de acordo com LOWE et al. (2009) o mesmo deve estar localizado o mais próximo possível do reservatório para que os erros possam ser minimizados. Esse método foi utilizado apenas para a estação Sobradinho, pois era a única que possuía dados de evaporação obtidos do tanque Classe A.

No presente trabalho, o modelo de PENMAN et al. (1948) foi adotado como referência por apresentar uma base física mais realista e ser citado em várias literaturas como o que melhor representa a evaporação quando comparado ao método-padrão. Trabalhos como os de DONOHUE et al. (2010) e ELSAWWAF et al. (2010) relatam que o modelo de PENMAN et al. (1948), produz estimativas mais realistas da evaporação e é o mais comparável às estimativas do balanço de energia pela razão de Bowen.

Realizou-se a análise de sensibilidade dos modelos de acordo com a metodologia apresentada por SILVA et al. (2009) e LELIS et al. (2012), por meio do cálculo de índice de sensibilidade para cada variável de entrada nos modelos.

$$IS = \left| \frac{\frac{R_1 - R_2}{R_{12}}}{\frac{I_1 - I_2}{I_{12}}} \right| \quad (8)$$

em que,

- IS - índice de sensibilidade do modelo aos parâmetros de entrada, adimensional;
- $R_1$  - evaporação no reservatório com o valor do parâmetro a -50% do medido (mm);
- $R_2$  - evaporação no reservatório com o valor do parâmetro a 50% do medido (mm);
- $R_{12}$  - evaporação no reservatório com o valor do parâmetro medido (mm);
- $I_1$  - valor do parâmetro a -50% do medido;
- $I_2$  - valor do parâmetro a 50% do medido;
- $I_{12}$  - valor do parâmetro medido.

Foram obtidos dois resultados de evaporação para cada reservatório: um estimado com os dados fornecidos pelas estações localizadas na área da barragem, e o outro calculado usando dados das estações alocadas ao entorno, com a finalidade de constatar se as mesmas podem ser utilizadas como fonte de dados quando não houver instalada na barragem uma estação meteorológica. A comparação dos resultados obtidos com os diversos modelos e o tanque classe A com os resultados obtidos com o modelo de PENMAN et al. (1948), e, também, a comparação dos resultados de evaporação obtidos com as diferentes estações foi feita por meio do ajuste de um modelo de regressão linear simples. Neste modelo, a constante  $\beta_0$  foi considerada nula, e o coeficiente angular  $\beta_1$  foi testado a 5% de probabilidade, pelo teste “t”, para avaliar se ele é estatisticamente igual à unidade. Se  $\beta_1 = 1$ , então os métodos em análise estimam os mesmos valores. Toda a análise estatística foi realizada na ferramenta, análise de dados, do Excel.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Análise de sensibilidade

Na Tabela 2, é apresentado o Índice de Sensibilidade – IS, dos modelos aos parâmetros climáticos insolação, temperatura do ar, precipitação e velocidade do vento.

TABELA 2. Índice de sensibilidade (IS) dos modelos aos parâmetros climáticos insolação, temperatura, precipitação e velocidade do vento. **Sensitivity index (IS) of the models related to climatic parameters as insolation, temperature, rainfall, and wind speed.**

Modelos	IS – Índice de Sensibilidade			
	Insolação	Temperatura	Precipitação	Velocidade do vento
Penman	0,30	0,61	-	0,27
Linacre	-	0,47	0,08	0,26
Kohler et al.	0,48	0,56	-	0,24
Thornthwaite	-	20,48	-	-
CRLE	0,51	0,64	-	-

Analisando-se a Tabela 2, percebe-se que a sensibilidade do modelo CRLE à insolação foi de 0,51, índice superior ao modelo de KOHLER et al. (1995) e PENMAN et al. (1948), que atingiram valores de 0,48 e 0,30, respectivamente. Em relação à sensibilidade à velocidade do vento, os modelos PENMAN et al. (1948), LINACRE et al. (1993), e Kohler et al. (1995), foram próximos, atingindo valores de 0,24; 0,26 e 0,27, respectivamente.

Em relação à temperatura, o modelo de THORNTHWAITE (1948) atinge um IS de 20,48, cerca de 36 vezes maior que os demais (Tabela 2). Os outros modelos possuem sensibilidade próxima (CRLE, 0,64; PENMAN et al. (1948), 0,61 e KOHLER et al. (1995), 0,57), sendo LINACRE et al. (1993), o que apresenta sensibilidade mais baixa, igual a 0,47. A alta sensibilidade à temperatura, apresentada pelo modelo de THORNTHWAITE (1948), deve-se ao fato de a equação do modelo ser exponencial.

RONG et al. (2013), em um estudo de evaporação no lago Dongping, verificaram que os parâmetros climáticos que mais contribuem para o aumento da evaporação são o saldo de radiação e a temperatura. PEREIRA et al. (2009), em um estudo de evaporação no reservatório de Sobradinho, comprovaram que a radiação, a temperatura e a velocidade do vento são as que mais contribuem para o aumento da evaporação, corroborando o resultado de sensibilidade encontrado no presente trabalho, no qual os modelos são mais sensíveis a estes parâmetros.

### Evaporação nos reservatórios

Na Figura 2, estão apresentadas as estimativas da evaporação no reservatório de Sobradinho, obtidas por meio dos modelos PENMAN et al. (1948), LINACRE et al. (1993), KOHLER et al. (1995), THORNTHWAITE (1948) e CRLE, e pelo método do tanque Classe A (ECA), utilizando três valores de coeficiente de tanque ( $k_p$ ): 0,4; 0,6 e 0,8.

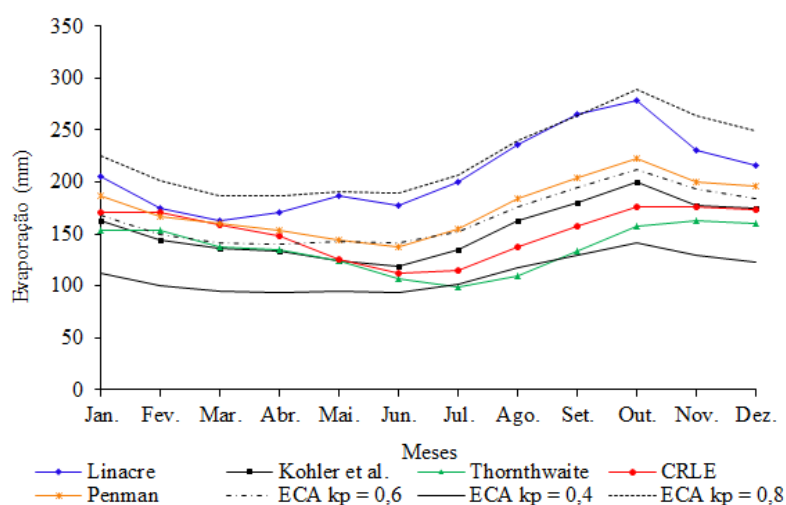


FIGURA 2. Evaporação mensal média (mm) no reservatório de Sobradinho para o período de 1980 a 2012. **Average monthly evaporation (mm) in Sobradinho reservoir for the period of 1980 to 2012.**

Todos os modelos apresentaram comportamento similar ao modelo de PENMAN et al. (1948), ou seja, em outubro atingiu a máxima evaporação, mantendo altas taxas até meados de janeiro, diminuindo, a partir daí, ao longo dos meses, até atingir o valor mínimo no inverno. O tanque Classe A ( $k_p = 0,6$ ), ao longo do ano, foi o método que apresentou comportamento mais próximo e similar ao modelo de PENMAN et al. (1948) (Figura 2).

De modo geral, é evidenciado na Figura 2 um expressivo aumento da evaporação mensal a partir do mês de julho, em quase todos os modelos, com exceção do modelo THORNTHWAITE (1948), no qual o aumento ocorre a partir de agosto. O valor máximo de evaporação para THORNTHWAITE (1948) ocorre em novembro, e para os demais modelos, ele é atingido no mês de outubro. O que justifica o pico de evaporação no mês de outubro é a incidência de maiores valores de insolação, temperatura e velocidade do vento, associados com a baixa precipitação (VIEIRA, 2015). A partir daí, a redução nas taxas de evaporação mensal prolonga-se até junho.

Ainda de acordo com a Figura 2, em junho, as taxas de evaporação foram mínimas em quase todos os modelos, com exceção de LINACRE et al. (1993), que foi em março, e THORNTHWAITE (1948), que foi em julho. Junho, o mês de menor evaporação para a maioria dos modelos, correspondeu ao final do período chuvoso. De acordo com VIEIRA (2015), esse mês é caracterizado por baixos valores de precipitação, temperatura e insolação, bem como velocidade do vento, correspondente à média anual da região. Em um estudo de evaporação e balanço de energia para um lago do Tibet-Himalaya, YU et al. (2011) constataram que diminuições na insolação, temperatura e velocidade do vento acarretavam uma redução na taxa de evaporação, corroborando os resultados encontrados.

O fato de o modelo de THORNTHWAITE (1948) estimar a menor taxa de evaporação em julho pode ser explicado por considerar apenas os valores de temperatura média do ar, já que no mês de julho a temperatura média do ar é a menor do ano.

Os valores de evaporação anual no reservatório de Sobradinho encontram-se dispostos, em ordem decrescente, na Tabela 3.

TABELA 3. Evaporação anual (mm) no reservatório de Sobradinho para o período de 1980 a 2012.  
**Annual evaporation (mm) in Sobradinho reservoir for the period of 1980 to 2012.**

Modelos	Evaporação anual (mm)
Tanque Classe A ( $k_p=0,8$ )	2.690,4
Linacre	2.505,0
Penman	2.108,0
Tanque Classe A ( $k_p=0,6$ )	1.994,7
Kohler et al.	1.846,4
CRLE	1.819,0
Thornthwaite	1.632,0
Tanque Classe A ( $k_p=0,4$ )	1.329,8

De acordo com os valores de evaporação anual (mm), apresentados na Tabela 3, fica evidente que o método do tanque Classe A ( $k_p = 0,6$ ) e os modelos KOHLER et al. (1995) e CRLE foram os que apresentaram resultados mais semelhantes ao de PENMAN et al. (1948). O método que obteve o resultado mais próximo a PENMAN et al. (1948) foi o Classe A ( $k_p = 0,6$ ). O uso do coeficiente do tanque igual a 0,4 e 0,8 é o que fornece resultados mais divergentes em relação à PENMAN et al. (1948), com diferenças anuais de 778,2 mm e 528,4 mm, respectivamente.

Na Tabela 4, estão dispostas as estimativas dos coeficientes angulares ( $\hat{\beta}_1$ ) das equações de regressão entre os valores de evaporação estimados pelo modelo de PENMAN et al. (1948) e os outros modelos.



TABELA 4. Valores de  $\hat{\beta}_1$  estimados a partir da comparação dos resultados dos outros modelos com aqueles obtidos com PENMAN et al. (1948), por meio da equação da reta  $\hat{Y} = \hat{\beta}_1 X$ , para o reservatório de Sobradinho – BA. **Estimated values of  $\hat{\beta}_1$  based on comparison of the results of other models with those obtained by the Penman model, by means of the line equation  $\hat{Y} = \hat{\beta}_1 X$  for Sobradinho reservoir, in Bahia state, Brazil.**

Modelos	Penman
Linacre	1,187*
Kohler et al.	0,878*
Thornthwaite	0,769*
CRLE	0,859*
ECA 0,4	0,630*
ECA 0,6	0,945*
ECA 0,8	1,276*

\* a diferença entre os modelos é significativa pelo teste t, a 5% de probabilidade, <sup>ns</sup> os modelos não diferem significativamente pelo teste t, a 5% de probabilidade.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4, fica evidente que nenhum dos modelos obteve resultados estatisticamente iguais ao modelo de PENMAN et al. (1948). O modelo LINACRE et al. (1993) e o método do tanque Classe A, utilizando o coeficiente igual a 0,8, são os únicos que estimam valores de evaporação superiores. A maior discrepância foi proporcionada pelo ECA ( $k_p = 0,8$ ), no qual a evaporação é superestimada em 28%, enquanto LINACRE et al. (1993), superestima em 19%.

Os resultados obtidos pelos modelos KOHLER et al. (1995), CRLE, THORNTHWAITE (1948) e pelo método tanque Classe A com  $k_p = 0,6$  e  $k_p = 0,4$  são subestimados em relação a PENMAN et al. (1948). A maior diferença nos resultados é com relação ao ECA ( $k_p = 0,4$ ) e THORNTHWAITE (1948), nos quais os valores encontrados são inferiores a PENMAN et al. (1948) em 37% e 23%, respectivamente. Já os modelos CRLE, KOHLER et al. (1995) e ECA ( $k_p = 0,6$ ) subestimaram os valores obtidos de PENMAN et al. (1948) em 14%, 12% e 6%, respectivamente.

Tendo em vista os diferentes coeficientes do tanque utilizados, o que melhor representou o processo evaporativo para a região de Sobradinho foi  $k_p = 0,6$ , uma vez que o  $k_p = 0,8$  estimou lâminas superiores em relação a todos os modelos, e o  $k_p = 0,4$  estimou lâminas inferiores, além de ser o coeficiente que estima resultados próximos ao modelo de PENMAN et al. (1948). Tais resultados corroboram as pesquisas científicas que apontam o coeficiente de 0,6 como o mais representativo para regiões áridas. PEREIRA et al. (2009) indicaram o coeficiente de 0,57 como o mais representativo para o lago de Sobradinho, reafirmando o resultado encontrado no presente trabalho.

RIMMER et al. (2009) estimaram as taxas de evaporação para o lago Kinneret, Israel, utilizando a equação de PENMAN et al. (1948), e observaram que os resultados da evaporação da água no lago, quando a mudança de calor armazenado é desconsiderada, são muito semelhantes à evaporação medida no tanque Classe A com coeficiente 0,6, da mesma forma que no presente trabalho.

Na Figura 3, estão apresentadas as estimativas da evaporação para o reservatório de Três Marias – MG, pelos modelos PENMAN et al. (1948), LINACRE et al. (1993), KOHLER et al. (1995), THORNTHWAITE (1948) e CRLE.

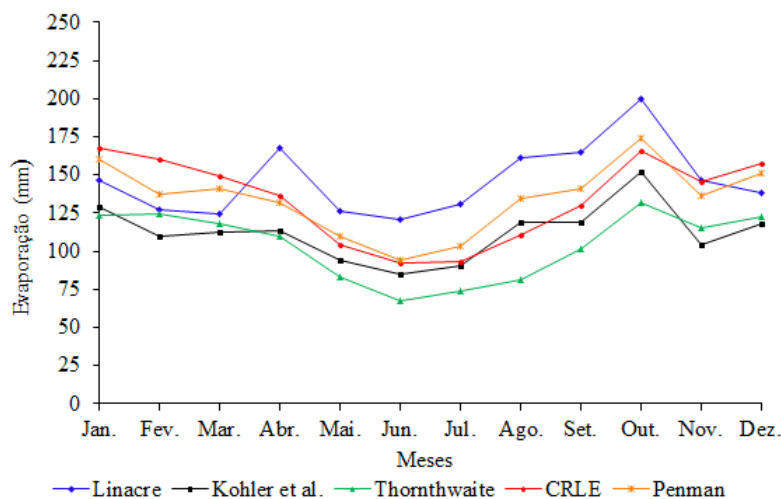


FIGURA 3. Evaporação mensal média (mm) no reservatório de Três Marias para os períodos de 2000, 2001 e 2002. **Average monthly evaporation (mm) in Três Marias reservoir for the periods of 2000, 2001, and 2002.**

Na Figura 3, constata-se expressivo aumento da evaporação mensal a partir do mês de julho, em todos os modelos, até o mês de outubro. A partir do mês de janeiro, os valores de evaporação apresentam ligeiro decréscimo até abril, tornando-se mais acentuados até junho. O valor mínimo ocorre em junho, para todos os modelos, justamente no mês em que os menores índices de insolação, temperatura e velocidade do vento, aliados à baixa precipitação, foram registrados. Nesse mês, THORNTHWAITE (1948) estimou a menor taxa de evaporação e LINACRE et al. (1993), a taxa de evaporação, mais elevada.

A evaporação máxima foi observada em outubro em quase todos os modelos, com exceção do modelo CRLE, no qual foi verificada no mês de janeiro (Figura 3). De acordo com VIEIRA (2015), em outubro, ocorreram os maiores valores de insolação e temperatura, a velocidade do vento ficou próxima da média anual e a precipitação ainda encontrava-se baixa na região. Em abril é evidenciado um pico de evaporação no modelo de LINACRE et al. (1993), o que pode ser explicado pelo fato de o modelo levar em consideração a precipitação, já que no mês de abril não há ocorrência de precipitação em Três Marias.

Os valores de evaporação anual no reservatório de Sobradinho encontram-se dispostos, em ordem decrescente, na Tabela 5.

TABELA 5. Evaporação anual (mm) no reservatório de Três Marias para o período de 2000, 2001 e 2002. **Annual evaporation (mm) in Três Marias reservoir for the period of 2000, 2001, and 2002.**

Modelos	Evaporação anual (mm)
Linacre	1.754,3
Penman	1.615,0
CRLE	1.613,0
Kohler et al.	1.345,7
Thornthwaite	1.253,0

De acordo com os valores de evaporação anual (mm), apresentados na Tabela 3, o modelo CRLE apresentou uma diferença de apenas 2 mm em relação à PENMAN et al. (1948). Os demais modelos obtiveram valores mais distintos de evaporação anual. O modelo que mais diferiu de PENMAN et al. (1948) foi THORNTHWAITE (1948), que estimou uma lâmina evaporada anual 362 mm menor que a de PENMAN et al. (1948).

Na Tabela 6, estão dispostas as estimativas dos coeficientes angulares ( $\hat{\beta}_1$ ) das equações de regressão entre os valores de evaporação estimados pelo modelo de PENMAN et al. (1948) e os outros modelos.

TABELA 6. Valores de  $\hat{\beta}_1$  estimados a partir da comparação dos resultados dos outros modelos com aqueles obtidos com PENMAN et al. (1948), por meio da equação da reta  $\hat{Y} = \hat{\beta}_1 X$ , para o reservatório de Três Marias – MG. **Estimated values of  $\hat{\beta}_1$  based on comparison of the results of other models with those obtained by the Penman model, by means of the line equation  $\hat{Y} = \hat{\beta}_1 X$  for Três Marias reservoir, in Minas Gerais state, Brazil.**

Modelos	Penman
Linacre	1,094*
Kohler et al.	0,831*
Thornthwaite	0,778*
CRLE	1,001 <sup>ns</sup>

\* a diferença entre os modelos é significativa pelo teste t, a 5% de probabilidade, <sup>ns</sup> os modelos não diferem significativamente pelo teste t, a 5% de probabilidade.

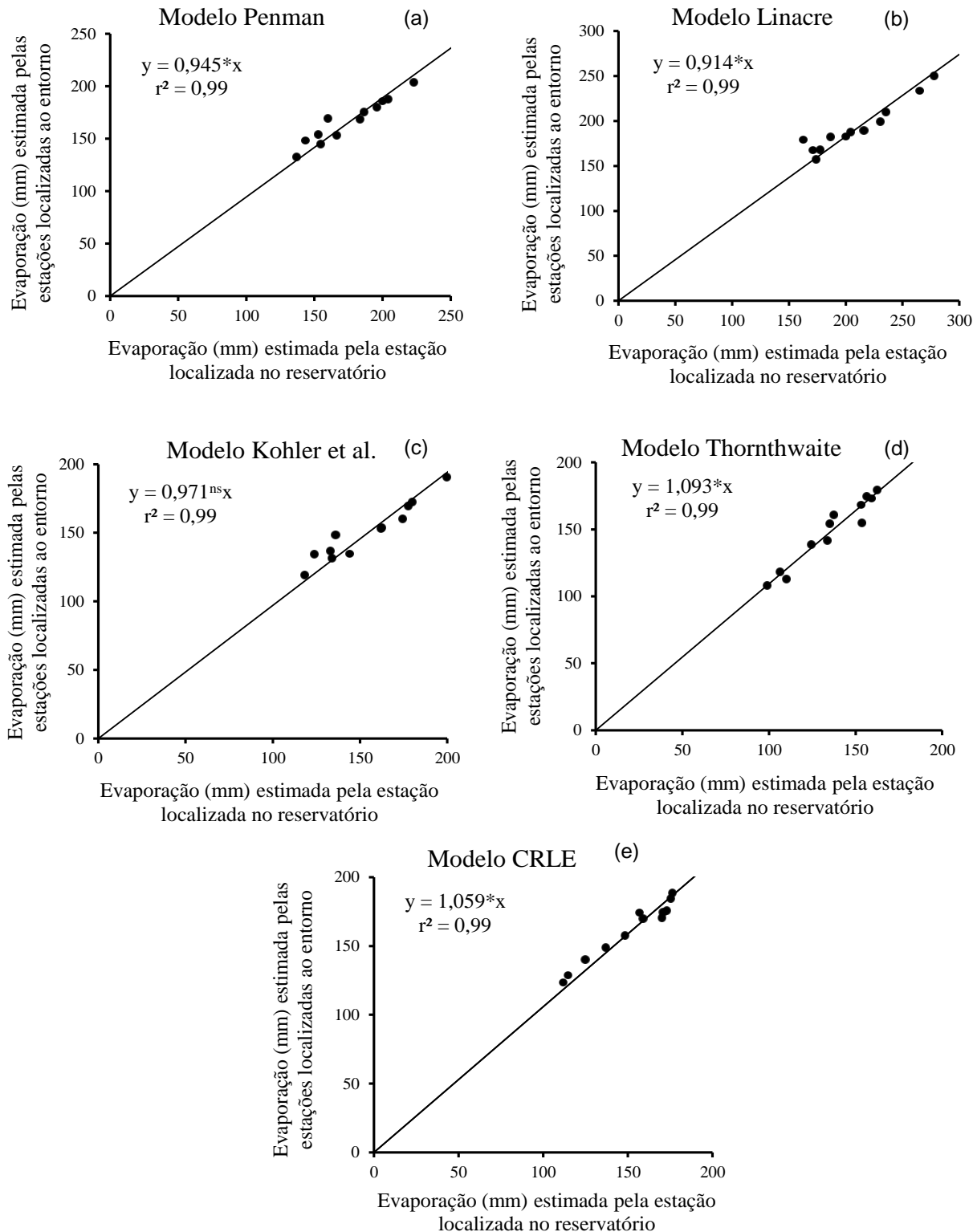
A partir dos resultados apresentados na Tabela 6, fica comprovado estatisticamente que o único modelo que superestima a evaporação calculada por PENMAN et al. (1948) é o modelo LINACRE et al. (1993), com a magnitude de 9%. Já os modelos KOHLER et al. (1995) e THORNTHWAITE (1948) subestimam as lâminas evaporadas em 17% e 22%, respectivamente. Os modelos de PENMAN et al. (1948) e CRLE estimam valores de evaporação que não diferem estatisticamente.

De modo geral, o modelo LINACRE et al. (1993) tendeu a maior estimativa da evaporação para o reservatório de Sobradinho e Três Marias. As menores estimativas, para ambos os reservatórios, foram observadas no modelo de THORNTHWAITE (1948).

VAREJÃO-SILVA (2006) fez críticas relacionadas à equação de THORNTHWAITE (1948), alertando que este método fornece apenas uma aproximação da ordem de grandeza que se deseja conhecer, pois não considera inúmeros fatores intervenientes no processo de evaporação. ROSENBERRY et al. (2007), testando 15 métodos para estimar a evaporação em um lago localizado em uma região de clima úmido e continental, constataram que o modelo de THORNTHWAITE (1948) forneceu estimativas precisas da evaporação na região, ao contrário do observado no presente trabalho, indicando que, para regiões de climas semiáridos e áridos, o modelo tende a subestimar os resultados.

### Evaporações estimadas com dados de diferentes estações meteorológicas

Na Figura 4, são apresentados os resultados de evaporação estimados a partir da estação localizada na área da barragem com a média dos resultados de duas estações que se localizam no entorno do reservatório de Sobradinho.



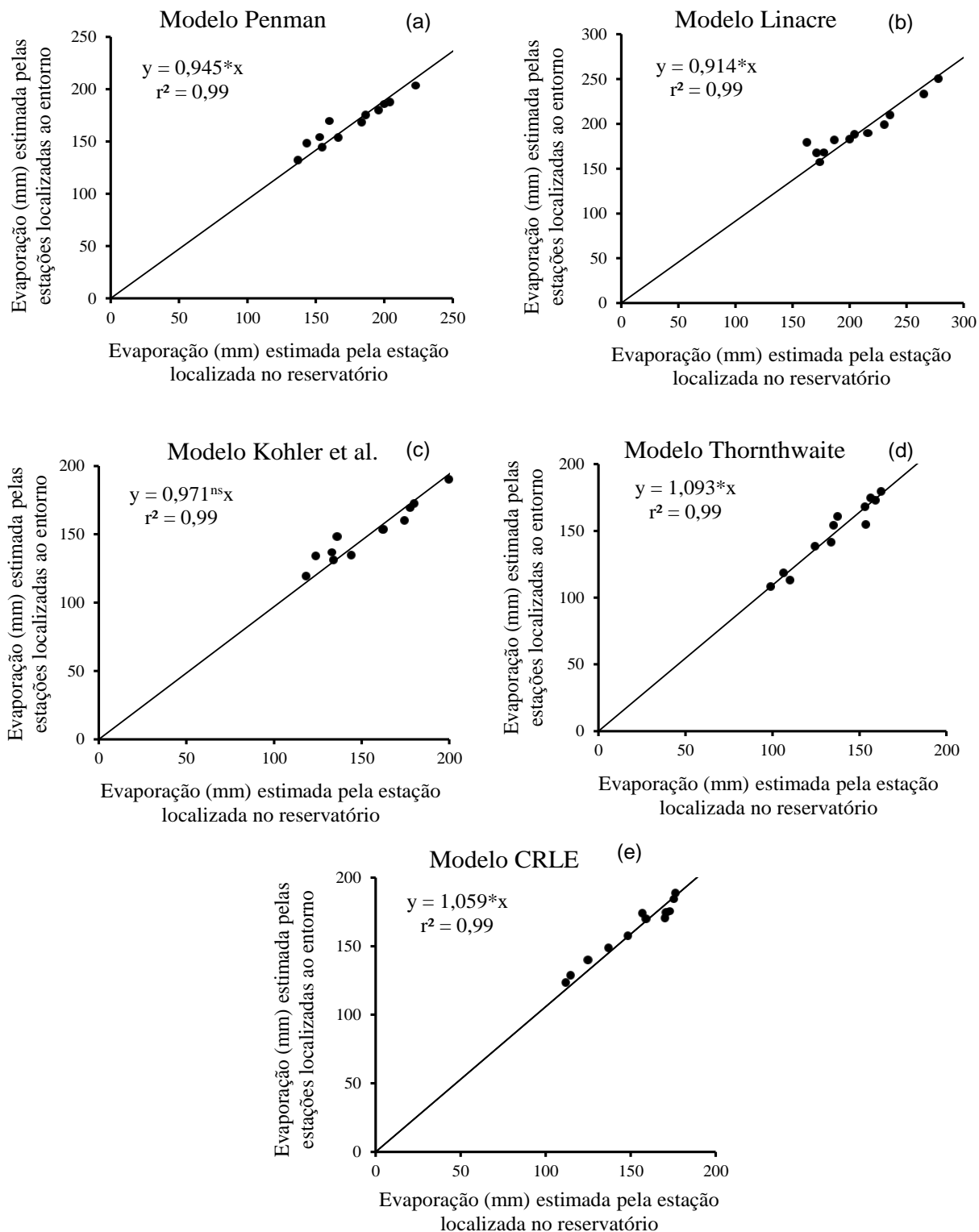
\* significativo pelo teste t, a 5% de probabilidade, <sup>ns</sup> não significativo pelo teste t, a 5% de probabilidade.

FIGURA 4. Comparação entre as evaporações estimadas usando dados da estação localizada na área da barragem de Sobradinho – BA, com aquelas estimadas usando dados médios das estações localizadas ao entorno para os modelos: PENMAN et al. (1948) (a), LINACRE et al. (1993) (b), KOHLER et al. (1995) (c), THORNTHWAITE (1948) (d) e CRLE (e). **Evaporation estimates calculated using data from stations located in Sobradinho reservoir (BA) compared to those from stations around this reservoir, for the models Penman (a) Linacre (b) Kohler et al. (c) Thornthwaite (d) and CRLE (e).**

Analisando-se as equações encontradas para cada modelo (Figura 4), verifica-se que apenas o modelo KOHLER et al. (1995) estima os mesmos valores de evaporação para a estação localizada na barragem e as vizinhas, pois o coeficiente angular não difere estatisticamente de um. Quando se utilizam os modelos de PENMAN et al. (1948) e de LINACRE et al. (1993), as estações localizadas no entorno do reservatório de Sobradinho subestimam a evaporação no lago em 6% e 9%, respectivamente. Ao utilizar os modelos CRLE e THORNTHWAITE (1948), as estações no entorno do reservatório superestimam a evaporação no lago em 6% e 9%. As estações do entorno, provavelmente, superestimaram a evaporação no reservatório quando se aplicam os modelos CRLE e THORNTHWAITE (1948), ao contrário do que ocorre com os modelos de PENMAN et al. (1948) e LINACRE et al. (1993), em decorrência de: a) o modelo de THORNTHWAITE (1948) levar em consideração apenas dados de temperatura média do ar, tendo em vista que é maior nas cidades vizinhas do que no reservatório, chegando a atingir 30°C; b) como o modelo CRLE apresenta maior sensibilidade à temperatura e não leva em consideração a velocidade do vento, tais fatores podem ter contribuído para a superestimava da evaporação.

Na Figura 5, encontram-se dispostos os resultados de evaporação estimados a partir da estação na área da barragem, com a média dos resultados de três estações que se localizam ao entorno do reservatório de Três Marias.

Através das equações encontradas em cada modelo, dispostas na Figura 5, verifica-se que apenas o modelo LINACRE et al. (1993) estima valores de evaporação estatisticamente iguais para as estações da barragem e as vizinhas. Quando se utilizam os demais modelos, as estações no entorno do reservatório subestimam a evaporação no reservatório. Quantitativamente, os resultados são subestimados em 12%, 8%, 6% e 5% pelos modelos de THORNTHWAITE (1948), CRLE, KOHLER et al. (1995) e PENMAN et al. (1948), respectivamente.



\* significativo pelo teste t, a 5% de probabilidade, <sup>ns</sup> não significativo pelo teste t, a 5% de probabilidade.

**FIGURA 5.** Comparação entre as evaporações estimadas usando dados da estação localizada na área da barragem de Três Marias – MG, com aquelas estimadas usando dados médios das estações localizadas ao entorno para os modelos: PENMAN et al. (1948) (a), LINACRE et al. (1993) (b), KOHLER et al. (1995) (c), THORNTHWAITE (1948) (d) e CRLE (e). **Evaporation estimates calculated using data from stations located in Três Marias reservoir (MG) compared to those estimated from stations around this reservoir, for the models Penman (a) Linacre (b) Kohler et al. (c) Thornthwaite (d) and CRLE (e).**

Um estudo semelhante foi realizado por DIAS & KELMAN (1987) no reservatório de Sobradinho – BA, no período de 1979 a 1982, no qual compararam as estimativas mensais de

evaporação através do modelo CRLE com base em dados de três postos de coleta localizados ao redor do reservatório. A partir dos resultados, os autores concluíram que o modelo CRLE apresentou resultados mais uniformes, e as diferenças na evaporação entre as estações variaram de 0,4% a 2,4%.

## CONCLUSÕES

Os resultados apresentados permitem as seguintes conclusões:

1) Quando comparado ao modelo de PENMAN et al. (1948):

a) o modelo LINACRE et al. (1993) superestima os resultados de evaporação em ambos os reservatórios;

b) os modelos KOHLER et al. (1995) e THORNTHWAITE (1948) subestimam os resultados de evaporação em ambos os reservatórios;

c) o modelo Complementary Relationship Lake Evaporation (CRLE) subestima os resultados de evaporação para o reservatório de Sobradinho, para Três Marias estimam resultados estatisticamente iguais;

d) o método do tanque Classe A, com  $K_p = 0,6$ , apresenta resultado mais próximo ao de PENMAN et al. (1948) para o reservatório de Sobradinho.

2) Os modelos não estimaram resultados de evaporação estatisticamente iguais, no reservatório de Sobradinho e Três Marias, quando se utilizam estações meteorológicas localizadas ao lado do reservatórios e em seu entorno, com exceção do modelo KOHLER et al. (1995) em Sobradinho, e do modelo LINACRE et al. (1993) em Três Marias.

## REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Grop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage**. Paper No. 56, FAO, Italy, 1998. 328p.

CURTARELLI, M.P.; ALCÂNTARA, E.H.; ARAÚJO, C.A.S.; STECH, J.L.; LORENZZETTI, J.A. Avaliação da dinâmica temporal da evaporação no reservatório de Itumbiara, GO, utilizando dados obtidos por sensoriamento remoto. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 8, n. 1, p. 272-289, 2013.

DIAS, N.L.C.; KELMAN, J. Comparações entre modelos climatológicos e o uso de tanque classe A para estimar a evaporação no reservatório de Sobradinho. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, 7., 1987, Salvador, BA. **Anais...** São Paulo: ABRH, 1987. p. 162-169.

DONOHUE, R.J.; MCVICAR, T.R.; RODERICK, M.L. Assessing the ability of potential evaporation formulations to capture the dynamics in evaporative demand within a changing climate. **Journal of Hydrology**, v. 386, p. 186-197, 2010.

ELSAWWAF, M.; WILLEMS, P.; FEYEN, J. Assessment of the sensitivity and prediction uncertainty of evaporation models applied to Nasser Lake, Egypt. **Journal of Hydrology**, v. 395, p. 10-22, 2010.

FONTES, A.S. **Estudo da evaporação em reservatórios situados em região semi-árida: uso de bacia experimental**. 2005. 210 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental e Urbana) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2005.

KOHLER, M.A.; NORDENSEN, T.J.; FOX, W.E. Evaporation from pans and lakes, U.S. **Weather Bureau Research**, n. 38, p. 1-21, 1955. (Paper 38).

LEÃO, R.A.O.; SOARES, A.A.; TEIXEIRA, A.S.; SILVA, D.D. Estimativa da evaporação no açude Banabuiú, no Estado do Ceará, por diferentes métodos combinados, derivados da equação de Penman. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 1, p. 129-144, 2013.

- LEITÃO, M. de M.V.B.R.; OLIVEIRA, G.M de; LEITÃO, T.J.V. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evaporação para duas regiões da Paraíba, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 6, p. 585–593, 2007.
- LELIS, T.A.; CALIJURI, M.L.; SANTIAGO, A. DA F.; LIMA, D.C. DE; ROCHA, E. DE O. Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudoeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Porto Alegre, v. 36, p. 623-634, 2012.
- LINACRE, E.T. Data-sparse estimation of lake evaporation using a simplified Penman equation. Elsevier Science Publishers B.V. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 64, p. 237-256, 1993.
- LOWE, L.D.; WEBB, J.A.; NATHAN, R.J.; ETCHELLS, T.; MALANO, H.M. Evaporation from water supply reservoirs: an assessment of uncertainty. **Journal of Hydrology**, v. 376, p. 261-274, 2009.
- MORTON, F.I. Operational estimates of lake evaporarion. **Journal of hydrology**, v. 66, p. 77-100, 1983.
- PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society**, v. 193, p. 120-145, 1948.
- PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.
- PEREIRA, S.B.; PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D.; RAMOS, M.M. Evaporação líquida no lago de Sobradinho e impactos no escoamento devido à construção do reservatório. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 346-352, 2009.
- RIMMER, A.; SAMUELS, R.; LECHINSKY, Y. A comprehensive study across methods and time scales fluxes from Lake Kinneret, Israel. **Journal of Hydrology**, v. 379, p. 181-192, 2009.
- RONG, Y.; SU, H.; ZHANG, R.; DUAN, Z. Effects of Climate Variability on Evaporation in Dongping Lake, China, during 2003–2010. **Hindawi Publishing Corporation**, v. 2013, p.1-11, 2013.
- ROQUE, R.O.; SANSIGOLO, C.A. Estimativas de evaporação do lago Taquaruçu, SP pelo modelo conceitual de Morton. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 1, p. 21-28, 2001.
- ROSENBERRY, D.O.; WINTER, T.C.; BUSO, D.C.; LIKENS, G.E. Comparison of 15 evaporation methods applied to a small mountain lake in the northeastern USA. **Journal of Hydrology**, v. 340, p. 149-166, 2007.
- SILVA, J.B.L DA; FERREIRA, P.A.; RAMOS, M.M.; EUCLYDES, H.P.; SOARES, V.P. Modelos de previsão de enchentes em tempo real para o município de Nova Era – MG. **Recursos Hídricos e Ambientais**, p. 190-204, 2009.
- THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geography Review**, v. 38, p. 55-94, 1948.
- VAREJÃO-SILVA, M.A. **Meteorologia e Climatologia**. Recife: 2006. 443 p. Versão Digital 2.
- VIEIRA, N.P.A. **Estimativa de evaporação nos reservatórios de Três Marias – MG e Sobradinho – BA**. 2015. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2015.
- WURBS, R. A.; AYALA, R. A. Reservoir evaporation in Texas, USA. **Journal of Hydrology**, v. 510, p. 1-9, 2014.
- YU, S.; LIU, J.; XU, J. Evaporation and energy balance estimates over a large inland lake in the Tibet-Himalaya. **Environ Earth Sci**, v. 64, p. 1169-1176, 2011.