



XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

SENSIBILIDADE DA VAZÃO GERADA PELO MODELO HIDROLÓGICO SMAP EM RELAÇÃO AOS DIVERSOS METODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Tácio Ribeiro Braga^{1}; Renan Vieira Rocha¹; Victor Costa Porto¹; Larissa Zaira Rafael Rolim¹; Renata Locarno Frota¹; Bruno Araújo Paiva¹; Danilo Jorge Evangelista Cunha¹; Vicente de Castro Sanders Neto¹ & Ticiano Marinho de Carvalho Studart²; Francisco Assis de Souza Filho².*

Resumo – Neste trabalho avaliou-se a sensibilidade das vazões geradas pelo modelo chuva-deflúvio SMAP na bacia do rio Banabuiú, calibrados com dados das séries históricas de vazão e precipitação do período de 1912 a 2012, e os valores de evapotranspiração média mensal estimados por 17 diferentes métodos, utilizando os dados climáticos das normais climatológicas do posto de Quixeramobim. A média dos valores da evapotranspiração anual foi de 1.697,2 mm/ano, com um coeficiente de variação de 0,42. Entretanto, as vazões geradas pelo SMAP para cada estimativa de evapotranspiração, apresentaram pouca variação entre si, com exceção dos métodos Blaney-Cridle, Chapman Australian e Hamon, que estimaram valores de evapotranspiração bem abaixo da média. Também foi avaliada a eficiência do SMAP através do coeficiente de Nash-Sutcliff, o qual apontou boa eficiência para todos os métodos, com exceção destes mesmos três. Concluiu-se que as vazões geradas pelo modelo SMAP não são sensíveis ao método de estimativa da evapotranspiração, podendo esses, serem utilizados sem grande impacto nas vazões modeladas, com exceção daqueles que subestimam o efeito da evapotranspiração.

Palavras-Chave - Evapotranspiração; SMAP; Nash-Sutcliff.

SENSITIVITY OF THE FLOW GENERATED BY THE SMAP HYDROLOGICAL MODEL IN RELATION TO THE VARIOUS METHODS OF EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATION

Abstract – This work evaluated the sensitivity of the flows generated by the SMAP rainfall-runoff model in the basin of the Banabuiú river, calibrated with data of the historical series of flow and precipitation of the period from 1912 to 2012, and the values of average monthly evapotranspiration estimated by 17 different Methods, using climatic data from the climatological norm of the Quixeramobim station. The mean annual evapotranspiration values were 1,697.2 mm / year, with a coefficient of variation of 0.42. However, the flows generated by SMAP for each evapotranspiration estimation showed little variation among them, with the exception of the Blaney-Cridle, Chapman Australian and Hamon methods, which estimated well below average evapotranspiration values. It was also evaluated the efficiency of the SMAP through the Nash-Sutcliff coefficient, which indicated

¹ Mestrandos em Eng. Civil – Recursos Hídricos (UFC) – eng_civil_tacio@hotmail.com, renanvierocha@gmail.com, victorcporto@gmail.com, larissazairarr@gmail.com, renata.locarno@hotmail.com, brunoaraujoengenheiro@gmail.com, daniilojorge87@gmail.com, vicentesanders@hotmail.com.

² Professores do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Bloco 713, e-mail: ticiano@ufc.br, assis@ufc.br

good efficiency for all methods, except for the same three. It was concluded that the flows generated by the SMAP model are not sensitive to the method of estimation of evapotranspiration, and these can be used without great impact in the modeled flows, with the exception of those that underestimate the effect of evapotranspiration.

Keywords – Evapotranspiration; SMAP; Nash-Sutcliff.

1. INTRODUÇÃO

Um dos maiores problemas enfrentados pelo gerenciamento de recursos hídricos é a carência de dados fluviométricos. Apesar de existirem muitas estações fluviométricas, grande parte possui falhas na aferição de dados ou está desativada. Para a estimativa da vazão em uma determinada seção do rio ou que aflui para algum reservatório, faz-se, pois, necessária a utilização de modelos hidrológicos. Um dos modelos mais utilizados é o Soil Moisture Accounting Procedure – SMAP, que consiste em um modelo hidrológico chuva-deflúvio que considera o armazenamento e os fluxos de água em reservatórios fictícios. (LOPES et al., 1981; NASCIMENTO et al., 2009). O modelo foi utilizado por Singh (2015) para modelar as cheias na bacia do rio Vamsadhara, Índia. Nascimento (2009) o utilizou para Calibração no Estado do Ceará obtendo bons resultados numa abordagem multiobjetiva.

Um dos parâmetros de entrada do SMAP é a evapotranspiração de referencia (ET_o), que é definida como a evapotranspiração de uma cultura hipotética padronizada (CARVALHO et al., 2011). Visto a dificuldade de medição direta de evapotranspiração é necessário a utilização de modelos que estimem a ET_o (Alencar et al. 2011). Existem na literatura uma grande quantidade de métodos (complexos e simples) para essa estimativa, os quais utilizam diversos parâmetros climáticos de entrada, tais como: umidade relativa, temperaturas médias e radiação solar. Devido a esta grande quantidade de métodos de estimativa de ET_o, a escolha do método normalmente se dá pela disponibilidade de dados climatológicos. Visto a ET_o ser uma das variáveis de entrada do SMAP, é necessário a análise do impacto da escolha do método de estimativa de ET_o nos valores vazão gerados pelo SMAP.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo verificar a sensibilidade das vazões geradas pelo SMAP na bacia do rio Banabuiú à evapotranspiração estimada por 17 métodos existentes na literatura a fim de avaliar o impacto da escolha do método.

2. METODOLOGIA

A área de estudo é a bacia do reservatório Banabuiú, localizada na região central do estado do Ceará e possuindo área de 13.500 km². Para os cálculos das diversas fórmulas de evapotranspiração utilizou-se como entrada os dados das Normais Climatológicas (INMET, 1990) da estação de Quixeramobim. As séries históricas de precipitação necessárias foram obtidas de postos pluviométricos da região a partir da plataforma HIDROWEB da ANA. Os dados observados de vazões afluentes foram obtidos junto à Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH).

Para obtenção dos valores de evapotranspiração, foi utilizado uma rotina (Guo et al. 2016) desenvolvido na linguagem R, que realiza estimativas de ET_o para diversas metodologias. A Tabela 1 apresenta os 17 métodos que foram utilizadas para a estimativa da ET_o, com seus parâmetros de entrada.

A precipitação mensal da bacia de estudo foi obtida através do método de Thiessen para os postos utilizados.

O modelo SMAP foi executado na escala mensal para o período em que se possuíam dados de precipitação e série histórica de vazões afluentes (janeiro de 1912 a dezembro de 2012) totalizando 101 anos simulados, tendo como parâmetros de entrada a precipitação mensal e a ETo média mensal. A calibração dos demais parâmetros do SMAP se deu para cada um dos métodos de estimativa de ETo pela minimização dos erros quadráticos medidos em relação às vazões afluentes observadas (série histórica).

A sensibilidade da ETo foi medida tomando o Método de Penman-Monteith como referência visto ser bastante utilizado e o recomendado pela FAO (Smith, 1991). Já a sensibilidade das vazões foi calculada tomando as vazões afluentes observadas como referência visto se tratarem de dados medidos.

Para verificar a eficiência e ajuste do modelo SMAP em simular as vazões afluentes com os valores de evapotranspiração estimados por cada método, foi utilizado o Coeficiente de Eficiência Nash-Sutcliff (Baltokoski, 2010), apresentado na equação (1), segundo Asce (1993), cujo valores variam do negativo infinito à um (ajuste perfeito).

$$COE = \frac{\sum_{i=1}^n (Em - Es)^2}{\sum_{i=1}^n (Em - \overline{Es})^2} \quad (1)$$

Onde Em é o evento observado; Es, o evento simulado e \overline{Es} a média do evento simulado; e n, o número de eventos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Sensibilidade da evapotranspiração

A Tabela 2 apresenta os resultados de ETo anual calculados a partir das 17 equações. Os modelos estudados apresentaram valores de ETo bastante diferentes entre si. O valor médio de evapotranspiração anual média obtido foi de 1.697,2 mm/ano com um desvio padrão de 725,6 mm/ano resultando em um coeficiente de variação de 0,42. Os resultados variaram entre 575,2 mm/ano dado pelo modelo Hamon e 3.215,3 mm/ano (cerca de seis vezes o menor) pelo modelo Penpan.

Tabela 1 - Resultados dos Métodos - Evapotranspiração Anual Média.

Métodos	Evapotranspiração Anual (mm/ano)	Métodos	Evapotranspiração Anual (mm/ano)
Abtew	1517,29	Blaney Criddle	794,73
Brutsaert Strickler	1308,84	Chapman Australian	865,09
Hamon	575,17	Hargreaves Samani	1625,35
JensenHaise	2239,87	Makkink	1316,64
Matt Shuttleworth	1178,33	McGuinness Bordne	2572,29
Penman	2534,15	Penman Monteith	1993,56
PenPan	3215,27	Priestley Taylor	1726,82
Romanenko	2534,66	Szilagyi Jozsa	1261,34
Turc	1592,88		

Tabela 2 - Métodos de Evapotranspiração de Referência.

Método - Referência original/citada	Elementos Meteorológicos de entrada	Variáveis auxiliares de entrada	Equação	Observações
Abtew (1996)	U_R, T, R_S	Lat	$ET_o = K \frac{R_S}{\lambda}$	
Brutsaert And Stricker (1979)	R_S, T, P, γ, v	λ, ρ, G, Lat	$ET_o = (2\alpha_{PT} - 1) \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \left(\frac{R_S + G}{\lambda \rho} \right) \cdot 86,4$ $- \left(\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right) [0,26(0,5 + 0,54 \cdot v)(e_s - e_a)]$	A formulação considera que a evaporação no lago determinada pela equação de Priestley-Taylor, com o termo aerodinâmico considerado nulo, corresponde à média entre a evaporação real e a potencial determinada pela equação de Penman
Makkink (1957)	R_S, T, P	Lat	$ET_o = R_G \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) + 0,12$	Obteve a correlação entre ETo diária e a radiação solar ao nível da superfície
Radiação Solar - Doorenbos & Pruitt (1977)	T, v, U_R, R_S, P		$ET_o = -0,3 + k \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_G \right)$	Adaptação feita do método de makkink.
Jensen-Haise (1963)	T, R_S	Lat	$ET_o = 0,5143 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_N - G)$	Para os autores evaporação potencial é aquela que ocorre em campos irrigados em áreas áridas e semi-áridas. Utilizada para períodos de 5 a 10 dias
Hargreaves-Samani (1985)	$T, T_{mín}, T_{máx}$	Lat	$ET_o = 0,0023 R_S (T_{máx} - T_{mín})^{0,5} (T + 17,8)$	Para a estimativa de ETo diaria
Blaney-Criddle - Doorenbos & Pruitt (1977)	$T_{mín}, UR_{mín}, v, n$	Lat	$ET_o = KP(0,457T + 8,13)$	Estima a ETo média mensal de um gramado
Priestley-Taylor (1972)	T, P, R_N, G	Lat	$ET_o = 0,5143 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_N - G)$	Este método pode ser interpretado como uma simplificação do método de Penman ou uma versão do método do balanço de energia.
Penman (1948)	$T_{máx}, T_{mín}, T, U_R,$ v, n, P, R_S, R_N	Lat	$ET_o = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} 0,408(R_N - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} 0,26 \left(1 + \frac{v}{160} \right) (e_s - e)$	
Penman-Monteith - Allen <i>et al.</i> (1998)	$T_{máx}, T_{mín}, T, U_R,$ v, n, P, R_S, R_N	Lat	$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_N - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} v \frac{(e_s - e)}{10}}{\Delta + \gamma(1 + 0,34v)}$	

Método - Referência original/citada	Elementos Meteorológicos de entrada	Variáveis auxiliares de entrada	Equação	Observações
Granger e Gray (1989)	R_N, T, P, G	Lat, γ	$ET_o = \frac{\Delta \cdot G}{\Delta \cdot G + \gamma} R_N + \frac{\gamma G}{\Delta \cdot G + \gamma}$	Deriva da equação de Penman e foi proposta para estimar a evapotranspiração atual para diferentes coberturas de solo não saturadas.
Hamon (1961)	T	Lat	$ET_o = 0,55 \left(\frac{N}{12} \right)^2 \left(\frac{4,95 \exp^{0,062T}}{100} \right) 25,4$	A duração astronômica de dias (N) pode ser estimada a partir da latitude.
Matt-Shuttleworth - Shuttleworth and Wallace (2009)	$T_{m\acute{a}x}, T_{m\acute{i}n}, T, U_R,$	Lat	$ET_o = \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) 0,408 (R_N - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} 2,624(1 + 0,536v)(e_s - e)$	
Chapman Australian - Chapman (2001)	$T_{m\acute{a}x}, T_{m\acute{i}n}, T, U_R,$ T_{PO}, R_S	Lat	$ET_o = (0,17 + 0,011Lat) Epan + 10^{(0,66 - 0,211Lat)}$	Epan é a evaporação do tanque Classe-A em mm dia ⁻¹
McGuinness-Bordne (1972)	T, R_o	Lat	$ET_o = \frac{R_o}{\lambda} \frac{T + 5}{68}$	
Romanenko - Oudin <i>et al.</i> (2005)	T, U_R	Lat	$ET_o = 4,5 \left(1 + \frac{T}{25} \right)^2 \left(1 - \frac{e}{e_s} \right)$	
Turc (1961)	T, U_R, R_S	Lat	$ET_o = \frac{0,013T}{T + 15} (23,9R_S + 50)$	
Penpan - Rotstayn <i>et al.</i> (2006)	$T_{m\acute{a}x}, T_{m\acute{i}n}, T, U_R,$ T_{PO}, R_S	Lat	$ET_o = \frac{\Delta(R_N - G) + \text{Lay}f_h(v) \frac{(e_s - e)}{10}}{\Delta + a\gamma}$	O modelo Penpan é baseado na equação de evapotranspiração potencial do modelo de Penman

T, $T_{m\acute{e}d}$, $T_{m\acute{i}n}$, $T_{m\acute{a}x}$: temperaturas média, média mensal observada no mês de estudo, mínima e máxima, respectivamente (°C); U_R : umidade relativa média diária (%); v: velocidade do vento (m s⁻¹); n: insolação ou horas de brilho solar (h); P: pressão atmosférica média diária (kPa); R_S : radiação solar (mm dia⁻¹); R_N : saldo de radiação do sistema solo-planta-atmosfera (MJ m⁻²dia⁻¹); I: índice de calor da região (adm); γ : constante psicométrica (kPa°C⁻¹); λ : calor latente (MJ kg⁻¹); ρ : massa específica (kg m⁻³); G: fluxo de calor para o fundo do reservatório (MJ m⁻²dia⁻¹); T_{PO} : temperatura do ponto de orvalho (°C); $U_{R\ min}$: umidade relativa mínima (%); R_o : radiação extraterrestre (mm dia⁻¹); Δ : inclinação da curva de saturação da temperatura de vapor-pressão (kPa°C⁻¹); e_s : pressão de vapor de saturação (kPa); e_a : pressão de vapor (kPa); R_G : radiação global (mm dia⁻¹); ϕ : latitude local (°); N: fotoperíodo (h); f_h : coeficiente de transferência de vapor (kg m⁻²s⁻¹Pa⁻¹); k, a: coeficiente e constante do local (adm). Fonte: Adaptado de Carvalho *et al.* (2011), Cunha *et al.* (2013), Guo *et al.* (2016).

O valor anual obtido pela equação de Penman-Monteith, adotada como a de referência, foi de 1.993,6 mm/ano, estando próximo à média. Contudo, foi observado que os outros modelos apresentaram desvios entre 12% e 70% em relação à esta equação. Esta variação pode ser vista graficamente na Figura 1 que mostra os valores anuais de evapotranspiração estimados em que a linha vermelha mostra o patamar do resultado obtido por Pennan-Monteith. Assim a variação em relação aos valores deste método pode ser observada como a distância do resultado de cada modelo à essa linha.



Figura 1 – Evapotranspiração Anual dos 17 métodos calculados.

3.2 Sensibilidade da vazão

Os valores médios de vazão afluente gerados pelo SMAP para cada método estão apresentados na Figura 2 juntamente com a média da vazão observada. Observa-se que todos os métodos resultaram em valores médios próximos ao do observado apresentando desvios menores que 6%, exceto Brutsaert-Stricker, Chapman Australian e Hamon que apresentaram vazões médias bem maiores que os demais.

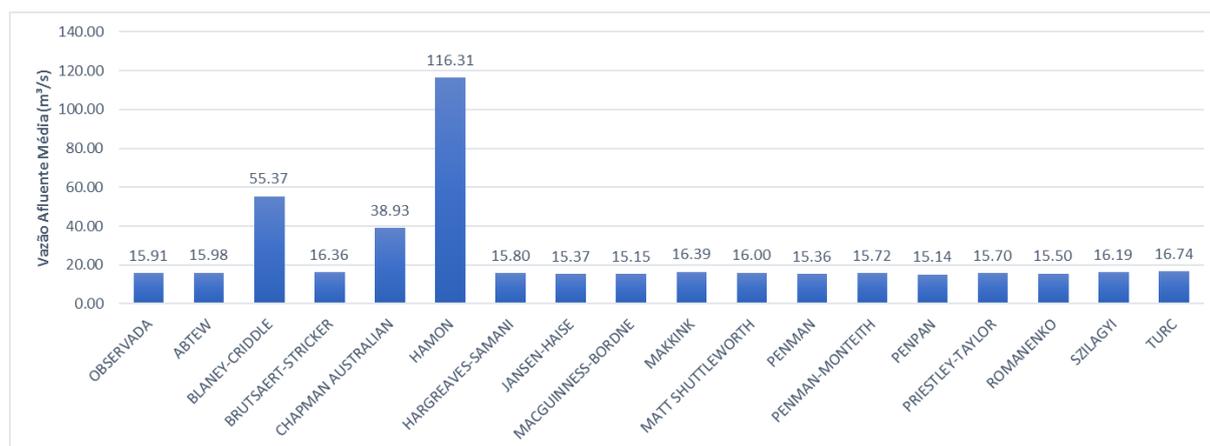


Figura 2 - Vazões obtidas pelo modelo SMAP.

Estes três modelos foram os que estimaram os menores valores de ETo, também foi verificado que para os modelos que estimaram as maiores ETo, as vazões médias geradas tiveram valores próximos aos demais. Revelando, assim, a sensibilidade do modelo SMAP apenas para ETo's abaixo de um certo patamar e praticamente nenhuma sensibilidade para altos valores de ETo, o que é mostrado na Figura 3 que relaciona o valor de evapotranspiração anual média de cada método com a resposta de vazão obtida pelo SMAP.

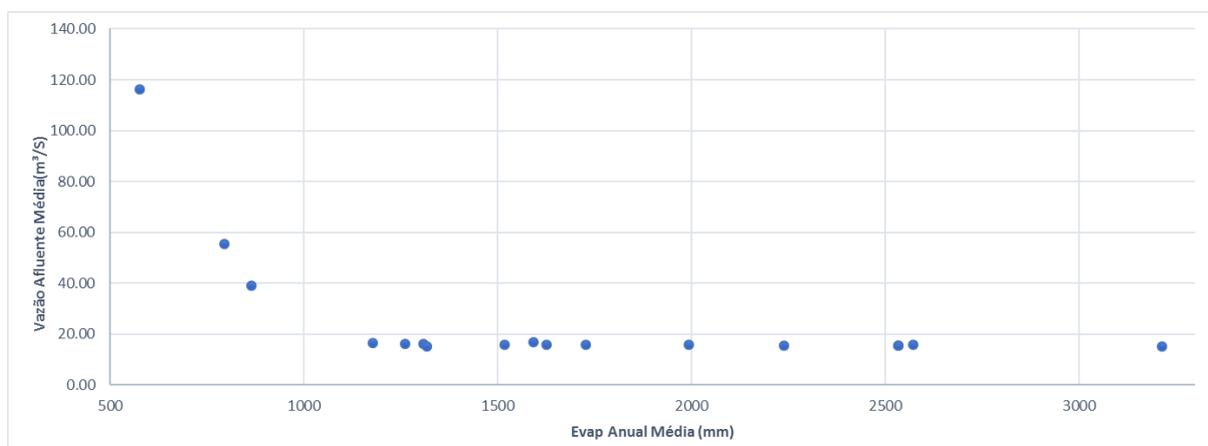


Figura 3 – Evaporação Anual Média (mm) x Vazão Afluente Média (m³/s) gerada pelo SMAP.

3.3 Avaliação do modelo SMAP

Para complementar a análise do impacto da ETo na vazão gerada pelo modelo SMAP, verificou-se a eficiência do SMAP em estimar as vazões por meio do coeficiente de Nash-Sutcliff e da correlação com base nos dados observados. A Tabela 3 seguinte apresenta os valores de Nash-Sutcliff e do coeficiente de correlação para cada método utilizado.

Tabela 3 – Coeficiente Nash-Sutcliff e Correlação

MÉTODO	NASH-SUTCLIFF	CORREL AÇÃO	MÉTODO	NASH-SUTCLIFF	CORREL AÇÃO
ABTEW	0.83	0.91	PENPAN	0.86	0.94
BLANEY-CRIDDLE	- 2.39	0.841	PRIESTLEY-TAYLOR	0.85	0.93
BRUTSAERT-STRICKER	0.77	0.88	HARGREAVES-SAMANI	0.84	0.92
CHAPMAN AUSTRALIAN	- 0.74	0.83	MATT SHUTTLEWORTH	0.72	0.86
HAMON	- 13.08	0.85	PENMAN	0.87	0.94
ROMANENKO	0.86	0.93	PENMAN-MONTEITH	0.86	0.93
JANSEN-HAISE	0.88	0.94	SZILAGYI	0.74	0.87
MAKKINK	0.78	0.89	TURC	0.82	0.91
MACGUINNESS-BORDNE	0.89	0.95			

Todos os métodos, com exceção dos três que geraram vazões elevadas, obtiveram valores de Nash-Sutcliff próximos de 1, o que mostra que a eficiência do SMAP para a região independe do método adotado. Foram encontradas correlações maiores que 0.80 para todos os métodos.

A alta correlação pode ser explicada pela utilização dos mesmos valores de precipitação para todos os métodos e a variação no NASH se deve à sensibilidade do SMAP aos valores de evapotranspiração entrados, mostrando também a disparidade dos modelos que subestimaram a ETo.

4. CONCLUSÃO

Com a proposta de realizar a análise da sensibilidade de diferentes métodos de estimativa de ETo diante do modelo SMAP, pode-se constatar que o resultado obtido para todos os métodos analisados, com exceção de Brutsaert-Stricker, Chapman Australian e Hamon Abteu, resultaram em

vazões médias sem muita variação significativa de ordem de grandeza e próximas à observada, mostrando que a vazão modelada só é sensível aos métodos que estimem baixos valores de ETo.

A análise da sensibilidade da eficiência da modelagem pelo coeficiente de Nash-Sutcliff mostrou que todos os métodos com exceção destes mesmo três obtiveram coeficientes maiores que 0,8, mostrando uma modelagem de boa eficiência em relação aos dados observados.

A partir destas duas análises, concluiu-se que as vazões geradas pelo modelo SMAP não são sensíveis ao método de estimativa de ETo. Assim, a escolha do método de estimativa de ETo não traz impacto significativo nas vazões modeladas pelo SMAP, com exceção de métodos que subestimem os valores de ETo.

A aplicação desta metodologia para regiões de clima semelhante, deve apresentar os mesmos resultados. Recomenda-se a sua aplicação em outras regiões a fim de comparação de resultados.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASCE. (1993) Task Committee on Definition of Criteria for Evaluation of Watershed Models of the Watershed Management. Committee Irrigation and Drainage Division. Criteria for evaluation of watershed models. *J. Irrig. Drainage Eng.*, n. 119, pp. 429-442;

ALENCAR, L.P.; SEDIYAMA, G.C.; WANDERLEY, H.S.; ALMEIDA, T.S.; DELGADO, R. C. (2011). Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades no norte de Minas Gerais. *Engenharia na Agricultura*, V.19, n.5, pp. 437-449.

BALTOKOSKI, V.; TAVARES, M. H. F.; MACHADO, R. E.; OLIVEIRA, M. P. (2010). Calibração de modelo para a simulação de vazão e de fósforo total nas sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro – Pato Branco (PR). *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, n. 34, pp 253-261.

CARVALHO, L. G. et al. (2011) Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 41, n. 3.

CUNHA, F. F.; MAGALHÃES, F. F.; CASTRO, M. A. (2013). Métodos para estimativa da evapotranspiração de referência para Chapadão do Sul-MS. *Engenharia na Agricultura*, v. 21, n. 2, pp. 159-172.

GUO, D.; WESTRA, S.; MAIE, H. R. (2016). An R package for modelling actual, potential and reference evapotranspiration. *Environmental Modelling and Software*, n. 78, pp. 216-224..

SMITH, M. (1991). Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements. *Rome FAO*. 45p.