

SÉRIES DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL PARA ESTIMATIVAS DE NÍVEIS FREÁTICOS EM ÁREA DE RECARGA DO AQUIFERO GUARANI

RODRIGO L. MANZIONE¹; FRANCISCO F. N. MARCUZZO²; EDSON WENDLAND³

¹ Eng. Agrônomo, Prof. Assistente Dr., UNESP/Ourinhos-SP - Av. Vitalina Marcusso, nº 1500, CEP 19910-206, Fone: (14) 3302-5700
manzione@ourinhos.unesp.br

² Eng. Agrônomo, Dr., Pesquisador em Geociências, CPRM - Instituto Geológico do Brasil – Goiânia/GO.

³ Eng. Civil, Prof. Associado Dr., Depto. de Hidráulica e Saneamento - EESC-USP/São Carlos-SP.

Apresentado no XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia
22 a 25 de Setembro de 2009 – GranDarrell Minas Hotel, Eventos e Convenções – Belo Horizonte
– MG.

RESUMO: Para estimar flutuações de lençóis freáticos, modelos de funções de transferência de ruído utilizam-se de séries de dados de entrada, no caso precipitação e evapotranspiração potencial, que são transformados em séries de dados de saída, no caso níveis freáticos. As séries observadas de precipitação e alturas de lençol freático possuem menos incerteza que as séries de evapotranspiração potencial, que podem ser estimadas por diversos métodos. O objetivo desse trabalho foi comparar o método proposto pela FAO, FAO Penman-Monteith (1998) com o método original proposto por Penman-Monteith (1965) para estabelecer a relação entre o excedente/déficit hídrico e os níveis freáticos observados em um poço em área de recarga do sistema aquífero Guarani. Para isso utilizou-se o modelo PIRFICT que incorpora sentido físico as análises através do ajuste de funções de impulso e resposta que descrevem a dinâmica do sistema aquífero em função de variáveis climatológicas. Verificou-se que a utilização de séries temporais estimadas por ambos os métodos obtiveram bons resultados na calibração do modelo, entretanto não foi possível ajustar uma função de impulso e resposta para o método FAO Penman-Monteith pela natureza ruidosa da série.

PALAVRAS-CHAVE: séries temporais, modelo PIRFICT, água subterrânea.

POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION SERIES TO ESTIMATE WATER TABLE DEPTHS IN A GUARANI AQUIFER SYSTEM RECHARGE AREA

ABSTRACT: To estimate water table depths, transfer function noise models use time series as input, in this case precipitation and potential evapotranspiration, which are transformed into output series, in this case water table depths. The observed precipitation and water table depths series have less uncertainty than potential evapotranspiration series that can be estimated by several different methods. The aim of this work was to compare the potential evapotranspiration estimation method proposed by FAO Penman-Monteith (1998) with the original method proposed by Penman-Monteith (1965) to establish the relationship between precipitation surplus/deficit and the water table depths observed in a well in a Guarani Aquifer System recharge area. For this purpose we use the so-called PIRFICT model that incorporates physical sense to the analysis adjusting impulse response functions which describe the dynamics of the aquifer system based on climatological inputs. We verify good model calibrations using the time series estimated by both methods. However, it was not possible to adjust impulse response functions to FAO Penman-Monteith that generates noisy series.

KEYWORDS: time series, PIRFICT model, groundwater.

INTRODUÇÃO: Informações sobre a dinâmica de níveis freáticos são importantes para balancear os interesses econômicos e ecológicos quanto ao uso do solo e da água (Von Asmuth e Knotters, 2004). Em hidrologia, a dinâmica do lençol freático tem sido explicada de diversas formas. No campo das análises de séries temporais, modelos de função de transferência de ruído (transfer-function noise models-TFN) têm sido aplicados para descrever a relação dinâmica entre a precipitação excedente e os níveis freáticos (Box e Jenkins, 1976; Hipel e McLeod, 1994; Van Geer e Zuur, 1997; Yi e Lee, 2003). Nesse tipo de modelo, o sistema transforma séries de observações de entrada (variáveis explicativas, como precipitação, evapotranspiração potencial) em séries de saída (variável de resposta, no caso níveis freáticos). A relação dinâmica entre a precipitação e os níveis freáticos pode também ser descrita por modelos físico-mecanísticos de fluxo. Entretanto, modelos muito menos complexos como os modelos de função de transferência de ruído são uma opção elegante de modelar esse tipo de fenômeno e geralmente obtêm previsões tão acuradas quanto modelos físico-mecanísticos (Knotters e Bierkens, 2001). O objetivo desse trabalho foi comparar o método para estimativa da evapotranspiração potencial FAO Penman-Monteith (1998) com o método Penman-Monteith (1965) para estabelecer a relação entre o excedente/déficit hídrico e os níveis freáticos observados em um poço localizado em área de recarga do Sistema Aquífero Guarani (SAG), através do modelo PIRFICT (Von Asmuth et al., 2002).

MATERIAL E MÉTODOS: A coleta dos dados climatológicos ocorreu na estação do CRHEA/EESC/USP, no município de Itirapina/SP, localizada na latitude 22°10'13,2" S e longitude 47°53'56,1" O e a uma altura de 733m acima do nível do mar. A vegetação predominante na região era o cerrado, com manchas de mata galeria nos solos mais úmidos. Atualmente, predominam reflorestamento e áreas de agricultura intensiva, principalmente com cana-de-açúcar e citros. Atuam na região massas de ar equatorial e tropical com períodos seco (maio a outubro) e úmido (novembro a abril). Os dados climatológicos utilizados na estimativa da evapotranspiração (temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento, número de horas de insolação, radiação solar e evaporação do tanque classe A) foram coletados diariamente, assim como o acompanhamento da precipitação.

Neste estudo foram analisados os métodos combinados para estimativa da evapotranspiração potencial de Penman-Monteith (1965) e o método padrão proposto pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação FAO-Penman-Monteith (1998). Os equacionamentos matemáticos são apresentados a seguir. Monteith (1965) apresenta o método conhecido como Penman-Monteith para estimativa da evapotranspiração potencial como:

$$ET_{PM} = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{\Delta(R_n + G) + 0,0864 \rho_a c_p \frac{D}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_d}{r_a}\right)} \right] \quad (1)$$

em que, ET_{PM} é a evapotranspiração de referência por Penman-Monteith (mm.dia^{-1}); λ ($2,5 \text{ MJ.kg}^{-1}$) é o calor latente de evaporação da água; Δ (kPa.K^{-1}) é o gradiente da curva de saturação de vapor d'água como uma função da temperatura do ar; R_n ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) é o saldo de radiação; G ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) é o fluxo vertical de calor no solo; ρ_a (kg.m^{-3}) é a densidade do ar; D (kPa) é o déficit de pressão de vapor d'água; c_p ($1004 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$) é o calor específico do ar; γ (kPa.K^{-1}) é a constante psicrométrica; r_a (s.m^{-1}) é a resistência aerodinâmica; r_d (s.m^{-1}) é a resistência do dossel da planta e 0,0864 é o fator de conversão de (J.s^{-1}) para (MJ.dia^{-1}).

A evapotranspiração pelo método FAO-Penman-Monteith (1998) foi determinada, conforme metodologia apresentada por Allen et al. (1998):

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

em que, ET_{FAO-PM} é a evapotranspiração de referência por FAO-Penman-Monteith (mm.dia^{-1}); Δ ($\text{kPa.}^\circ\text{C}^{-1}$) é o gradiente da curva de saturação de vapor d'água como uma função da temperatura do ar, R_n ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) é o saldo de radiação; G ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) é o fluxo vertical de calor no solo; γ ($\text{kPa.}^\circ\text{C}^{-1}$) é a constante psicrométrica; T é a temperatura diária média a 2m de altura ($^\circ\text{C}$); u_2 é a velocidade média do vento registrada a 2 m de altura, (m.s^{-1}); e_s é a pressão de saturação do vapor d'água, kPa; e_a é a pressão atual do vapor d'água (kPa).

Para estimativa dos níveis freáticos foi utilizada a séries de dados de um poço de monitoramento com frequência quinzenal localizado na bacia experimental do Ribeirão da Onça, Brotas/SP, a aproximadamente 10 km da estação climatológica. O Ribeirão da Onça é um dos formadores do Rio Jacaré-Guaçu, afluente do Rio Tietê pela margem direita, entre os paralelos $22^\circ 10'$ e $22^\circ 15'$ latitude S e entre os meridianos $47^\circ 55'$ e $48^\circ 00'$ longitude O. A região pertence à área de afloramento do Aquífero Guarani e é de extrema importância por devido a sua alta representatividade como possível área de recarga do sistema. A série compreende o período de 02 de março de 2004 a 04 de abril de 2009. Supõe-se que o comportamento de um sistema linear de entrada e saída pode ser completamente caracterizado por sua função de impulso e resposta (IR) (Ziemer et al., 1998; Von Asmuth et al., 2002). Para isso utiliza-se o modelo PIRFICT (Predefined Impulse Response Function In Continuous Time), uma alternativa a modelos de função de transferência de ruído em intervalos de tempo discretos apresentada por Von Asmuth et al. (2002) e aplicada por Manzione (2007) nos Cerrados Brasileiros. No modelo PIRFICT o pulso de entrada é transformado em uma série de saída por uma função de transferência. Assumindo-se linearidade no sistema, uma série de níveis freáticos é uma transformação de uma série de precipitação excedente, descontando a evapotranspiração potencial. Essa transformação é completamente governada pela função IR. Para o caso de um sistema linear simples, sem perturbações, que é influenciado somente pela precipitação excedente/déficit, o modelo a seguir descreve a relação entre níveis freáticos e a precipitação excedente (Von Asmuth et al., 2002):

$$h(t) = h^*(t) + d + r(t) \quad (3)$$

$$h^*(t) = \int_{-\infty}^t p(\tau)\theta(t-\tau)d\tau \quad (4)$$

$$r(t) = \int_{-\infty}^t \phi(t-\tau)dW(\tau) \quad (5)$$

em que $h(t)$ é o nível freático observado no instante t [T]; $h^*(t)$ é o nível freático predito no instante t creditado ao excedente de precipitação relativo a d [L]; d é o nível de $h^*(t)$ sem a influência da precipitação ou, em outras palavras, o nível da drenagem local, relativo à superfície do solo [L]; $r(t)$ é a série dos resíduos [L]; $p(t)$ é a intensidade do excedente de precipitação no instante t [L/T]; $\theta(t)$ é a função de transferência de impulso/resposta (IR) [-]; $\phi(t)$ é a função IR do ruído [-]; e $W(t)$ é um processo de ruído branco contínuo (Wiener) [L], com propriedades $E\{dW(t)\}=0$, $E[\{dW(t)\}^2]=dt$, $E[dW(t_1)dW(t_2)]=0$, $t_1 \neq t_2$.

O nível da drenagem local d é obtido a partir dos dados como se segue:

$$d = \frac{\sum_{i=0}^N h(t_i)}{N} - \frac{\sum_{i=0}^N h^*(t_i)}{N} - \frac{\sum_{i=0}^N r(t_i)}{N} \quad (6)$$

em que N é o número de observações de nível freático.

A área e forma da função IR dependem das condições hidrologias *in situ*. $\theta(t)$ é uma função de distribuição Pearson tipo III (PIII df, Abramowitz e Stegun, 1964). A opção por esse tipo

de função dá-se por sua natureza flexível, ajustando-se a uma grande gama de respostas hidrológicas. Assim, os parâmetros podem ser definidos segundo Von Asmuth et al. (2002):

$$\theta(t) = A \frac{a^n t^{n-1} e^{-at}}{\Gamma(n)} \quad \text{e} \quad \phi(t) = \sqrt{2\alpha\sigma_r^2} e^{-\alpha t} \quad (7)$$

em que A , a , n , são os parâmetros da curva ajustada, $\Gamma(n)$ é a função Gamma, α controla a taxa de decaimento de $\phi(t)$ e σ_r^2 é a variância dos resíduos.

A função PIII df assume formas variando gradualmente de curva exponencial à uma gaussiana, conforme os valores de seus parâmetros. Os parâmetros apresentam sentido físico, como descrito em Von Asmuth e Knotters (2004). O parâmetro A é relacionado com a resistência à drenagem (a área da função IR é igual à razão entre nível freático e a recarga média). O parâmetro a é determinado pelo coeficiente de armazenamento do solo (porosidade) e n pelo tempo de convecção e dispersão da percolação através da zona não saturada. As bases físicas são explicadas por funções de transferência de uma série de reservatórios lineares. O parâmetro n demonstra o número de reservatórios e a é igual ao inverso do coeficiente de reservatório normalmente usado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO: A Figura 1 apresenta as séries de ET_{PM} e ET_{FAO-PM} para o período de 02 de março de 2004 a 04 de abril de 2009. A série estimada ET_{FAO-PM} apresentou maiores valores se comparada a serie ET_{PM} . A variação dessa série no período de monitoramento também mostrou-se mais ruidosa, com mudanças abruptas nos valores em função das variáveis climatológicas. Já ET_{PM} apresentou uma variação mais suave e com menores valores totais.

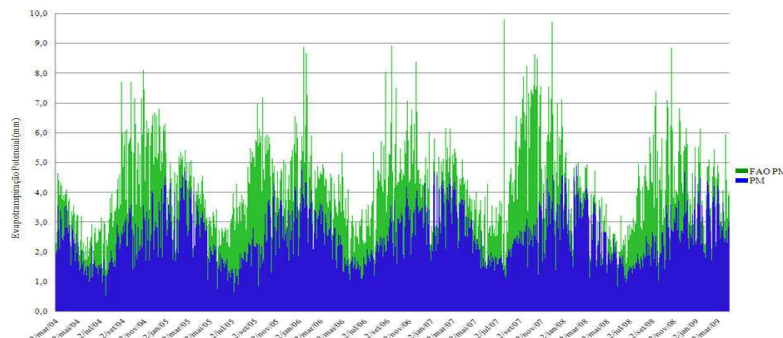


Figura 1 – Séries de ET_{PM} e ET_{FAO-PM} de 02 de março de 2004 a 04 de abril de 2009.

Os resultados da calibração do modelo PIRFICT para os diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial analisados são apresentados na Tabela 1. A série ET_{FAO-PM} apresentou uma boa calibração do modelo, mas os parâmetros da função IR na foram ajustados de maneira adequada, mostrando além de valores não realísticos, altos desvios padrões. Já a série ET_{PM} além de apresentar uma calibração bem próxima de ET_{FAO-PM} , com erros apenas 5 cm maiores (RMSE) e valores realistas dos coeficientes da função IR. O ajuste do modelo PIRFICT as séries observadas de níveis freáticos é apresentada na Figura 2.

Tabela 1 – Resultados da calibração do modelo PIRFICT para as séries de ET_{PM} e ET_{FAO-PM} .

Método	R ²	RMSE	A	a	n	E	α
ET_{PM}	73,28	0,359	1615	0,00576	1,539	1,93	123,87
			(270)	(0,0013)	(0,11)	(0,2)	(16,50)
ET_{FAO-PM}	80,15	0,309	1149000	0,00001	1,193	0,02	123,01
			(13000000)	(0,0001)	(0,03)	(0,2)	(22,04)

R²=percentual da variância explicada pelo modelo; RMSE=raiz do erro quadrático médio (m); A=resistência à drenagem (dias); a=coeficiente de armazenamento no solo (1/dias); n=tempo de convecção/dispersão (dias); E=fator de evapotranspiração (-); α=decaimento(-)

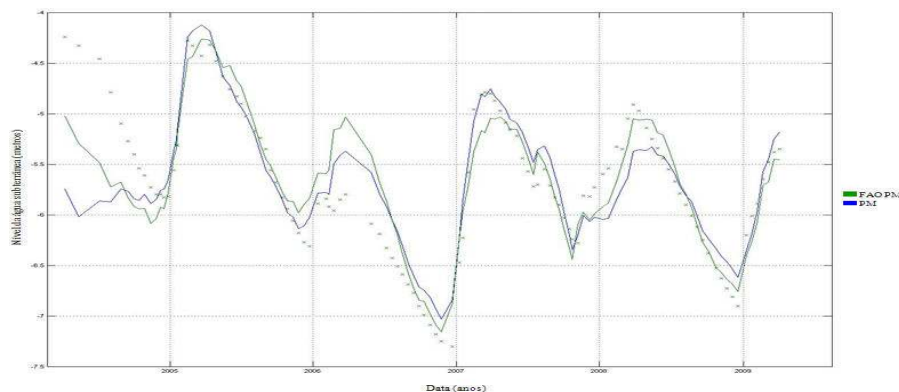


Figura 2 – Níveis freáticos simulados pelo modelo PIRFCT para séries de ET_{PM} e ET_{FAO-PM} .

CONCLUSÕES: Ambos os métodos de estimativa de evapotranspiração potencial utilizados no modelo PIRFICT para calcular níveis freáticos apresentaram bons resultados. O método Penman-Monteith caracterizou melhor a dinâmica do sistema através de funções de IR por apresentar uma estimativa mais suave das variações diárias de evapotranspiração potencial, uma vez que se trata de um sistema aquífero de resposta lenta e memória muito grande.

AGRADECIMENTOS: FAPESP (processo 2009/05204-8) e CNPq (processo 152033/2008-4) pelos auxílios financeiros que viabilizaram o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I. A. Handbook of mathematical functions. New York: Dover Publications Inc, 1964. 1046p.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M. Time series analysis: forecasting and control. 2.ed. San Francisco: Holden-Day, 1976. 575 p.
- HIPEL, K. W.; McLEOD, A. I. Time series modelling of water resources and environmental systems. Amsterdam: Elsevier, 1994. 1013p.
- KNOTTERS, M., BIERKENS, M. F. P. Predicting water table depths in space and time using a regionalised time series model. Geoderma, v.103, p.51–77, 2001.
- MANZIONE, R. L. Regionalized spatio-temporal modeling of water table depths in the Brazilian Cerrado. 2007. 141p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2007.
- MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. In: Symposia of the Society for Experimental Biology, 19, 1965. p. 205-234.
- VAN GEER, F. C.; ZUUR, A. F. An extension of Box-Jenkins transfer/noise models for spatial interpolation of groundwater head series. Journal of Hydrology, v. 192, p. 65-80, 1997.
- VON ASMUTH, J. R.; BIERKENS, M. F. P.; MAAS, C. Transfer function noise modelling in continuous time using predefined impulse response functions. Water Resources Research, v. 38 (12), p. 23.1-23.12, 2002.
- VON ASMUTH, J. R.; KNOTTERS, M. Characterising groundwater dynamics based on a system identification approach. Journal of Hydrology, v. 296, p. 118-34, 2004.
- YI, M.; LEE, K. Transfer function-noise modelling of irregularly observed groundwater heads using precipitation data. Journal of Hydrology, v. 288, p. 272-287, 2003.
- ZIEMER, R. E.; TRANTER, W. H.; FANNIN, D. R. Signals and systems: continuous and discrete. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1998. 622p.