

# CALIBRAÇÃO DE MODELO BASEADO EM PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA MONITORAMENTO DOS NÍVEIS FREÁTICOS DO SISTEMA AQUÍFERO BAURU

BRUNA CAMARGO SOLDERA<sup>1</sup>; RODRIGO LILLA MANZIONE<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Graduanda em Geografia, UNESP/Ourinhos-SP [brusoldera@hotmail.com](mailto:brusoldera@hotmail.com)

<sup>2</sup>Eng. Agrônomo, Prof. Assistente Dr., UNESP/Ourinhos-SP - Av. Vitalina Marcusso, n° 1500, CEP 19910-206, Fone: (14) 3302-5700 [manziona@ourinhos.unesp.br](mailto:manziona@ourinhos.unesp.br).

Apresentado no XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia  
18 a 21 de Julho de 2011 - Sesc Centro de Turismo de Guarapari, Guarapari - ES.

**RESUMO:** Precipitação e evapotranspiração são as principais condicionantes na oscilação natural de níveis freáticos na zona vadosa do solo. Com a demanda crescente por água verificada nas últimas décadas, seja para o abastecimento doméstico ou para a manutenção de atividades industriais e agrícolas, surge a necessidade de se obter água de qualidade e com baixo custo. Esse cenário tem contribuído para a utilização cada vez maior das águas subterrâneas e a modelagem da oscilação de níveis a partir de séries de dados agrometeorológicos se apresenta como uma valiosa ferramenta na estimativa de níveis freáticos. Assim o presente trabalho tem como objetivo aplicação de modelos baseados em observações e em séries temporais, para compreensão dos processos que ocorrem durante o ciclo hidrológico e que afetam a disponibilidade dos recursos hídricos subterrâneos do Sistema Aquífero Bauru (SAB), um dos principais mananciais subterrâneos disponíveis na região do Médio Paranapanema, São Paulo, importante polo agrícola do Estado. O modelo PIRFICT foi calibrado às séries de dados, obtendo-se bons ajustes aos dados de monitoramento dos níveis freáticos na Formação Adamantina do SAB, explicando sua relação com a precipitação e a evapotranspiração.

**PALAVRAS-CHAVE:** séries temporais; balanço hídrico; modelo PIRFICT.

**ABSTRACT:** Rainfall and evapotranspiration are the main driven forces in the natural fluctuation of groundwater levels on the vadoze zone of soil. With the increasing demand for water verified in last decades, whether for domestic supply or for the maintenance of industrial and agricultural activities, arises the necessity of obtain good and cheap water. This scenario has been contributed for the increased use of groundwater, and modelling water table depths from agrometeorological data series presents as a valuable tool in estimating groundwater levels. Therefore, this work aims to apply models based on observations and time series, for understanding the processes that occur during the hydrological cycle and affect the availability of groundwater resources in the Bauru Aquifer System (BAS), one of the major groundwater reservoirs available in the Middle Paranapanema region, São Paulo, an important agricultural hub of the state. The PIRFICT model was calibrated to data series, obtaining good fits for the monitoring data of groundwater levels at the Adamantina Formation of BAS, explaining its relationship with rainfall and evapotranspiration.

**KEYWORDS:** time series; water balance; model PIRFICT.

**INTRODUÇÃO:** A água subterrânea é um meio para a resolução dos problemas relacionados à disponibilidade hídrica, e isso vem ganhando destaque na sociedade

moderna. O uso indiscriminado das águas subterrâneas também pode levar a exaustão de aquíferos. Prever a resposta de um aquífero (em termos de quantidade e qualidade) quanto às atividades de exploração propostas, e em tempo hábil para gerar políticas racionais de exploração em determinada região, é uma questão complicada, devido à complexidade dos processos envolvidos (MANOEL FILHO, 2000). Em áreas onde os níveis de reserva hídrica podem se tornar críticos existe a necessidade que as previsões a respeito sejam seguras, auxiliando assim no suporte a decisão. O objetivo deste trabalho é a aplicação de modelos baseados em observações e em séries temporais para compreensão dos processos que ocorrem durante o ciclo hidrológico e afetam a disponibilidade dos recursos subterrâneos do Sistema Aquífero Bauru (SAB). 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). Em aquíferos afetados por variações sazonais e onde utilização da água é feita de maneira contínua, se faz necessário a utilização de séries climáticas para compreender as oscilações e permitir que o risco associado às estimativas seja mensurado.

**MATERIAIS E MÉTODOS:** Os poços estudados estão localizados nas dependências da APTA (Agência Paulista de Tecnologia no Agronegócio), Polo Médio Paranapanema, no município de Assis/SP, nas coordenadas 22°38'S e 50°23'O. Em virtude do projeto de “Ampliação e modernização da rede de monitoramento hidrológico na região do CBH-MP”, executado pelo CIVAP (Consórcio Intermunicipal do Vale do Paranapanema) foram perfurados 11 poços de monitoramento com verbas do Fundo Estadual de Recursos Hídricos (FEHIDRO). Esses poços são monitorados sistematicamente pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE) desde 2008 e os dados de monitoramento são disponibilizados pelo DAEE e pela APTA. A coleta é realizada em uma frequência semanal desde 31/03/2008 até 28/01/2010. Nesse estudo são utilizados 8 poços de monitoramento. Junto com as séries temporais de oscilação dos níveis freáticos, foram utilizadas séries temporais e precipitação e evapotranspiração potencial coletadas pelo próprio IAC e disponibilizadas através do sistema do Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas CIAGRO online (<http://www.ciiagro.sp.gov.br/ciiagroonline/>) desde 01/07/2002. Os solos no local são, segundo BONGIOVANNI (2008), pertencentes a um grupamento indiferenciado de Latossolo Vermelho Distrófico típico, textura média e Neossolo Quartzarênico Órtico típico, ambos A moderado. Esses solos encontram-se sobre a aloformação Paranaíba, depositada sobre os sedimentos da formação Adamantina, pertencente ao Grupo Bauru. Segundo a classificação climática de Koppen, Assis/SP encontra-se em uma região de transição entre dois tipos climáticos: Cwa (tropical com a concentração de chuvas no verão, que é rigoroso – temperatura média do mês mais quente superior a 22 °C) e Cfa (tropical, sem estação seca). A pluviosidade média anual é maior que 1.400 mm/ano, com concentração de chuvas entre os meses de novembro e abril (BOIN et al., 2002, citado por BONGIOVANNI, 2008). Entre junho e setembro, chove apenas 15% do total anual, época em que os solos se tornam deficitários em água e os rios têm seus níveis mais baixos. Assim sendo esses fatores contribuem para a recarga do aquífero e consequentemente para a variação de seus níveis freáticos.

Informações sobre a dinâmica do lençol freático são importantes para balancear os interesses econômicos e ecológicos quanto ao uso do solo e da água (VON ASMUTH & 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 as alturas de lençol freático (BOX & JENKINS, 1976; HIPEL & McLEOD, 1994; TANKERSLEY & GRAHAM, 1994; VAN GEER & ZUUR, 1997; YI & LEE, 2003). O sistema transforma séries de observações de entrada (variáveis explicativas) em séries de saída (variável de resposta, no caso alturas de lençol freático). Para alturas de lençol freático, a relação dinâmica entre a precipitação e as alturas do lençol podem também ser descritas por modelos físico-mecanísticos de fluxo. 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 descrito em VON ASMUTH et al. (2002) e aplicada por MANZIONE et al. (2009, 2010) em aquíferos livres no Brasil. Segundo os autores o sistema de água subterrânea reage de forma diferente a determinada situação as quais são submetidas, entretanto pode-se dizer que há casos em que diferentes tipos de perturbações no sistema, como evapotranspiração e precipitação, irão promover respostas semelhantes. 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, semelhante a um balanço hídrico. 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 excedente (VON ASMUTH et al., 2002). MANZIONE (2007) complementa que a resposta da função de impulso (IR) descreve o modo que o lençol freático responde a um impulso de precipitação, sendo que a forma e o espaço da resposta da função de impulso depende das circunstâncias hidrológicas locais.

**RESULTADOS E DISCUSSÕES:** O modelo PIRFICT foi calibrado para todas as séries de observação dos níveis freáticos, usando as séries históricas de precipitação e evapotranspiração como variáveis de entrada. A Figura 1 traz um exemplo da calibração do modelo para o poço de monitoramento 1.

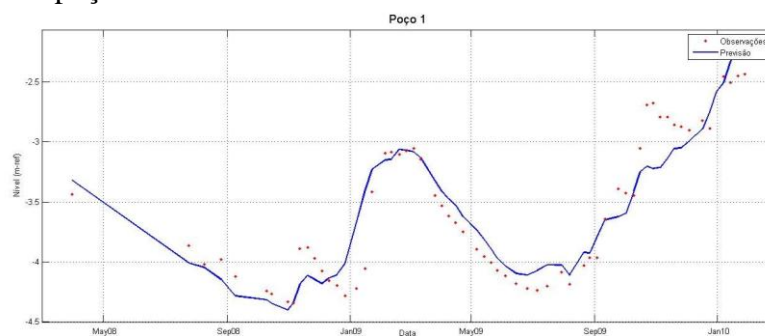


Figura 1: Modelo PIRFICT ajustados (linha) aos dados de observações de alturas de lençol freático (pontos) no poço de monitoramento 1.

As estatísticas correspondentes às calibrações do modelo podem ser vistas na Tabela 1. Os parâmetros estimados pelo modelo PIRFICT e seus desvios padrões podem ser observados na Tabela 2. O modelo PIRFICT se ajustou bem aos dados observados, com uma porcentagem da variância explicada pelo modelo superior a 90% na média, assim pode-se visualizar na Figura 1 os modelos calibrados às observações do Poço 1. Os erros estimados (RMSE e RMSI) foram baixos, inferiores a 20 cm. Os parâmetros mostraram-se similares, devido ao comportamento semelhante dos poços que estão localizados próximos uns dos outros.

Tabela 1: Estatísticas da calibração do modelo PIRFICT às séries temporais de alturas de lençol freático observadas no período de 31/03/2008 a 28/01/2010.

POÇOS	EVP (%)	RMSE (m)	RMSI (m)
1	92,78	0,163	0,135
2	92,21	0,168	0,141
3	91,35	0,181	0,151
6	89,79	0,198	0,148
7	92,23	0,171	0,146
8	91,40	0,184	0,149
9	91,91	0,174	0,146
10	91,10	0,171	0,118

EVP=percentual da variância explicada pelo modelo; RMSE=raiz do erro quadrático médio; RMSI=raiz das inovações quadráticas médias.

Tabela 2: Parâmetros estimados a partir da calibração do modelo PIRFICT e seus respectivos desvios padrões.

POÇOS	A	$a$	$n$	E	$\alpha$
1	725,6 (64)	0,01450 (0,0024)	1,650 (0,14)	0,84 (0,080)	13,06 (3,95)
2	738,1 (69)	0,01401 (0,0024)	1,641 (0,14)	0,84 (0,084)	12,16 (3,67)
3	711,2 (70)	0,01440 (0,0026)	1,624 (0,15)	0,78 (0,093)	12,10 (3,81)
6	721,9 (73)	0,01542 (0,0029)	1,699 (0,17)	0,89 (0,092)	12,95 (3,97)
7	726,4 (66)	0,01468 (0,0025)	1,653 (0,14)	0,84 (0,083)	11,76 (3,62)
8	679,7 (63)	0,01642 (0,0029)	1,722 (0,17)	0,82 (0,090)	12,05 (3,72)
9	753,8 (73)	0,01375 (0,0024)	1,625 (0,14)	0,84 (0,086)	12,26 (3,69)
10	738,8 (62)	0,02214 (0,0034)	2,669 (0,27)	1,00 (0,075)	39,84 (15,35)

A=resistência a drenagem (metros); DP=desvio padrão;  $a$ =coeficiente de armazenamento no solo (1/dias);  $n$ =tempo de convecção/dispersão (dias); E=fator de correção da evapotranspiração (-);  $\alpha$ =ruído branco.

Os parâmetros são dependentes da forma da função de impulso e resposta que descreve o fenômeno. Ao visualizarmos o parâmetro A que é um indicativo da resistência à drenagem (ou condutividade hidráulica) que o meio poroso exerce sobre a frente de molhamento da zona vadosa e da zona não saturada até a resposta do aquífero, observamos que apresentou valores em torno de 700 dias, e podem ser interpretados como o tempo que a água demora a atingir a zona saturada e exercer alguma reação nos níveis. Devido à natureza empírica das funções de impulso e resposta utilizadas na calibração desses modelos, deve-se tomar cuidados para interpretar seus parâmetros (VON ASMUTH & KNOTTERS, 2004). Os demais parâmetros também apresentaram valores semelhantes. O poço 10 por ser mais profundo apresentou valores de  $n$  (tempo de convecção/dispersão) maiores, já que o meio poroso a ser atravessado é maior, e conseqüentemente um ruído ( $\alpha$ ) também mais elevado. MANZIONE et al. (2009) apresentam um estudo comparando dois poços distantes 10 metros um do outro mas em profundidades diferentes, em uma área de recarga do Sistema Aquífero Guarani, concluindo que os parâmetros do modelo são fortemente influenciados pela espessura do meio poroso a ser atravessado pela água para que haja alguma resposta do aquífero. O parâmetro E, segundo VON ASMUTH et al. (2002) não deve ser maior que 3, ratificando o bom desempenho do modelo nas áreas de monitoramento do SAB na Formação Adamantina. Quanto aos desvios padrões dos parâmetros estimados, pode-se dizer que com exceção ao poço 5, os demais poços apresentam dispersões semelhantes em torno da média estimada pelo processo estocástico. As séries climáticas utilizadas como dados de entrada do modelo que explica a oscilação dos níveis freáticos foram eficazes na caracterização da resposta do SAB na área de estudo, sendo importantes ferramentas para o monitoramento de variáveis agro-ambientais.

**CONCLUSOES:** Pode-se concluir que as análises estatísticas exploratórias permitiram o conhecimento dos conjuntos de dados de cada variável envolvida no estudo e que o modelo PIRFICT realizou um bom ajuste aos dados de monitoramento dos níveis freáticos na Formação Adamantina do Sistema Aquífero Bauru, fornecendo informações a respeito de sua dinâmica e relações com as forças climáticas que interferem nas oscilações dos níveis.

**AGRADECIMENTOS:** À FAPESP (processo # 2010/07516-4) pelo auxílio financeiro que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho, ao FEHIDRO pelo suporte financeiro na perfuração dos poços e, ao CIVAP, ao DAEE-SP sede Marília e à APTA – Pólo Médio Paranapanema, pelo compartilhamento dos dados.

## REFERÊNCIAS

- BONGIOVANNI, S. **Caracterização geológica do município de Assis:** a importância do estudo das coberturas cenozóicas. 2008. 218 f. Tese (Doutorado em Geologia Regional) Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, 2008.
- BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M. **Time series analysis:** forecasting and control. 2.ed. San Francisco: Holden-Day, 1976. 575 p.
- Heuvelink, G. B. M.; Pebesma, E. J. The aggregation problems in environmental models. **Geoderma**, v.89, p.47-65, 1999.
- HIPPEL, K. W.; McLEOD, A. I. Time series modelling of water resources and environmental systems. Elsevier, Amsterdam, 1994. 1013 p.
- MANOEL FILHO, J. Água subterrânea: história e importância. In: **Hidrogeologia:** Conceitos e aplicações. Org. por Feitosa, F.A.C. e Manoel Filho, J., CPRM/REFO-UFPE, Fortaleza-CE, 2000. p. 3-12.
- MANZIONE, R. L. **Regionalized spatio-temporal modeling of water table depths in the Brazilian Cerrado.** 2007. 141 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2007.
- MANZIONE, R. L.; MARCUZZO, F. F. N.; WENDLAND, E. C. Séries de evapotranspiração potencial para estimativas de níveis freáticos em área de recarga do Aquífero Guarani. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 16, 2009, Belo Horizonte. **Mudanças climáticas, recursos hídricos e energia para uma agricultura sustentável.** Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2009. p. 40.
- MANZIONE, R. L.; KNOTTERS, M.; HEUVELINK, G. B. M.; VON ASMUTH, J. R.; CAMARA, G. Transfer function-noise modeling and spatial interpolation to evaluate the risk of extreme (shallow) water-table levels in the Brazilian Cerrados. **Hydrogeology Journal**, v.18, 2010. p. 1927-1938.
- MANOEL FILHO, J. **Hidrogeologia:** Conceitos e aplicações. CPRM/REFO-UFPE, Fortaleza, 2000. p. 341-67.
- 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, 1997. p. 65-80.
- 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), 2002. p. 23.1-23.12.
- VON ASMUTH, J. R.; KNOTTERS, M. Characterising groundwater dynamics based on a system identification approach. **Journal of Hydrology**, v. 296, 2004. p. 118-34.
- YI, M.; LEE, K. (2003). Transfer function-noise modelling of irregularly observed groundwater heads using precipitation data. **Journal of Hydrology**, v. 288, 2003. p. 272-287.