

Modelagem de séries temporais para o monitoramento de água no solo sob diferentes cultivos florestais do Sistema Aquífero Bauru (SAB) em área de preservação no município de Assis/SP ⁽¹⁾.

Aira Nava ⁽²⁾; Rodrigo Lilla Manzione ⁽³⁾

⁽¹⁾ Trabalho executado com recursos fornecidos pela FAPESP referente ao processo nº #2012/08834-5.

⁽²⁾ Estudante em Geografia; Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"; Ourinhos, São Paulo; aira_nv@ymail.com.

⁽³⁾ Professor/Doutor em Sensoriamento Remoto; Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"; Ourinhos, São Paulo; manzione@ourinhos.unesp.br.

RESUMO: O monitoramento das águas subterrâneas é uma ferramenta fundamental para o planejamento dos recursos hídricos. A maneira como os níveis freáticos respondem aos eventos de precipitação que regem as recargas subterrâneas variam em função do tipo, uso, manejo e do solo. Assim, com o objetivo de compreender a dinâmica das águas subterrâneas no solo e sua relação com a vegetação, realizou-se uma investigação em parcelas reflorestadas com diferentes espécies florestais associados à parâmetros físicos do solo na Estação Ecológica de Assis/SP. Foi utilizado um modelo de séries temporais com parâmetros fisicamente embasados, aplicado a séries de monitoramento de nível freático em oito piezômetros. Os parâmetros calibrados foram verificados a partir dos dados de granulometria e textura, obtidos a partir de 16 amostras de solo de 0-20 e 20-40 cm de profundidade. Os resultados demonstraram que as respostas do lençol freático são mais rápidas nas áreas mais arenosas e nas proximidades do Ribeirão do Barro Preto que faz limite com a parcela.

Termos de indexação: infiltração; correlação; modelo PIRFICT.

INTRODUÇÃO

A infiltração da água no solo é o fenômeno que permite a recarga das águas subterrâneas. As águas provenientes da precipitação que penetram no terreno ou escoam superficialmente "[...] podem se infiltrar no solo sob o efeito da gravidade ou capilaridade, passando a formar a fase subterrânea do ciclo hidrológico" (Garcez & Alvarez, 1988). Tal mecanismo ocorre em função das características do material de origem do solo, do relevo e dos obstáculos ao escoamento superficial, como o tipo de vegetação presente e suas relações no sistema solo-planta-atmosfera.

Neste sentido, de acordo com Pazzetto (2009), um dos parâmetros que mais influencia nas características de fluxo das águas subterrâneas é a permeabilidade. O grau de saturação, porosidade, a

granulometria e a forma dos grãos que arranjam no solo afetam diretamente a permeabilidade. Solos argilosos, por exemplo, apresentam uma porosidade total maior que os arenosos, porém os primeiros possuem um número elevado de pequenos poros, que contribuem para uma elevada capacidade de retenção da água e baixa permeabilidade. Os solos arenosos por sua vez, apresentam grandes poros, os quais conferem ao solo uma baixa capacidade de retenção e uma permeabilidade alta (Grohmann, 1960). Tem-se, também, que efeito da compactação do solo e seu grau de agregação atuam direto na infiltração do solo e, conseqüentemente na recarga do aquífero. O tempo que a água leva para atingir a zona saturada é determinado pela maior ou menor obstrução física do solo (Klein et al., 1998).

O presente trabalho teve como objetivo compreender a dinâmica da água no solo e a sua influencia nos níveis freáticos do Sistema Aquífero Bauru (SAB) em oito poços de monitoramento em área de preservação do município de Assis/SP. Foram considerados os parâmetros apresentados pelo modelo PIRFIC com base na calibração dos dados de oscilação dos níveis freáticos do SAB, com séries diárias de precipitação e evapotranspiração, e dados de textura e granulometria amostrados ao redor dos piezômetros.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O município de Assis/SP está situado, geograficamente, entre as coordenadas 22° 40' S e 50° 25' W. Segundo a classificação climática de Köppen, encontra-se em uma região de transição entre dois tipos climáticos: Cwa (tropical com a concentração de chuvas no verão, com temperatura média do mês mais quente superior a 22 °C) e Cfa (tropical, sem estação seca). A pluviosidade média anual é maior que 1400 mm/ano, com concentração de chuvas entre os meses de novembro e abril.

A área de estudo foi uma parcela de recomposição de mata ciliar no Ribeirão do Barro Preto, pertencente à microbacia do Ribeirão do

Cervo, utilizando diferentes espécies florestais. A área faz parte da Floresta Estadual de Assis, administrada pelo Instituto Florestal (IF). A parcela de aproximadamente 5000 m² foi dividida em quatro partes com sua recomposição sendo feita por *Pinus* (*Pinus sp.*), *Tapirira* (*Tapirira sp.*), *Angico-do-cerrado* (*Anadenanthera falcata*) e uma mistura de espécies nativas. Em cada uma dessas parcelas estão instalados dois piezômetros, um a 5 metros do curso d'água e outro 10 metros a montante deste, sendo dois por parcela, num total de 8 poços de monitoramento.

Modelagem dos dados

Os dados de monitoramento foram ajustados segundo 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 por uma função de impulso e resposta (IR). Para o caso de um sistema linear simples, sem perturbações, que é influenciado somente pela precipitação excedente/déficit, pode-se assumir a seguinte formulação (Von Asmuth et al., 2002):

$$h(t) = h^*(t) + d + r(t) \quad (1)$$

$$h^*(t) = \int_{-\infty}^t p(\tau)\theta(t-\tau)d\tau \quad (2)$$

$$r(t) = \int_{-\infty}^t \phi(t-\tau)dW(\tau) \quad (3)$$

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:

$$d = \frac{\sum_{i=0}^N h(t_i)}{N} - \frac{\sum_{i=0}^N h^*(t_i)}{N} - \frac{\sum_{i=0}^N r(t_i)}{N} \quad (4)$$

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):

$$\theta(t) = A \frac{a^n t^{n-1} e^{-at}}{\Gamma(n)} \quad (5)$$

$$\phi(t) = \sqrt{2\alpha\sigma_r^2} e^{-\alpha t}$$

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.

Os parâmetros podem apresentar sentido físico, como descrito em Von Asmuth & 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.

O modelo PIRFICT foi calibrado para séries de observação dos níveis freáticos de março de 2008 a dezembro de 2012. Os níveis foram observados com uma frequência semanal. Também foram utilizadas na calibração séries diárias de precipitação e evapotranspiração disponíveis para o mesmo período pelo CIIAGRO (<http://www.ciiagro.sp.gov.br/>). Para entender os parâmetros dos modelos calibrados em função das características do solo realizou-se a coleta de 16 amostras de solo, sendo duas por piezômetro (0-20 e 20-40 cm). As amostras foram analisadas quanto aos teores de areia, silte e argila e fracionamento da areia segundo (EMBRAPA, 1997). Para facilitar a análise, têm-se que as indicações "A" designam as áreas à montante e "B" as áreas a jusante ou próximas ao curso d'água. Para a elaboração das tabelas, calculou-se a média entre as profundidades. Nesse estudo, as análises dos dados e do modelo PIRFICT foram realizadas utilizando os softwares

Menyanthes para calibração do modelo PIRFICT e planilha eletrônica para organização dos dados e análise da correlação linear.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises texturais podem ser vistos na **Tabela 1** e os do fracionamento da areia na **Tabela 2**. Observa-se que, em todos os pontos de coleta das parcelas estudadas, há predominância de solos arenosos e uma maior porcentagem de partículas de areia variando de médias a muito finas.

Tabela 1 – Resultado da análise textural.

ID	Areia*	Silte*	Argila*
Angico A	759,5	175,5	65,0
Angico B	818,5	151,0	30,5
Pinus A	805,0	155,5	39,5
Pinus B	827,0	151,5	21,5
Tapirira A	825,0	153,5	21,5
Tapirira B	807,0	150,5	42,5
Misto A	789,5	165,5	45,0
Misto B	805,0	139,0	56,0

*(g.kg⁻¹)

Tabela 2 – Resultado do fracionamento da areia*.

ID	MG	G	M	F	MF
Angico A	0,3	3,8	35,2	41,7	18,9
Angico B	0,3	3,4	38,2	40,8	17,4
Pinus A	0,4	3,2	33,8	42,2	20,4
Pinus B	1,2	5,1	38,0	39,2	16,5
Tapirira A	0,4	2,9	31,6	43,4	21,7
Tapirira B	0,5	4,1	36,1	39,7	19,6
Misto A	0,2	3,6	36,2	39,3	20,7
Misto B	0,3	4,4	38,8	39,3	17,3

*MG: areia muito grossa; G: areia grossa; M: areia média; F: areia fina; MF: areia muito fina. Unidade: %

Na **Tabela 3** pode-se visualizar as calibrações geradas pelo modelo PIRFICT, realizadas com base nas medições dos níveis freáticos e dos dados de precipitação e evapotranspiração. Percebe-se, por meio da variância explicada pelo modelo (EVP), que os ajustes foram bons entre 80,1% e 84,1%, com erros menores que 10 cm, exceto para o plantio misto em áreas mais elevadas. Além do nível médio de drenagem (LDB), é possível visualizar, ainda, o tempo em que a água leva para percorrer a coluna de solo e gerar alguma resposta nos níveis (A) e a porosidade relativa (a).

Tabela 3 – Parâmetros estimados a partir da calibração do modelo PIRFICT.

ID	EVP	RMSE	LDB	A	a
Angico A	82,35	0,075	-2,252	206,7	0,004
Angico B	83,7	0,065	-1,411	174,6	0,004
Pinus A	80,06	0,079	-2,415	151,2	0,011
Pinus B	84,08	0,065	-1,383	173,4	0,005
Tapirira A	80,1	0,086	-1,962	179,3	0,006
Tapirira B	82,1	0,074	-1,62	176,7	0,004
Misto A	60,23	0,202	-0,87	100,4	0,004
Misto B	83,66	0,069	-1,36	179,8	0,005

EVP: percentual da variância explicada pelo modelo; RMSE: raiz do erro quadrático médio; LDB: nível médio do lençol; A: resistência à drenagem (dias); a: porosidade (1/dias).

As **Figuras 1** e **2** mostram a correlação entre a resistência a drenagem (A) e a quantidade de areia e argila, respectivamente, dos pontos amostrais. Nota-se que quanto maior o teor de areia, menor a resistência à infiltração. Assim como, quanto maior o teor de argila, maior a resistência.

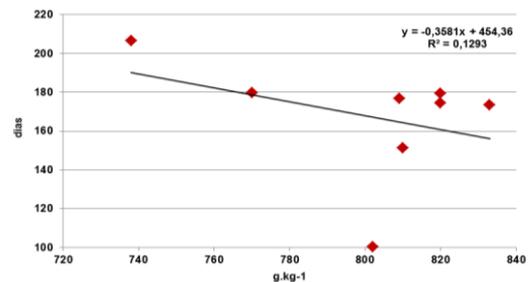


Figura 1 - Correlação entre os teores de areia e a resistência à drenagem.

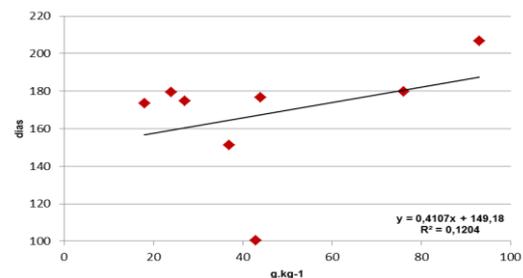


Figura 2 – Correlação entre os teores de argila e a resistência à drenagem.

As **Figuras 3** e **4** mostram a correlação entre os teores de areia e de argila, respectivamente, e a porosidade. Assim como nas figuras anteriores, o coeficiente de determinação da reta apresentou valores baixos pelo pequeno número de pontos. De qualquer forma, percebe-se que nas áreas com maior teor de areia, a presença de macroporos faz com que a resistência a drenagem seja menor enquanto que a microporosidade das áreas mais argilosas faz com que a velocidade de infiltração da água no solo seja menor.

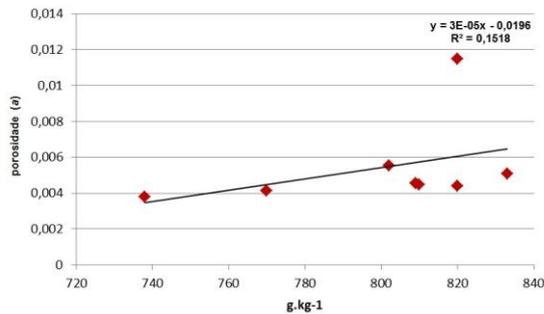


Figura 3 - Correlação entre os teores de areia e a porosidade.

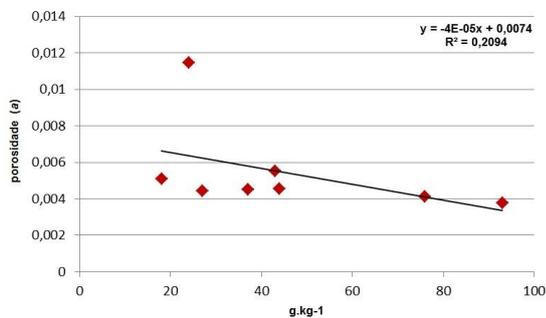


Figura 4 - Correlação entre os teores de argila e a porosidade.

Em trabalhos sobre dinâmicas freáticas do SAB, Soldera & Mazione (2012) encontraram comportamentos semelhantes em poços da formação Adamantina, mesma presente na área de estudo. Os resultados permitem relacionar as variações climáticas e as características hidrogeológicas locais, auxiliando na tomada de decisão em processos relativos ao uso e ocupação do solo.

CONCLUSÕES

Áreas onde o solo apresenta maiores teores de areia demonstram uma resposta mais rápida à infiltração da água.

Solos com textura arenosa demonstraram a importância dos macroporos para os reservatórios de água.

Apesar de o solo ser um componente importante para a compreensão das dinâmicas dos níveis freáticos, deve-se considerar mais variáveis para uma melhor avaliação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP pelos recursos fornecidos ao processo #2012/08834-5 e à Estação Ecológica de Assis, pelo fornecimento dos dados.

REFERÊNCIAS

ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I. A. Handbook of mathematical functions. New York: Dover Publications Inc, 1964. 1046p.

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, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2008.

EMBRAPA. Manual de métodos de análise do solo. Rio de Janeiro: CNPS, 1997. 212p. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Manual+de+Metodos_000fzvhotqk02wx50k0q43a0ram31wtr.pdf. Acesso em mar.2013.

GARCEZ, L. N.; ALVAREZ, G. A. Hidrologia. 2ª edição, São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1988. 291 p.

GROHMANN, F. Distribuição e tamanho de poros em três tipos de solo do Estado de São Paulo. Bragantia: Boletim Técnico do Instituto Agrônomo do Estado de São Paulo. v.19, n.21, 1960, p. 319 – 328.

IF – Instituto Florestal. Plano de Manejo: Estação Ecológica de Assis (SP). São Paulo: IF, 2010. 171 p. Disponível em: http://www.iflorestal.sp.gov.br/Plano_de_manejo/EEc_Assis/Plano_de_Manejo_EEc_Assis.pdf. Acesso em abr. 2013.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. et al. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.18, n.2, p. 45-54,1998.

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.

PAZZETTO, M. B. Estudo da permeabilidade de solos argilosos disponíveis para a recuperação de áreas degradadas pela mineração de carvão no sul de Santa Catarina. 2009. 98f. Trabalho de Conclusão de Curso Engenharia Civil– UNESC, Criciúma.

SOLDERA, B.; MANZIONE, R.L. Modelagem dos níveis freáticos no sistema aquífero Bauru como ferramenta na gestão de recursos hídricos subterrâneos. Ciência Geográfica, XVI:- 54-62, 2012,

VON ASMUTH, J. R.; BIERKENS, M. F. P. et al. 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.