

XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

MONITORAMENTO DE NÍVEIS FREÁTICOS E INTERAÇÕES COM CLIMA E VEGETAÇÃO EM ÁREA CULTIVADA COM PINUS NA ESTAÇÃO ECOLÓGICA DE ÁGUA DE SANTA BÁRBARA/SP

Rodrigo Lilla Manzione¹ & Rita de Cássia Ferreira da Silva²

Resumo – Modelos hidrológicos são ferramentas importantes no processo de tomada de decisão quanto à disponibilidade e demanda hídrica e avaliação da capacidade suporte das terras em sistemas agrícolas e florestais. O monitoramento da relação oferta e demanda da água em regiões vulneráveis e de interesse estratégico é necessário para que sejam equilibrados os interesses econômicos e ecológicos das atividades desenvolvidas nessas áreas. Porém, para entender a relação entre recursos hídricos superficiais e subterrâneos, e sua dinâmica em função das variações sazonais do clima, estudos detalhados em bacias hidrográficas representativas tem que ser desenvolvidos para fornecer informações e suporte ao planejamento do uso da terra. O objetivo desse trabalho foi analisar dados de monitoramento de nível freático em área com cultivo de Pinus na Estação Ecológica de Águas de Santa Barbara. Foi utilizado um modelo autoregressivo de séries temporais para entender as relações entre oscilação do nível, clima e vegetação na bacia do Guarantã, que se encontra em uma área de proteção ambiental inserida nos sedimentos da Formação Adamantina do Grupo Bauru. Os resultados mostraram uma boa correlação entre a precipitação e os níveis freáticos, indicando um atraso de um mês em relação ao evento de chuva e a resposta do nível.

Abstract – Hydrological models are important tools in decision-making processes of water use and land use capacity for agricultural and forest systems. Monitoring the water offer/demand relationship in vulnerable and strategic regions is need to balance agricultural and ecological interests. However, to understand this relationship between surface and groundwater and its dynamics due seasonal climatological variabilities, detailed studies in representative watersheds should be developed to provide information and support land use planning. The aim of this study was analyze water table depths monitoring data in a reforest area with Pinus in the Stanta Barbara Ecological Station using an autoregressive time series model. This model considered climatological inputs as precipitation to

¹Prof. Dr. na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Av. Vitalina Marcusso, 1500, Campus Universitário – Ourinhos/SP. (14) 3302-5700. manzione@ourinhos.unesp.br. ² Mestranda na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – FCA. Rua José Barbosa de Barros, nº 1780, Fazenda Lageado, Botucatu/SP. Telefone: (14)38807100. rita.cfs2@gmail.com.

understand water table oscillation relationship with climate and vegetation in the Guarantã creek watershed, under the sediments of Adamantina formation from Bauru Group. The results demonstrated a good correlation between precipitation and water levels, indicating a delay of one month between precipitation events and water table response.

Palavras-Chave – séries temporais, Aquífero Bauru, *Pinus sp.*

INTRODUÇÃO

A partir da década de 1970, tem-se acentuado o desenvolvimento da exploração das águas subterrâneas no Brasil, estimando-se que no final da década de 90 já existiam cerca de 200.000 poços tubulares ativos, fornecendo águas para diversos fins, sobretudo para o abastecimento urbano. Centenas de núcleos urbanos de porte variado e numerosos polos agroindustriais são supridos prioritariamente por mananciais de águas subterrâneas. A exploração das águas subterrâneas requer atenção, pois, o aumento do uso desse tipo de recurso, pode provocar processos irreversíveis e a escassez de água para sustentar rios e nascentes. Segundo HIRATA et al. (1997), a situação atual da exploração dos aquíferos, é marcada por uma visão imediatista de uso do recurso, prevalecendo o descontrole e a falta de mecanismos legais e normativos.

O uso de modelos de simulação permite análises comparativas para detectar alterações no ciclo hidrológico, a partir desta premissa, é possível gerar cenários de tendências futuras, sem que seja preciso observações em campo, uma vez que os dados utilizados estão disponíveis para livre acesso. São métodos que ajudam a compreender esta dinâmica, pois TUCCI (1998) afirmou que esses modelos são uma representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas e variáveis. A qualidade desse modelo é avaliada pela capacidade em representar melhor a variabilidade espacial do sistema, sujeito as condições também variáveis da entrada, como a precipitação. A grande variação espacial das características naturais e do uso do solo resulta numa grande quantidade de informações a serem transferidas para os modelos, principalmente para os modelos distribuídos, onde são estabelecidas relações entre características físicas e os parâmetros dos modelos (TUCCI, 1998).

A área de estudo é pertence ao Governo do Estado de São Paulo e encontra-se sob responsabilidade do Instituto Florestal de São Paulo, perfazendo partes da Estação Ecológica de Santa Bárbara (EEcSB). A partir desse estudo pretende-se entender a dinâmica dos recursos hídricos subterrâneos da região e sua relação com o uso e ocupação da terra e diferentes demandas hídricas das florestas plantadas, no caso *Pinus*.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da região

O derrame vulcânico continental da Bacia do Paraná é composto, em mais de 90% em volume, por basaltos toleíticos e andesito basáltico, apresentando vesículas e amídalas no topo e na base do derrame. Intercalados aos sucessivos derrames, localmente, há depósitos de arenitos eólicos, formando um sistema intertrapeano (MEAULO, 2004). Cessados os derrames de lava da Formação Serra Geral que marcaram o final dos eventos deposicionais e vulcânicos generalizados na área da bacia do Paraná, observou-se uma tendência geral para o soerguimento epirogênico em toda a Plataforma Sul-Americana, em território brasileiro (CPTI, 1999). A porção norte da bacia, entretanto, comportou-se como área negativa, relativamente aos soerguimentos marginais à zona central da bacia, marcando o início de uma fase de embaciamentos localizados em relação à área da bacia como um todo. Nessa área deprimida acumulou-se o Grupo Bauru, no Cretáceo superior, aparecendo em grande parte do oeste do Estado de São Paulo (CPTI, 1999). Para SUGUIO (1980), o Grupo Bauru abrange as seguintes unidades estratigráficas: Formação Caiuá, Formação Santo Anastácio, Formação Araçatuba, Formação São José do Rio Preto, Formação Uberaba e Formação Marília. Segundo IRITANI & EZAKI (2008), o Grupo Bauru é subdividido em quatro formações: Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina e Marília. Na região em estudo, as unidades litoestratigráficas presentes são constituídas por rochas ígneas (pertencentes à Formação Serra Geral) e rochas sedimentares (da Formação Adamantina e Marília), ambas de idade predominantemente mesozoica. A Formação Adamantina aflora em vasta extensão do oeste paulista, recobrando as unidades pretéritas do Grupo Bauru (Formações Caiuá e Santo Anastácio) e Formação Serra Geral. Em algumas regiões esta formação é recoberta em parte pela Formação Marília e em parte por depósitos cenozóicos. Esta unidade estratigráfica contempla 41,45% de área aflorante no Médio Paranapanema (BONGIOVANNI, 2008). O contato entre a Formação Adamantina e os basaltos da Formação Serra Geral é marcado por discordância erosiva, apresentando algumas vezes delgados níveis de brecha basal. A Figura 1 mostra um detalhe da geologia da área de estudo.

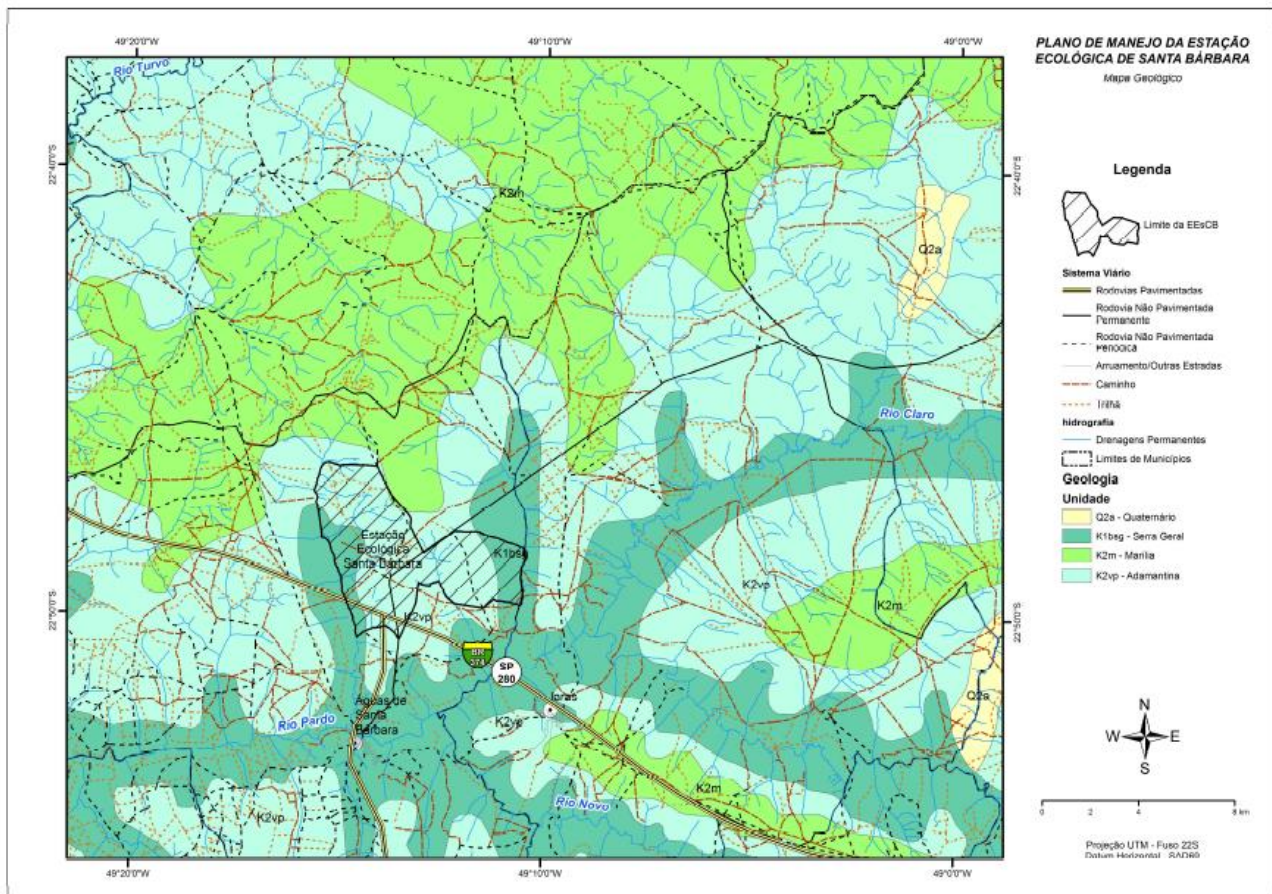


Figura 1 - Geologia da região da Estação Ecológica de Santa Bárbara (Fonte: MELO & DURIGAN, 2009).

Área de Estudo

A Estação Ecológica de Santa Bárbara (EEcoSB) está localizada à Rodovia SP 26 – km 58, latitude 24°48' S e longitude 49°13' O, no município de Águas de Santa Bárbara, possuindo uma área de 2712,00 ha (Figura 2). Sua criação foi regulamentada pelo Dec. 22.337 de 07/06/84. O clima é quente de inverno seco, com temperatura 16°C mês mais frio e 23°C mês mais quente (Cwa). Sua topografia consiste de um relevo de colinas amplas, com altitudes entre 600 e 680 m. Os solos são formados basicamente por Arenitos do grupo Bauru, apresentando Latossolo vermelho amarelo fase arenosa. O ecossistema principal é o Cerrado, citando como exemplos da fauna presente Avifauna, Ofídeos, Jaguaritica, além de espécies em extinção como Lobo-guará, Veado-campeiro, Ema e tamanduá. Na área ocorre a ação de caçadores, cães e redução de ambientes. Já quanto a flora, o Cerrado apresenta diferentes fisionomias (de campo sujo a cerradão) constituindo sua cobertura vegetal. A unidade apresenta vegetação como Cajueiro do campo (*Anacarsium humile*), Jerivá (*Syagrus romanzoffiana*), Pindaíba-preta (*Guatteria nigrescens*), Baripari (*Tontelea microntha*) e Espinheira-santa (*Maytenus aquifolium*) (espécie em extinção), e sofre com a invasão de braquiárias.

Já houveram plantios de Pinus para produção de resina e madeira, hoje erradicados da área mas ainda com a presença de áreas com invasão dessa espécie (MELO & DURIGAN, 2009).

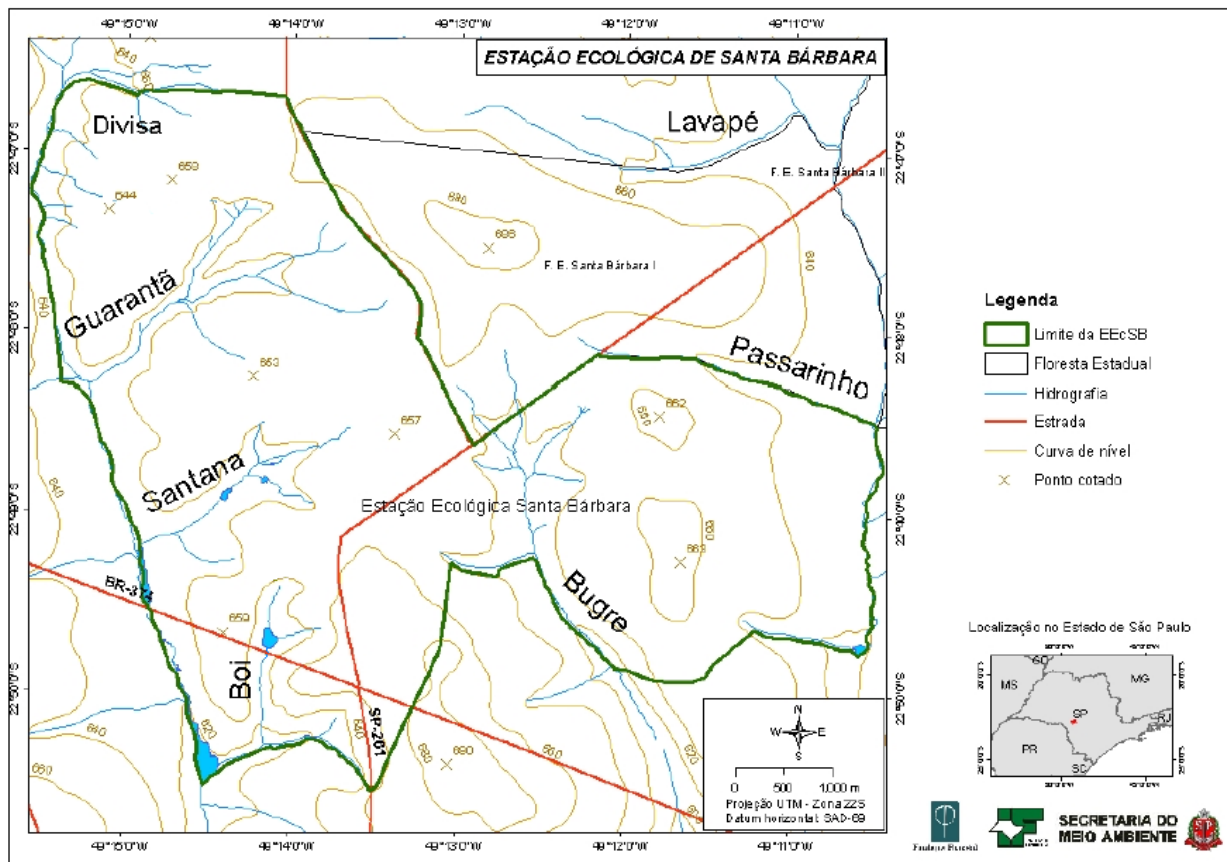


Figura 2 - Limites e hidrografia da Estação Ecológica de Santa Bárbara (Fonte: MELO & DURIGAN, 2009).

A EECoSB é margeada a leste pelo rio Capão Rico e, a oeste, pelo rio Capivari. Ambos os rios nascem fora da Unidade de Conservação e o margeiam, sendo os maiores corpos de água em contato com a EECoSB (HONDA & NIZOLI, 2005). Inúmeros corpos de água nascem no interior dessa unidade de conservação, muitos dos quais secam durante o período de estiagem. Toda a área faz parte da unidade hidrográfica do Pardo, integrante da bacia hidrográfica do Rio Paranapanema (UGRHI-17). A bacia hidrográfica do Guarantã possui vários afluentes, engloba parte do cercado para criação de animais silvestres em sua área e possui plantios de eucalipto e Pinus próximos à nascente. A configuração do terreno com divisores de água de topos aplainados dificulta a identificação dos limites das bacias hidrográficas e cria áreas alagadas próximas aos corpos de água, o que dificulta a quantificação do fluxo de água. A pequena profundidade dos corpos de água também dificulta a quantificação do fluxo e a coleta de amostras de água em vários pontos (HONDA & NIZOLI, 2005).

Dados de monitoramento

Os níveis da água subterrânea foram observados mensalmente em um poço escavado na cabeceira da bacia hidrográfica do Guarantã. O monitoramento dos níveis freáticos teve início em junho de 2011 compondo uma série histórica contínua até agosto de 2013, totalizando dois anos de monitoramento. Próximo ao local encontra-se a Estação Climatológica de Avaré operada pelo pelo Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIAGRO ONLINE – www.ciiagro.sp.gov.br) que forneceu dados referentes a precipitação no período entre setembro de 2004 e setembro de 2013.

Modelagem dos dados

Através da análise estatística de hidrogramas, o modelo autoregressivo de séries temporais implementado através do software HARTT conforme apresentado por FERDOWSIAN et al. (2001, 2002), é capaz de distinguir o efeito das flutuações na precipitação da tendência subjacente do nível de água subterrânea ao longo do tempo. Neste modelo, a precipitação é representada como um acúmulo de desvios da precipitação média, tanto para precipitações excedentes mensais quanto anuais. O que permite a representação da defasagem (*lag*) entre a precipitação e sua perturbação no nível freático (YIHDEGO & WEBB, 2011).

Segundo ALI et al. (2010) modelo HARTT, apresenta-se como uma derivação do método CDFM (Cumulative Deviation from the Mean), o qual se fundamenta no pressuposto de que os desvios acumulados da precipitação média explicam as mudanças nos níveis freáticos dos aquíferos não confinados. Neste método, a precipitação efetiva durante um período definido é subtraída da média de precipitação deste período.

Ambas as formas de resíduos acumulados de precipitação são utilizadas e comparadas por meio de técnicas de regressão múltipla. A primeira é a acumulativa mensal (RAPM; mm):

$$RAPM = \sum_{i=1}^t (M_{i,j} - \bar{M}_j) \quad (1)$$

onde $M_{i,j}$ é a chuva no mês i (i corresponde a um índice sequencial de tempo desde o início do conjunto de dados), o qual representa um mês do ano j^{th} ; \bar{M}_j é a média mensal de precipitação para o mês j^{th} de um ano; e t são os meses desde o início do conjunto de dados.

A variável referente ao resíduo acumulado de precipitação anual (RAPA; mm) tende a ter flutuações relativamente baixas dentro dos anos, pois em seu cálculo as flutuações na precipitação real tendem a ser compensadas pela variação sazonal apresentada pela precipitação média mensal.

$$RAPA = \sum_{i=1}^t (M_i - \bar{A}/12) \quad (2)$$

onde, \bar{A} é a média anual de precipitação. Devido \bar{A} ser uma constante, as flutuações em M_i não são moderadas como em RAPM, fazendo com que RAPA tenha maiores flutuações dentro de ano.

O modelo de regressão usada no HARTT é formulado como:

$$Prof_t = k_0 + k_1 * RAPM_{t-L} + k_2 * t \quad (3)$$

onde, $Prof$ corresponde à profundidade do nível de água abaixo da superfície; t são os meses desde o início das observações; L é a extensão do tempo de atraso (em meses) entre a chuva e seu impacto no lençol freático; e $k_0, k_1, e k_2$ são parâmetros a serem estimados.

Esta abordagem além de se apresentar eficiente para a diferenciação do efeito de uma precipitação atípica da tendência dos níveis freáticos, tem sido empregada no estudo de flutuações subterrâneas causadas por eventos de chuva em períodos selecionados de tempo; de fatores que afetam os níveis de água subterrânea e na estimativa de recarga. Por esse motivo, o modelo pode ser amplamente utilizado para estimar o impacto das alterações climáticas ou intervenção humana, tais como a mudança de uso da terra, nos níveis de águas subterrâneas (FERDOWSIAN & PANNEL, 2001).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Utilizando as séries históricas de precipitação foi possível ajustar o modelo autoregressivo aos dados de observação do período para o poço GP2. A curva ajustada foi obtida através dos parâmetros de Resíduos Acumulados de Precipitação Anual (RAPA; K1) e de tendência temporal (K2), estimada a partir da primeira leitura. A Tabela 1 mostra as estatísticas do modelo de melhor ajuste, segundo análise do coeficiente de determinação a reta de regressão (R^2).

Tabela 1: Estatísticas de calibração do modelo autoregressivo ajustado a série de monitoramento dos níveis freáticos do SAB, entre novembro de 2010 e dezembro de 2013.

Piezômetro	R^2	Atraso (meses)	Intercepto	K1 Precipitação (mm)	p-valor K1	K2 Tempo (meses)	p-valor K2	Taxa de elevação (m/ano)
GP1	0,742	1	-2,549	0,003	0,00007	0,057	0,00000	0,684

R^2 : coeficiente de determinação da reta de regressão, Atraso: ordem do modelo autoregressivo ajustado, P-value: nível significância.

Observa-se um atraso de um mês até que um evento de precipitação gere uma resposta no lençol freático. Este atraso não representa, necessariamente, a defasagem do primeiro ou do maior impacto da precipitação no lençol freático, mas a defasagem que produz a maior correlação estatística. Esta defasagem pode estar relacionada tanto à profundidade na qual a zona saturada se encontra (abaixo de 30m da superfície) quanto à localização do poço de monitoramento, o qual está em meio a uma floresta de Pinus.

O valor de p indica o nível de significância de cada variável. Se os valores não são significativos, não é possível ter certeza das tendências temporais encontradas e do efeito causado pela variável precipitação (YIHDEGO & WEBB, 2011). Os baixos valores estimados pelo modelo mostram que os parâmetros são altamente significativos ($p < 0,01$).

Com base no R^2 , tem-se que a precipitação cumulada é capaz de explicar 74,2% das oscilações dos níveis freáticos. A Figura 2 mostra o modelo autoregressivo de séries temporais ajustado com sete meses de atraso aos dados de oscilação dos níveis freáticos e precipitação do SAB, entre novembro de 2010 e dezembro de 2013

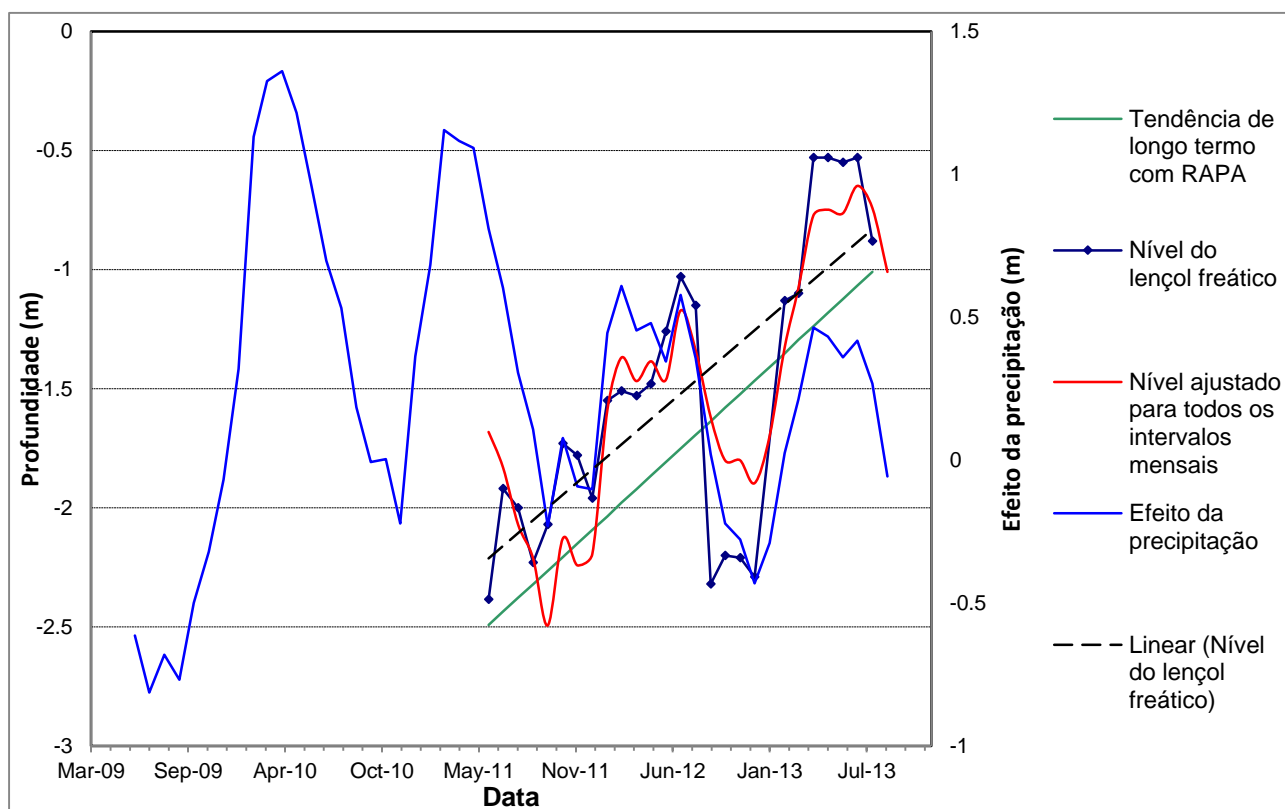


Figura 3 - Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço GP2 no período de junho de 2011 e agosto de 2013.

A partir do ajuste da variável K2 também são obtidas informações sobre rebaixamentos ou elevações sistemáticas no período, possibilitando a separação entre eventos climatológicos atípicos de tendências a longo termo. Neste estudo, nota-se que há uma tendência positiva de elevação dos níveis freáticos a uma taxa estimada de 0,684 m no período de monitoramento. Apesar da presença de uma floresta planta e com uma espécie exótica como o Pinus, a resposta dos níveis aos eventos de precipitação é relativamente rápida, não indicando uma influência significativa da vegetação no período monitorado. Entretanto, para que se possa inferir mais sobre essa dinâmica é necessário que se monitore a área por mais tempo e que sejam comparados períodos secos e úmidos para verificar como o consumo de água pelas arvores interfere nos processos de recarga e produção de água nas nascentes.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados encontrados, concluiu-se que:

1. O modelo ajustado apresentou uma boa performance ao explicar a oscilação dos níveis freáticos em função da precipitação acumulada;
2. A ordem 1 do modelo que melhor se ajustou indica uma interferência adicional no aquífero, que impede uma resposta imediata do lençol à um evento de precipitação;
3. A série de dados apresentou uma tendência positiva de elevação nos níveis freáticos durante o período monitorado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Florestal do Estado de São Paulo e a equipe de monitoramento hidrológico das Unidades de Assis e Santa Barbara pelo compartilhamento dos dados (Processo SMA n. 260108 – 003.211/2014), ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela bolsa de mestrado concedida, e à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio financeiro no desenvolvimento dessa pesquisa (Processo 2014/04524-7). Ressalta-se que as conclusões apresentadas pelos autores não são, necessariamente, as mesmas da FAPESP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALI, R., EMELYANOVA, I.; DAWES, W.; HODGSON, G.; MCFARLANE, D.J.; VARMA, S.; TURNER, J. Groundwater methods used in the South-west western Australia sustainable Yields Project. A report to the Australian Government from the CSIRO South-west Western Australia

Sustainable Yields Project. CSIRO Water for Healthy Country National Research Flagship, 2010. 116p.

BONGIOVANNI, S. Caracterização geológica do município de Assis: a importância do estudo das coberturas cenozóicas. Tese (Doutorado em Geologia Regional) Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 218p. 2008.

CPTI (Cooperativa de Serviços, Pesquisas Tecnológicas e Industriais). Diagnóstico da situação dos Recursos Hídricos da UGRH 17 – Médio – Paranapanema: Relatório Zero. São Paulo, Cooperativa de Serviços, Pesquisas Tecnológicas e Industriais, 1999. CD-ROM.

FERDOWSIAN, R.; PANNELL, D. J. Explaining trends in groundwater depths: distinguishing between atypical rainfall events, time trends, and the impacts of treatments. In: MODSIM 2001 Congress Proceedings, 2001. p. 549-554 (Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand INC).

FERDOWSIAN, R.; PANNELL, D. J.; MCCARRON, C.; RYDER, A. T.; CROSSING, L. Explaining Groundwater Hydrographs: Separating Atypical Rainfall Events from Time Trends. *AJSR*, v. 39, p. 861-875, 2001.

FERDOWSIAN, R.; MAJIDI, R.; MCCARRON, C. HARTT: User-friendly software for hydrograph analysis to separate rainfall and time trend. In: 27th Hydrology and Water Resources Symposium Proceedings, Melbourne, 2002. CD-Rom.

HIRATA, R.; BASTOS, C. R. A; ROCHA, G. A. (Coords.) Mapeamento da vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas no Estado de São Paulo. São Paulo: IG/ CETESB/DAEE, v.1 e 2, 1997.

HONDA, E. A.; NIZOLI, E. C. Caracterização das águas da Estação Ecológica de Águas de Santa Bárbara. Relatório Técnico, Instituto Florestal, 2005. 41p.

IRITANI, M. A.; EZAKI, S. As águas subterrâneas do Estado de São Paulo. São Paulo: Secretaria do Estado do Meio Ambiente, 2008. 104p.

MEAULO, F. Vulnerabilidade natural à poluição dos recursos hídricos subterrâneos da área de Araraquara (SP). Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 108p. 2004.

MELO, A. C. G.; DURIGAN, G. Plano de manejo da Estação Ecológica de Santa Bárbara (Resumo Executivo). São Paulo: Instituto Florestal, 2009. 25p.

SUGUIO, K. Rochas sedimentares: propriedades, gênese e importância econômica. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1980, 500p.

TUCCI, C.E.M. Modelos hidrológicos. Porto Alegre: Ed. Universidade UFRGS, 1998, 680p.

YIHDEGO, Y; WEBB, J.A. Modeling of bore hydrographs to determine the impact of climate and land-use change in a temperate subhumid region of southeastern Australia. *Hydrogeology Journal*, v.19, p.877-887, 2011.