

## XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

### APLICAÇÃO DO MODELO HARTT NO MONITORAMENTO DOS NÍVEIS FREÁTICOS DO SISTEMA AQUÍFERO BAURU.

Aira Nava<sup>1</sup> & Rodrigo Lilla Manzione<sup>2</sup>

**Resumo** – O objetivo deste trabalho foi entender como o efeito da precipitação excedente acumulada ao longo do tempo afeta na disponibilidade hídrica e nas oscilações dos níveis freáticos do Sistema Aquífero Bauru (SAB). Para isto, utilizou-se de um piezômetro instalado na Estação Ecológica de Assis/SP, área de preservação permanente do bioma Cerrado. As relações foram obtidas através de um modelo autoregressivo de séries temporais, o qual é capaz de distinguir o efeito das flutuações na precipitação da tendência subjacente do nível de água subterrânea ao longo do tempo. Os resultados obtidos demonstraram um bom ajuste do modelo às séries de dados ( $R^2=0,75$ ) e variáveis explicativas altamente significativas ( $p<0,01$ ). A defasagem de 7 meses, de melhor ajuste do modelo, representa o atraso até que um evento de precipitação cause interferência de maior relevância nos níveis freáticos. Também foi possível verificar que os níveis do SAB apresentam tendência positiva de elevação a uma taxa estimada de 0,086 m ao ano.

**Abstract** – The aim of this study was to understand how the effect of accumulative residual rainfall affects water availability and fluctuations in groundwater levels of the Bauru Aquifer System over time. For monitoring the groundwater levels, was used a piezometer installed on a permanent preservation area of the Cerrado biome, in Assis/SP-Brazil. An autoregressive time series model was applied to distinguish the effect of fluctuations in the precipitation of underlying trend level of groundwater over time. The results has shown a good fit to the data ( $R^2 = 0.75$ ) and highly significance of explanatory variables ( $p < 0.01$ ) series. Furthermore, was estimated a positive upward trend for the groundwater levels with rates of 0,086 m/year.

**Palavras-Chave** – séries temporais; modelo autoregressivo; precipitação acumulada.

---

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

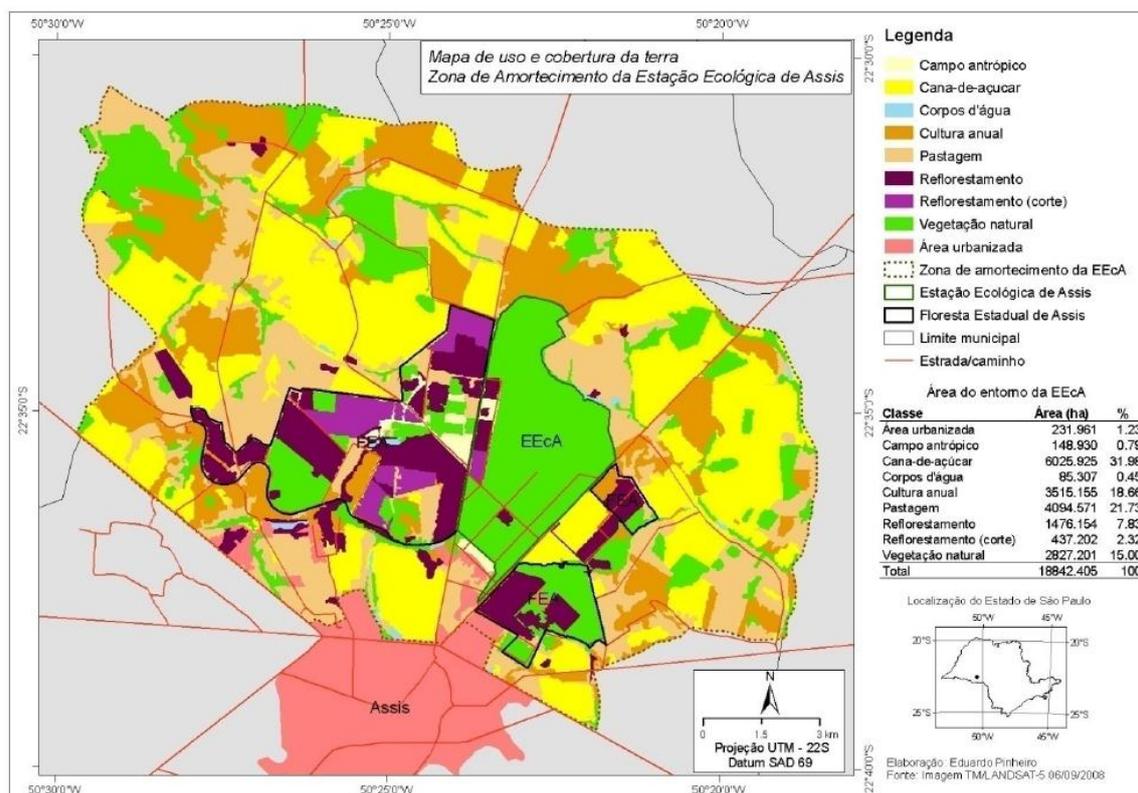
## INTRODUÇÃO

A conversão da paisagem natural para usos agrícolas e urbanos pode afetar o ciclo hidrológico de uma bacia hidrográfica, uma vez que altera variáveis importantes como taxas de interceptação, infiltração e evapotranspiração. Os efeitos produzidos pela substituição da cobertura vegetal afetam o equilíbrio hidrológico, gerando impactos no funcionamento dos ecossistemas. Tais impactos podem comprometer o acesso aos recursos naturais e matérias-primas necessárias para as diversas atividades humanas, como energia elétrica (Baker e Miller, 2013; Noretto et al., 2012).

O monitoramento das águas subterrâneas tem se mostrado uma ferramenta importante para diagnosticar a situação de um aquífero. A aplicação de modelos hidrológicos aos dados de observações dos níveis freáticos permite um maior entendimento sobre os processos e variáveis que influenciam em sua recarga. A avaliação do comportamento do aquífero, principalmente nas áreas de afloramento e recarga direta, fornece dados importantes para sua conservação e subsídios aos projetos de proteção ambiental e desenvolvimento sustentável, assegurando a qualidade e a quantidade do manancial (Soldera e Manzione, 2010; OAS/GEF, 2001).

Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi entender como o efeito da precipitação excedente acumulada ao longo do tempo afeta na disponibilidade hídrica e nas oscilações dos níveis freáticos do Sistema Aquífero Bauru (SAB). Para isto, utilizou-se de um piezômetro instalado na Estação Ecológica de Assis/SP em área de preservação permanente do bioma Cerrado. Os resultados obtidos foram calculados a partir da análise estatística de hidrogramas, através modelo autoregressivo de séries temporais implementado no software HARTT (Hydrograph Analysis: Rainfall and Time Trends).

A escolha do local deve-se ao fato de que em um ecossistema florestal, parte água da precipitação que infiltra permanece armazenada no subsolo ou acumulada no lençol freático, dando origem a nascentes de pequenos rios e suprimindo a necessidade hídrica dos ecossistemas locais. A Estação Ecológica de Assis está inserida em meio a um ambiente bastante modificado, entre diferentes culturas agrícolas e a área urbana (Figura 1), o que torna o local um importante reservatório e um fornecedor de água para a região.



**Figura 1:** Mapa de uso e cobertura da terra no entorno da Estação Ecológica de Assis-SP. **Fonte:** IF, 2010.

O monitoramento de suas águas permite conhecer os elementos e a dinâmica de funcionamento de um ecossistema florestal natural, possibilitando a criação de um plano de ações que minimizem os impactos ambientais (Andrade et al., 2008) e que conciliem a velocidade de extração com as taxas de recarga.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de Estudos

Segundo o CIVAP (2013), o Sistema Aquífero Bauru (SAB) aflora em 60% da área referente à Bacia Hidrográfica do Médio Paranapanema (UGRHI-17). De extensão regional, constitui uma excelente fonte de recursos hídricos para a região e é amplamente utilizado para abastecimento público devido à sua fácil captação, com poços relativamente rasos. Por se caracterizar como um aquífero livre, sua recarga é realizada através da precipitação pluvial. O aquífero funciona como reservatório regulador do escoamento da rede fluvial que tem como base de drenagem os rios Paranapanema, Tietê, Grande e Paraná (IF, 2010).

Os níveis freáticos do SAB foram monitorados através da Estação Ecológica de Assis (EEcA), SP. A área se encontra em uma região de transição entre dois tipos climáticos: Cwa (tropical com concentração de chuvas no verão e temperatura média do mês mais quente superior a

22 °C) e Cfa (tropical, sem estação seca), segundo a classificação de Köppen. Sua pluviosidade média anual é maior que 1.400 mm/ano, com a concentração de chuvas entre os meses de novembro e abril. Sendo que, entre junho e setembro, chove 15% do total anual, época em que os solos se tornam deficitários em água e os rios têm seus níveis mais baixos (Bongiovanni, 2008).

De acordo com o Plano de Manejo da Estação Ecológica de Assis (2010), a EEcA está totalmente inserida na Província Geomorfológica denominada Planalto Ocidental, cujo embasamento é essencialmente constituído por rochas do Grupo Bauru, na grande maioria arenitos, que, por vezes, apresentam cimento carbonático e/ou silicoso. O substrato rochoso, proveniente da Formação Adamantina, é relativamente uniforme e define a textura do solo de arenosa a média.

A EEcA detém 1.760,64 ha (17,61 km<sup>2</sup>), representando 10% das áreas de cerrado protegidas em Unidades de Conservação no Estado de São Paulo. É considerado um local de proteção integral dos recursos naturais, cujo principal objetivo é a preservação da vegetação de cerrado lato sensu, como uma amostra significativa do bioma nos limítrofes da face sul de sua área de domínio.

O local possui em seu interior a nascente do principal manancial da região (ribeirão do Cervo) e concentra todas as sub-bacias que abastecem o reservatório da SABESP de Assis, localizadas total ou parcialmente na Zona de Amortecimento da Unidade de Conservação (UC). Além disso, os corpos de água que compõem a rede de drenagem da Estação Ecológica (Palmitalzinho, Campestre, Xaxim e Pirapitinga) têm suas nascentes no interior da UC. Esses córregos pertencem às unidades hidrográficas Pari e Capivara, integrantes da bacia hidrográfica do Rio Paranapanema (IF, 2010).

### **Dados de monitoramento**

Os níveis foram medidos com a frequência horária, através de um transdutor eletrônico de pressão instalado em um piezômetro no interior da EEcA. Esse poço faz parte da RIMAS (Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas) operada pela CPRM (Serviço Geológico do Brasil). A série de observação do nível das águas subterrâneas cobre o período entre novembro de 2010 e dezembro de 2013. As análises das séries de precipitação tiveram como base os dados disponibilizados pelo Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO ONLINE – [www.ciiagro.sp.gov.br](http://www.ciiagro.sp.gov.br)) da estação meteorológica da APTA (Agência Paulista de Tecnologia no Agronegócio) polo Assis. Para tal, estes dados foram coletados semanalmente e organizados entre os anos de 2003 e 2014.

## 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), 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 e 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  $j^{th}$ ;  $M_j$  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 et al., 2001).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Utilizando as séries históricas de precipitação foi possível ajustar o modelo autoregressivo aos dados de observação do período. A curva ajustada foi obtida através dos parâmetros de Resíduos Acumulados de Precipitação Anual (RAPA; X1) e de tendência temporal (X2), estimada a partir da primeira leitura. A Tabela 1 mostra as estatísticas do modelo de melhor ajuste, segundo análise do coeficiente de determinação da 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.

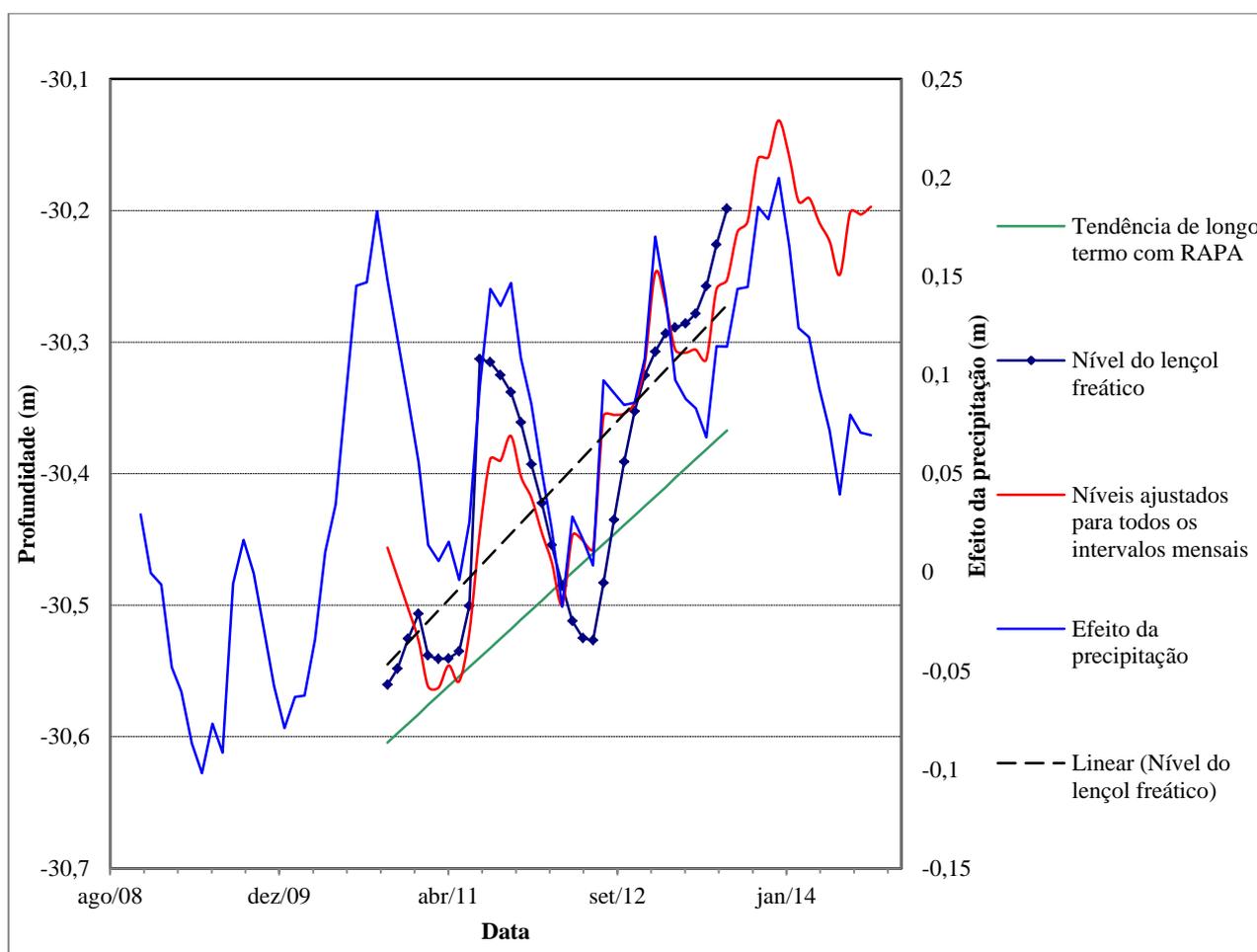
Piezômetro	$R^2$	Atraso (meses)	Intercepto	X1 Precipitação (mm)	p-valor X1	X2 Tempo (meses)	p-valor X2	Taxa de elevação (m/ano)
<i>PI</i>	0,7509	7	-31,6115	0,0004	$2.10^{-5}$	0,0072	$7.10^{-8}$	0,086

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

Observa-se um atraso de sete meses até que um evento de precipitação gere um impacto relevante 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 cerrado mais denso e fechado, conhecido como *Cerradão*.

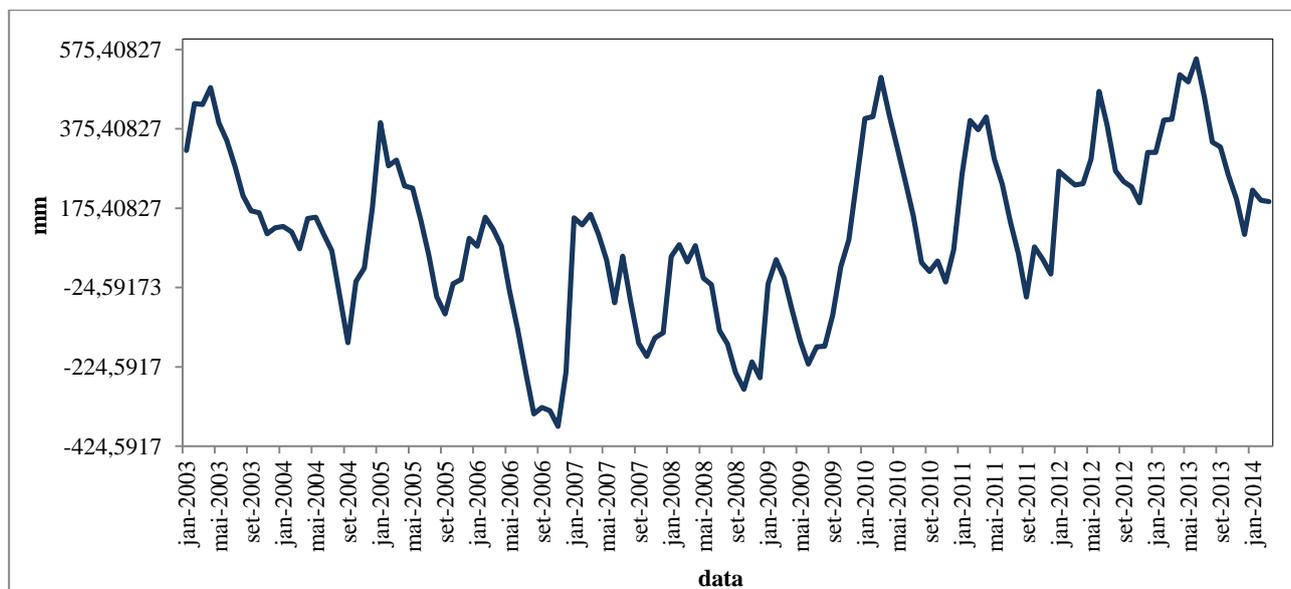
O valor de  $p$  indica o nível de significância de cada variável. Se os valores não são significativos, não é possível ter certeza das tendências temporais encontradas e do efeito causado pela variável precipitação (Yihdego e Webb, 2011). Os valores estimados pelo modelo mostram que os parâmetros são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

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 2:** Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o período de novembro de 2010 e dezembro de 2013.

Com base no  $R^2$ , tem-se que a precipitação acumulada é capaz de explicar 75% das oscilações dos níveis freáticos. Através da Figura 3 é possível observar os resíduos acumulados anuais da precipitação ao tempo. Nota-se que há um aumento em seus valores no decorrer dos anos, o que influencia diretamente na tendência de longo termo da série de observação do freático.



**Figura 3:** Resíduos acumulados anuais da precipitação entre os anos de 2003 e 2014.

A partir do ajuste da variável X2 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 0,086 m ao ano, ou 0,27 m no período de monitoramento.

## CONCLUSÕES

Com base nos resultados encontrados, concluiu-se que:

1. O modelo apresentou altos valores de significância, caracterizando de forma satisfatória a relação entre as oscilações dos níveis freáticos e a precipitação acumulada.
2. A série de dados apresentou uma tendência positiva de elevação nos níveis freáticos durante o período monitorado.
3. O modelo possibilitou estimar parâmetros importantes para a compreensão das dinâmicas do aquífero, tais como, a dependência das oscilações nos níveis ao efeito da precipitação, tendências e taxas de elevação.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Florestal do Estado de São Paulo e a equipe de monitoramento hidrológico da Unidades de Assis pelo apoio nas atividades de campo do projeto (Processo SMA n. 260108 – 006.514/2010). À CPRM (Serviço Geológico do Brasil) pelo compartilhamento dos dados. À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de mestrado concedida.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, N.L.R. et al. Macro-nutrients in the water sheet in Mature Forest, Management Forest and Pasture in the north of Mato Grosso. *Acta Amazônica*, v. 38, p. 667-671, 2008.

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. 116 pp. 2010.

BAKER, T. J.; MILLER, S. N. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed. *Journal Of Hydrology*. v. 481-490, n. 486, p.100-111, 2013.

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.

CIVAP – Consórcio Intermunicipal do Vale do Paranapanema. As águas do Aquífero Bauru no Médio Paranapanema. São Paulo: CBH-MP, 2013. Disponível em: <http://www.civap.com.br/site/?p=documentos>. Acesso em: abr./2014.

Ferdowsian, R.; Pannell, D.; McCarron, C.; Ryder, A.; Crossing, L. Explaining groundwater hydrographs: Separating atypical rainfall events from time trends. *Australian Journal of Soil Research*, v. 39, p.861-875, 2001.

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](http://www.iflorestal.sp.gov.br/Plano_de_manejo/EEc_Assis/Plano_de_Manejo_EEc_Assis.pdf). Acesso em: jan./2014.

NOSETTO, M. D. et al. The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. *Agriculture, Ecosystems And Environment: Ecosystem Services and Land-Use Policy*, v. 151-160, p.2-11, 2012.

OAS/GEF (Organization of American States / Global Environment Facility). Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible Integrado del SAG. Montevideo, 2001. 133 p.

SOLDERA, B. C.; MANZIONE, R. L. Modelagem de níveis freáticos no Sistema Aquífero Bauru como ferramenta na gestão de recursos hídricos subterrâneos. *Ciência geográfica*, v. 16, p. 54 – 61, 2012

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.