

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CÂMPUS DE BOTUCATU

**OSCILAÇÃO DOS NÍVEIS FREÁTICOS DO SISTEMA AQUÍFERO  
BAURU (SAB) EM REGIÃO DE CERRADO NO PERÍODO DE 2010-  
2015**

**RITA DE CÁSSIA FERREIRA DA SILVA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP - Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

BOTUCATU/SP

Dezembro – 2015

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CÂMPUS DE BOTUCATU

**OSCILAÇÃO DOS NÍVEIS FREÁTICOS DO SISTEMA AQUÍFERO  
BAURU (SAB) EM REGIÃO DE CERRADO NO PERÍODO DE 2010-  
2015**

**RITA DE CÁSSIA FERREIRA DA SILVA**

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Lilla Manzione

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências  
Agronômicas da UNESP - Campus de Botucatu, para  
obtenção do título de Mestre em Agronomia  
(Irrigação e Drenagem)

BOTUCATU/SP

Dezembro – 2015

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

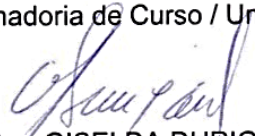
**TÍTULO:** OSCILAÇÃO DOS NÍVEIS FREÁTICOS DO SISTEMA AQUIFERO BAURU (SAB) EM  
REGIÃO DE CERRADO, NO PERÍODO DE 2010 A 2015

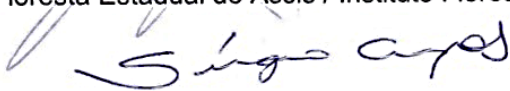
**AUTORA:** RITA DE CASSIA FERREIRA DA SILVA

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. RODRIGO LILLA MANZIONE

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM AGRONOMIA  
(IRRIGAÇÃO E DRENAGEM) , pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. RODRIGO LILLA MANZIONE  
Coordenadoria de Curso / Unidade de Ourinhos

  
Profa. Dra. GISELDA DURIGAN  
Floresta Estadual de Assis / Instituto Florestal de São Paulo

  
Prof. Dr. SÉRGIO CAMPOS  
Departamento de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu

Data da realização: 15 de dezembro de 2015.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço meus pais, minhas irmãs e meu irmão, que sempre estiveram presente nessa jornada, me dando carinho e confiança.

Agradeço ao meu orientador Prof<sup>o</sup> Dr Rodrigo Lilla Manzione, pela oportunidade, por sempre me incentivar e pela dedicação na elaboração deste trabalho.

Aos amigos que conquistei em Botucatu e na UNESP/FCA, sem os quais não teria conseguido desenvolver com tanta alegria e vontade, mais esta etapa de minha vida.

Ao Instituto Florestal de São Paulo, em especial á Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Giselda Durigan e a Dr<sup>a</sup> Eliane Akiko Honda, por compartilhar todos os dados necessários e pelo apoio recebido.

Ao grupo de estudos GEPAG (Grupo de Estudos e Pesquisas Agrárias Georreferenciadas), a Professora Célia Regina Lopes Zimback e a todos os funcionários do Departamento de Recursos Naturais / Área de Ciência do Solo.

A Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa de estudos.

## SUMÁRIO

|                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| LISTA DE FIGURAS .....                                                          | V   |
| LISTA DE TABELAS .....                                                          | VII |
| RESUMO .....                                                                    | 1   |
| SUMMARY .....                                                                   | 2   |
| 1. INTRODUÇÃO.....                                                              | 3   |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA .....                                                  | 5   |
| 2.1 Situação das águas subterrâneas no Brasil .....                             | 5   |
| 2.2 O problema em estudo na Estação Ecológica de Santa Bárbara .....            | 6   |
| 2.3 A importância do monitoramento das águas subterrâneas .....                 | 10  |
| 2.4 Cultivos florestais no Estado de São Paulo e demanda pelo uso da água ..... | 11  |
| 2.5 Modelos hidrológicos para o planejamento do uso dos recursos hídricos.....  | 13  |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS.....                                                      | 16  |
| 3.1 Caracterização da área de estudo.....                                       | 16  |
| 3.2 Série de dados disponíveis.....                                             | 22  |
| 3.3 Análise exploratória dos dados.....                                         | 22  |
| 3.3.1 Estatística descritiva .....                                              | 22  |
| 3.3.2 Função de Autocorrelação (FAC) e Autocorrelação Parcial (FACP) .....      | 24  |
| 3.3.3 Modelo HARTT .....                                                        | 25  |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                                                 | 28  |
| 4.1 Análise estatística dos dados .....                                         | 28  |
| 4.1.1 Medidas de posição .....                                                  | 28  |
| 4.1.2 Medidas de dispersão amostral .....                                       | 29  |
| 4.2 Avaliação dos resultados das séries históricas .....                        | 30  |
| 4.3 Avaliação dos resultados da modelagem das séries temporais.....             | 36  |
| 5. CONCLUSÕES.....                                                              | 50  |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                             | 52  |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Distribuição de uso da terra na EECSB .....                                                                                                              | 7  |
| Figura 2. Rede de monitoramento implantada pela CPRM.....                                                                                                          | 9  |
| Figura 3. Representação esquemática das classes de modelos abordados .....                                                                                         | 14 |
| Figura 4. Delimitação da área da Estação Ecológica de Santa Bárbara. ....                                                                                          | 16 |
| Figura 5. Área dos poços GP1 a GP5, fogo em agosto 2011 e corte total das árvores remanescentes em agosto 2013. ....                                               | 19 |
| Figura 6. Área do poço GP5.....                                                                                                                                    | 19 |
| Figura 7. Visão geral da vegetação ao redor do poço AB5, implantado em janeiro de 2010, onde houve 3 ha de invasão maciça de Pinus. ....                           | 20 |
| Figura 8. Visão geral do poço P2 em Campo Úmido, mostrando o avanço gradual do Pinus ao redor do poço.....                                                         | 21 |
| Figura 9. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço da Água do Bugre 1. ....                                                     | 31 |
| Figura 10. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço da Água do Bugre 2. ....                                                    | 32 |
| Figura 11. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço de Água do Bugre 3. ....                                                    | 32 |
| Figura 12. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço de Água do Bugre 4. ....                                                    | 32 |
| Figura 13. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço de Água do Bugre 5. ....                                                    | 33 |
| Figura 14. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço Guarantã com Pinus 1. ....                                                  | 33 |
| Figura 15. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço Guarantã com Pinus 2. ....                                                  | 33 |
| Figura 16. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço Guarantã com Pinus 3. ....                                                  | 34 |
| Figura 17. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço Guarantã com Pinus 4. ....                                                  | 34 |
| Figura 18. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço Guarantã com Pinus 5. ....                                                  | 34 |
| Figura 19. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço Guarantã sem Pinus 1. ....                                                  | 35 |
| Figura 20. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço Guarantã sem Pinus 2. ....                                                  | 35 |
| Figura 21. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço Guarantã sem Pinus 3. ....                                                  | 35 |
| Figura 22. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço Passarinho 1. ....                                                          | 36 |
| Figura 23. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço Passarinho 2. ....                                                          | 36 |
| Figura 24. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço Passarinho 3. ....                                                          | 36 |
| Figura 25. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço AB1 no período de dezembro de 2010 a março de 2015..... | 39 |

|                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 26. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço AB2 no período de dezembro de 2010 a março de 2015.....  | 40 |
| Figura 27. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço AB3 no período de dezembro de 2010 a março de 2015.....  | 40 |
| Figura 28. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço AB4 no período de dezembro de 2010 a março de 2015.....  | 41 |
| Figura 29. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço AB5 no período de dezembro de 2010 a março de 2015.....  | 41 |
| Figura 30. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço GP1 no período de dezembro de 2010 a março de 2015. .... | 42 |
| Figura 31. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço GP2 no período de dezembro de 2010 a março de 2015. .... | 43 |
| Figura 32. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço GP3 no período de dezembro de 2010 a março de 2015. .... | 43 |
| Figura 33. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço GP4 no período de dezembro de 2010 a março de 2015. .... | 44 |
| Figura 34. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço GP5 no período de dezembro de 2010 a março de 2015. .... | 44 |
| Figura 35. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço GSP1 no período de dezembro de 2010 a março de 2015..... | 45 |
| Figura 36. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço GSP2 no período de dezembro de 2010 a março de 2015..... | 45 |
| Figura 37. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço GSP3 no período de dezembro de 2010 a março de 2015..... | 46 |
| Figura 38. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço P1 no período de março de 2010 a março de 2015.....      | 47 |
| Figura 39. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço P2 no período de março de 2010 a março de 2015.....      | 47 |
| Figura 40. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço P3 no período de março de 2010 a março de 2015.....      | 48 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1. Localização dos poços de monitoramento e uso e ocupação do solo.....                                                                                                                                                         | 18 |
| Tabela 2. Comportamento característico das funções FAC e FACP.....                                                                                                                                                                     | 25 |
| Tabela 3. Medidas de posição amostral calculadas para as séries temporais de flutuação de níveis freáticos para o período de dezembro de 2010 a março de 2015 e precipitação no período de janeiro de 1987 a fevereiro de 2015. ....   | 28 |
| Tabela 4. Medidas de dispersão amostral calculadas para as séries temporais de flutuação de níveis freáticos para o período de dezembro de 2010 a março de 2015 e precipitação no período de janeiro de 1987 a fevereiro de 2015. .... | 30 |
| Tabela 5. Estatísticas com o melhor ajuste dos dados no modelo HARTT .....                                                                                                                                                             | 38 |

## RESUMO

A crescente utilização dos recursos hídricos tem aumentado a demanda por novas fontes de abastecimento. A exploração dos aquíferos se tornou uma alternativa para captação de água potável em regiões onde a captação das águas superficiais é limitada. Assim, torna-se necessário o monitoramento entre a oferta e a demanda por água, principalmente, em regiões de relevante interesse econômico e de vulnerabilidade ecológica. O objetivo desse trabalho foi analisar as oscilações dos níveis freáticos do Sistema Aquífero Bauru (SAB), na Estação Ecológica de Santa Bárbara (EEcSB) localizada em Águas de Santa Bárbara – estado de São Paulo. As análises foram realizadas a partir de um modelo autorregressivo de series temporais com o software HARTT (Hydrograph Analysis: Rainfall and Time Trend), e sua relação com a vegetação de Cerrado e as espécies exóticas. A partir dos níveis de dezesseis poços instalados na EEcSB coletados entre março de 2010 e março de 2015 e das médias mensais de precipitação coletados a partir de 1987. O comportamento dos níveis freáticos foi analisado em função da sazonalidade e da vegetação. O modelo HARTT demonstrou-se eficiente ao ser capaz prever tendências futuras nas oscilações dos níveis freáticos. As análises demonstraram que a cobertura vegetal não interferiu de forma significativa no ciclo hidrológico para que causasse grandes déficits no lençol freático, uma vez que a mesma contribui na manutenção do ciclo hidrológico na região da EEcSB.

---

**Palavras-Chave:** Águas Subterrâneas, Aquífero Bauru, Cerrado, software HARTT, Hidrogeologia, Modelos Hidrológicos.

GROUNDWATER LEVELS OSCILLATION IN THE BAURU AQUIFER SYSTEM (BAS) IN A CERRADO REGION DURING 2010-2015. Botucatu, 2015. 61p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: Rita de Cássia Ferreira da Silva

Adviser: Prof. Dr. Rodrigo Lilla Manzione

## SUMMARY

The overuse of water resource has been increasing the demand for new water sources. Groundwater reserves and aquifers have been exploited as an alternative to surface water in water scarcity areas. Therefore, monitoring the water supply and demand is necessary, particularly in regions of economic interest and ecological vulnerability. The aim of this study is to analyze groundwater variations in the Bauru Aquifer System (BAS), located in the Ecological Station of Santa Barbara (EEcSB), São Paulo state. The analyses were performed using an autoregressive time series model using HARTT software (Hydrograph Analysis: Rainfall and Time Trend). We analyzed the relationship among the surface and groundwater levels, the seasonality and vegetation parameters, such as native species from Cerrado biome, and exotic species. The groundwater levels data were collected for five years – 2010 to 2015 – in sixteen wells in EEcSB. We also accessed precipitation information since 1987. Our results showed the HARTT model was accurate to predict future oscillation trends of groundwater levels. The vegetation cover did not affect negatively the hydrological cycle, causing no significant groundwater deficit; on the other hand, the vegetation cover likely explain the maintenance of natural hydrological cycle in the EEcSB region.

---

**Keywords:** Groundwater, Aquifer Bauru, Cerrado, HARTT software, Hydrogeology, Hydrological Models.

## 1. INTRODUÇÃO

O aumento da demanda dos recursos hídricos tem como consequência a busca de outras fontes de água, seja para o abastecimento urbano ou para o setor agroindustrial. A partir da década de 1970, tem-se acentuado a exploração das águas subterrâneas no Brasil, estimando-se que no final da década de 1990 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. Essa tendência de aumento para os próximos anos se dá devido às necessidades decorrentes do aumento da concentração demográfica, bem como da expansão econômica (Hirata et al., 1997).

Os aquíferos estão distribuídos de forma heterogênea no Estado de São Paulo, de acordo com suas características hidrogeológicas, pois em alguns locais eles afloram na superfície, formando áreas de recarga direta, enquanto em outras podem estar a grandes profundidades, dificultando sua exploração. O Sistema Aquífero Guarani (SAG) é um exemplo de aquífero que está no grupo de aquíferos sedimentares que se destacam pela capacidade de produção de água subterrânea (Iritani e Ezaki, 2012).

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 (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”.

Para compreender a dinâmica de recarga do aquífero através da interação planta, escoamento e infiltração no solo, Mondin et al. (2006) afirma que “quantificação da recarga de um aquífero é um elemento chave para definir a sua exploração sustentável e para melhor compreender o modelo conceitual de circulação das águas subterrâneas.”

Constantemente existe uma necessidade de monitoramento desses aquíferos e, portanto também é importante no atual cenário das águas subterrâneas, testar e descobrir formas de monitoramento que facilitem a gestão desse recurso. O uso de modelos hidrológicos é uma alternativa para esse tipo de monitoramento. Através do auxílio de modelos hidrológicos, dados de poços tubulares e pluviométricos como dados de entrada, é possível compreender a dinâmica e os mecanismos reguladores da recarga do Sistema Aquífero Bauru (SAB). A avaliação desses mecanismos controladores de recarga em aquíferos livres é

particularmente importante quando se constata que várias cidades brasileiras foram construídas sobre esses reservatórios subterrâneos (Mondin et al. 2006).

Os modelos hidrológicos são métodos que ajudam a compreender esta dinâmica. 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 da terra resulta em uma 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).

Neste estudo, a modelagem hidrológica foi usada para entender os processos ambientais que envolvem a realidade dos aquíferos localizados na Estação Ecológica de Águas de Santa Bárbara (EEcSB), município de Águas de Santa Bárbara (SP), a partir de dados de monitoramento do nível freático. Procurou-se através de um modelo de séries temporais compreender a dinâmica dos recursos hídricos subterrâneos da região e sua relação com a vegetação e o uso e ocupação da terra e diferentes demandas hídricas das florestas plantadas, nativas e campos antrópicos. Esse tipo de abordagem pode além de ajudar a entender o impacto das mudanças no manejo da vegetação da estação, prever tendências futuras naquele ecossistema (Rennó e Soares, 2000). Os resultados forneceram informações para o manejo da área visando à proteção e uso sustentável das águas, obedecendo à capacidade suporte das bacias hidrográficas quanto a recursos hídricos.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Situação das águas subterrâneas no Brasil

As águas subterrâneas têm ganhado maior notoriedade no Brasil, dois fatores principais norteiam essa atenção recebida: aumento da demanda e a poluição das águas superficiais, que dificultam e encarecem o tratamento. Atualmente as reservas renováveis dos aquíferos no Brasil alcançam cerca de  $42.289 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  ( $1.334 \text{ km}^2\cdot\text{a}^{-1}$ ), ou seja, correspondem a 24% do escoamento dos rios em território nacional e 49% da vazão de estiagem (Hirata, Zoby e Oliveira, 2010). Nesse contexto, segundo estudos da ANA (Agência Nacional das Águas) e Hirata et al. (2006):

Somente os 27 principais aquíferos sedimentares, que ocupam 32% da área do país, totalizam a  $20.473 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ . Essa gigantesca vazão de água é distribuída, de forma simplificada, em dois grandes grupos, a saber: aquíferos de rochas e materiais sedimentares e aquíferos de rochas fraturadas (ANA 2005a; 2005b; Hirata et al., 2006).

Apesar de o Brasil ser um país que concentra uma abundância relativa de água doce e potável, não estamos isentos de problemas como desperdício, degradação de sua qualidade e superexploração dos aquíferos, que por se tratarem de recursos que estão ocultos na natureza, só é possível quantificar e qualificar seus possíveis problemas através de análises laboratoriais e estudos detalhados.

Segundo Villar (2008), no país compartilhamos onze aquíferos transfronteiriços, entre os quais destaca-se o Aquífero Guarani, que devido à sua importância estratégica a suas dimensões que se estendem por países como Argentina, Uruguai, Paraguai e Brasil, tem sido alvo de vários projetos internacionais que permitiram um melhor conhecimento sobre suas características e seu comportamento dinâmico.

A legislação nacional usou como arcabouço teórico a legislação das águas superficiais, pois as leis criadas para proteger as águas subterrâneas são relativamente recentes e surgiram, segundo Villar (2008), a partir das discussões sobre o Projeto Aquífero Guarani em 1999, onde gestores perceberam a necessidade da criação de uma normatização e legislação nacional para a proteção das águas subterrâneas. A autora ainda afirmou que:

O grande marco deu-se com a criação, em 2000, da Câmara Técnica Permanente de Águas Subterrâneas do Conselho Nacional de Recursos Hídricos - CNRH, e a aprovação da resolução CNRH nº 15, em 2001, que trouxe em seus artigos aspirações que estavam no Projeto de Lei Federal que ficou mais de 15 anos sendo discutido e posteriormente foi arquivado no Congresso Nacional.

Esse cenário de discussão e conscientização estendeu-se longos anos até se estabelecer definitivamente. Atualmente caminhamos para que cada vez mais se adquira conhecimento através do monitoramento dos sistemas aquíferos, embora ainda faltem políticas públicas que assegurem o monitoramento para que se aperfeiçoe cada vez mais a gestão das águas subterrâneas. De fato ainda existe uma lacuna em relação ao conhecimento das potencialidades de exploração dos aquíferos, sem oferecer riscos às águas e sem que haja a contaminação antropogênica. Segundo Hirata, Zoby e Oliveira (2010):

Os desafios enfrentados para a gestão envolvem: (a) o disciplinamento do uso da água subterrânea, reconhecendo as áreas de maior demanda e avaliando os perigos de superexploração; (b) a proteção dos aquíferos e de suas captações quanto à contaminação antrópica; e (c) o estabelecimento de bases técnicas que permitam aproveitar, de forma integrada e sinérgica, os recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

## **2.2 O problema em estudo na Estação Ecológica de Santa Bárbara**

A vulnerabilidade dos aquíferos pode estar associada à sazonalidade das chuvas e à demanda da região. Deste modo, o regime pluviométrico pode ser fator decisivo para a recarga do aquífero. Portanto, a gestão das águas subterrâneas em regiões de interesse estratégico deve ser feita com base em estudos científicos que envolvam dados de precipitação e níveis freáticos.

A EECSB é uma área de interesse estadual e federal, e apresenta problemas relacionados a ocupação da área que deveria ser preservada, para o uso na agricultura e pastagens (Melo e Durigan, 2011), portanto coube ao governo criar medidas para o manejo do uso da terra no perímetro da EECSB. A falta de técnicas adequadas para o manejo do solo e o desmatamento, causaram a instalação de processos erosivos constantes na região próxima a EECSB, resultando em grandes sulcos e voçorocas. Segundo o Plano de Manejo (Melo e Durigan, 2011) este processo está aumentando a turbidez das águas e

comprometendo a drenagem natural dos rios. A Figura 1 mostra a atual situação do uso da terra na região da EEcSB.

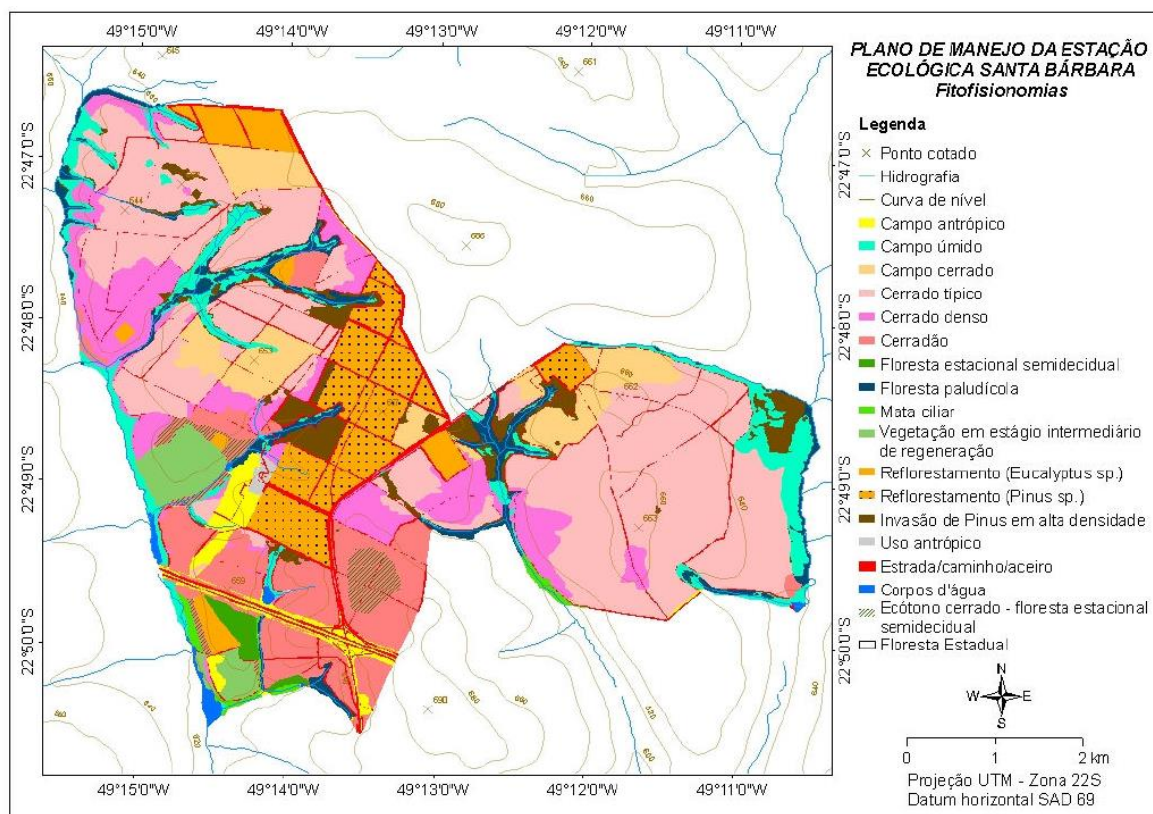


Figura 1. Distribuição de uso da terra na EEcSB  
Fonte: Melo e Durigan, 2011.

A região da EEcSB é ocupada pela vegetação nativa, campos antrópicos, vegetação em estágio de regeneração, mata ciliar e áreas de reflorestamento, o manejo na vegetação é constante, tanto para fins de produção florestal para pesquisa como para reverter à invasão pelo Pinus sobre a vegetação nativa.

A vegetação natural predominante é o Cerrado, que ocupava no Estado de São Paulo cerca de 14% do território no início do século, e atualmente ocupa cerca de 1% (Melo e Durigan, 2011). As áreas remanescentes de Cerrado no estado de São Paulo, atualmente são protegidas pelo governo estadual, uma vez que não há unidades de conservação do governo federal que protejam remanescentes do Cerrado, e a característica do solo que tem baixa capacidade de retenção de umidade, resulta em restrição hídrica para as plantas na estação seca.

Segundo Melo e Durigan (2011), a Estação Ecológica de Santa Barbara (EEcSB) protege amostra importante das fisionomias abertas do Cerrado e pequena porção

representativa da Floresta Estacional Semidecidual e está inserida em uma região definida como de nível de prioridade cinco (considerando oito como nível Máximo) para estabelecimento de ações de restauração interligando fragmentos de vegetação nativa e com prioridade máxima para inventários biológicos.

A EECB tem importância estratégica, pois além de proteger uma amostra do bioma Cerrado, está inserida no Sistema Aquífero Bauru (SAB), que possui ampla extensão regional ocupando os estados de São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Paraná. Sua área se estende por aproximadamente 100.000 km<sup>2</sup> no Estado de São Paulo.

O SAB é um dos mais importantes aquíferos no estado quando se considera o enorme aproveitamento de suas águas subterrâneas (São Paulo, 2005), e, portanto, faz parte de uma rede de monitoramento (Figura 2) da CPRM (Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais). Na região hidrográfica do Médio Paranapanema (UGRHI-17), onde está inserida a EECB, o SAB é um importante manancial hídrico subterrâneo, sendo responsável pelo abastecimento de água em pequenas propriedades e núcleos urbanos e rurais.

Em São Paulo o SAB abastece importantes mananciais como o Rio Tietê e o Rio Paraná, além de servir como manancial de abastecimento urbano para cidades como Marília e São José do Rio Preto. Justamente por ocupar extensa área no estado, o aquífero está propenso à exploração desenfreada e à degradação.

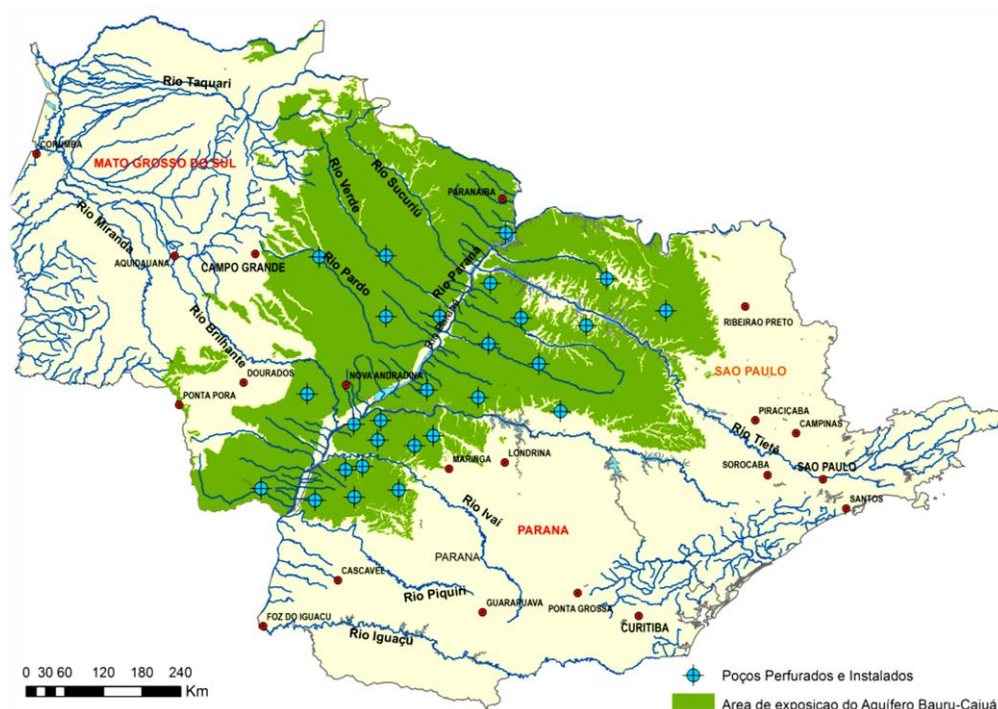


Figura 2. Rede de monitoramento implantada pela CPRM.  
Fonte: CPRM

Segundo o Relatório de Diagnóstico do Sistema Aquífero Bauru-Caiuá, da CPRM (Franzini apud DAEE, 2005) seu potencial explorável varia:

as camadas de sedimentação intermediária e de topo mostram vazão variável entre 3,0 e 20 m<sup>3</sup>/h, enquanto porções mais restritas na base do pacote sedimentar exibem vazões entre 20 e 50 m<sup>3</sup>/h. De modo geral, a média da vazão de produção dos poços é de 8 m<sup>3</sup>/h.

O relatório ainda mostra, a partir de dados compilados pela SEADE e DAEE (1999), que as águas subterrâneas são fontes prioritárias em treze das dezessete UGRHI do estado, e esse abastecimento alcança a vazão de aproximadamente 22,5 m<sup>3</sup>/s, onde a maior parte é consumida no noroeste paulista, em cidades com menos de 10.000 habitantes (Franzini, 2012). No mesmo relatório da CPRM, Franzini (2012) afirma que apenas 27% dos 30.000 poços existentes do estado têm outorga e que metade da vazão extraída é para o abastecimento público.

Por se tratar de um recurso natural pouco percebido pela sociedade, mesmo órgãos como a CPRM têm dificuldades de quantificar o potencial de exploração dos aquíferos. Portanto, muitas variáveis podem estar envolvidas na interceptação da água no ciclo hidrológico, além dos componentes típicos do ciclo hidrológico. A ação antrópica

pode exercer maior influência na derivação das águas subterrâneas, de forma direta, quando usa a água para o abastecimento público, ou indireta, quando altera o manejo da vegetação ou o uso da terra. Portanto, para considerar a vulnerabilidade dos aquíferos, é preciso estar atento a todas essas variáveis, para que se chegue o mais próximo da possível representação da realidade dos fenômenos que ocorrem no momento que a água precipita até que ela chegue no aquífero.

### **2.3 A importância do monitoramento das águas subterrâneas**

A água subterrânea é um recurso que na maioria das vezes é encontrada pura e própria para o consumo direto ou com a necessidade mínima de tratamento, e por serem naturalmente protegidos pela natureza, apresentam certas vantagens em relação às águas superficiais. Essas águas percolam lentamente no subsolo até serem descarregadas nos corpos d'água ou absorção das raízes de plantas ou ser extraída em poços (Rebouças, 2006). Essas características tornam essas águas porções finitas, uma vez que a velocidade do consumo tem superado a recarga.

Os sistemas aquíferos, por muito tempo não foram protegidos legalmente, uma vez que por serem de domínio estadual entendia-se que a legislação para as águas subterrâneas deveria se dar a partir do estado. Segundo Villar (2008) a gestão das águas subterrâneas “enfrenta o desafio de proteger um bem oculto, que envolve os dois principais recursos de natureza política: água e solo, recursos que consubstanciam relações de poder por excelência”. Essa questão incerta a respeito de qual órgão gestor deveria ser o responsável por proteger os recursos hídricos subterrâneos, fez com que por muitos anos essas águas fossem exploradas sem o devido cuidado.

Atualmente somos capazes de entender o papel da água subterrânea no ciclo hidrológico e porque ela deve ser protegida, mas não em sua totalidade. Embora muitos estudos sejam realizados e exista uma rede de monitoramento hidrológico específico para as águas subterrâneas no Brasil, segundo Cleary (2007), continuamos carentes de dados detalhados do seu uso e da distribuição geográfica, diferente das águas superficiais, cujo acesso e os custos para monitoramento são mais baratos. Hirata, Zoby e Oliveira (2010) afirmam que o papel das águas subterrâneas não se limita a recarregar corpos d'água. Menos compreendida, mas igualmente importante, é o papel ecológico que aquíferos desempenham que é fundamental para a manutenção da flora, fauna ou fins paisagísticos com as águas superficiais.

O crescimento populacional, a expansão na urbanização e o crescimento industrial, são fatores que favoreceram a crescente demanda por águas no Brasil. O crescimento populacional e a crescente industrialização aumentaram a demanda por recursos hídricos motivados pela crescente poluição das águas superficiais, por exemplo, fato que consequentemente aumentou a dependência de várias cidades pela exploração dos aquíferos, onde a água é encontrada em um estado próprio para o consumo humano com o mínimo de tratamento. Relatórios preliminares mostram que os aquíferos abastecem cerca de 30 a 40% da população do país, principalmente em cidades de médio e pequeno porte que não possuem fácil acesso às águas superficiais Hirata, Zoby e Oliveira (2010).

Esses fatores são mais acentuados em algumas regiões, geralmente em médias e grandes cidades e menos em outras, portanto esses problemas são concentrados no estado de São Paulo, onde 70% dos núcleos urbanos são abastecidos principalmente pelas águas subterrâneas em cidades como Marília, Bauru, Ribeirão Preto e São José do Rio Preto, justamente onde existe maior demanda (Hirata, Zoby e Oliveira, 2010).

Uma vez que esses problemas ocorrem concentrados em determinadas localidades, isso exige maior detalhamento nos estudos do comportamento dos níveis freáticos. Esses estudos têm de ser realizados progressivamente, para que seja criado um amplo banco de dados que caracterize o comportamento dos aquíferos. Uma vez gerado esse conhecimento, os gestores serão capazes de planejar e executar planos para explorar as águas subterrâneas de forma sustentável.

## **2.4 Cultivos florestais no Estado de São Paulo e demanda pelo uso da água**

O setor florestal contribui com uma parcela importante na economia nacional, no PIB essa parcela pode chegar a cerca de 3% (Vital, 2007). Por ser uma atividade economicamente rentável e ter como principal característica a exploração sustentável, a silvicultura está ampliando os limites de cultivo.

Segundo Vital (2007), plantações florestais, como as de Pinus, enfrentam grandes controvérsias e sustentam debates em relação aos possíveis impactos ambientais que podem ocorrer. Porém esses impactos podem acontecer dependendo das condições ambientais prévias de plantio. Os impactos podem ser positivos ou negativos no regime hídrico, no solo, na biodiversidade ou para a população local.

Quanto à demanda hídrica, em regiões com precipitação na faixa de 400 mm/ano, o eucalipto poderia acarretar ressecamento do solo. Vital (2007) afirmou que “os

impactos sobre lençóis freáticos, pequenos cursos d'água e bacias hidrográficas dependem da região em que se insere a plantação, da distância entre as plantações”, da bacia hidrográfica e da profundidade do lençol freático.

As áreas de florestas plantadas com eucalipto e Pinus no Brasil totalizaram, em 2007, 5.560.203 ha, representando um crescimento de 186.786 ha em relação a 2006, ou seja, acréscimo de 3,4%. De 2006 a 2007, constata-se um incremento na área plantada de 318.428 ha, com decréscimo de 1,4% em Pinus e 10,1% de acréscimo no eucalipto (ABRAF, 2008).

Na década de 70 “quando o projeto de plantio de florestas foi incentivado e financiado pelo governo brasileiro para atender as indústrias de celulose e papel, grandes áreas de Cerrado foram completamente removidas” (Fidelis e Lima, 2009, p.08).

Devido ao aumento da silvicultura em todo território nacional, surgiram críticas baseadas na premissa de que espécie como o Pinus necessita de mais água para o seu desenvolvimento comparado a outras espécies, com possíveis impactos sobre a umidade do solo e na vazão dos rios. Fidelis e Lima (2009) afirmam que os gêneros de *Eucalyptus* e *Pinus* foram os mais plantados em todo o mundo, devido a uma grande variedade de espécies que são adaptáveis aos diversos tipos de clima e solos. Por isso, em todos os continentes há a prática da silvicultura para fins comerciais.

Para Vital (2007), o consumo de água por árvores exóticas não significa que a planta necessariamente provocará seca no solo. As condições preexistentes para o plantio e a aptidão climática são fatores importantes para se considerar quando se pretende cultivar eucalipto. Já os impactos no lençol freático irão depender também da localização das plantações em relação à bacia hidrográfica, pois dependendo da altitude, a raiz da planta não ultrapassa 2,5 m, e não alcançaria o lençol subterrâneo. Entretanto, quando se trata de área de recarga do SAG, existe a possibilidade de que a planta extraia água diretamente do aquífero, podendo impactar na flutuação do lençol freático, de modo que:

Quando as chuvas superam a quantidade de água evapotranspirada pela floresta, observam-se elevação da umidade do solo e variações na vazão dos rios. Se, por outro lado, a água consumida pela floresta (evapotranspiração) for maior do que o volume de chuvas, isso significa que a floresta está “se alimentando” das reservas de água contidas no solo (Vital, 2007).

Por outro lado, nos estudos de Ranzini et al. (2004):

a floresta não interfere na formação das precipitações, mas contribui na dinâmica da água das chuvas, pela interceptação foliar, evapotranspiração, escoamento superficial e percolação. Os aspectos físicos do solo como capacidade de infiltração, profundidade e declividade também devem ser levadas em consideração no escoamento, pois acentuam as características de fragilidade ambiental presentes na bacia hidrográfica avaliada, provocando debates sobre qual seria o tamanho mais adequado para uma Área de Preservação Permanente.

O bioma do Cerrado perdeu cerca de 80% de sua cobertura no estado de São Paulo, grande parte dessa perda se deve a Revolução Verde e a novas áreas ocupadas pela pecuária, portanto, segundo Fidelis e Lima (2009) existe uma “preocupação com os remanescentes de Cerrado, em relação à introdução da silvicultura, o que requer estudos científicos que deem respostas para os questionamentos da sociedade sobre o ressecamento e diminuição de água no subsolo e perda da biodiversidade”.

## **2.5 Modelos hidrológicos para o planejamento do uso dos recursos hídricos**

Modelos numéricos têm sido aplicados à descrição de fenômenos naturais por se tratarem de abstrações da realidade encontrada. Em geral são uma tentativa de representação de uma ou todas as propriedades de um fenômeno, sistema ou objeto, que tem com propósito compreender melhor a resposta de processos a partir de observações realizadas, ou mesmo deduzir efeitos (Tucci, 1998). Sua construção é uma tentativa de ganho em conhecimento sobre determinado fenômeno, sendo que à medida que o conhecimento sobre um processo se expande, a complexidade dos modelos tende a aumentar.

A representação adequada da resposta hidrológica é um ponto relevante no estudo a ser considerado no planejamento de uso desses recursos. A utilização de modelos estocásticos apresenta soluções importantes, Heuvelink e Pebesma afirmam que (1999):

uma vez que esses modelos são capazes de inferir a distribuição espaço-temporal das variáveis de interesse e refletir nas estimativas dos processos hídricos em estudo, os níveis de incerteza ou de desconhecimento. Associadas as medidas de incerteza, a avaliação do risco associado das ações de gerenciamento, tais como as outorgas de irrigação e o dimensionamento do volume de água desses sistemas podem ser incluídos no planejamento dos recursos hídricos voltados à agricultura.

Segundo Manzione (2015, p. 323) de maneira geral os modelos podem ser divididos em duas classes: modelos determinísticos e modelos estocásticos:

Os modelos determinísticos seguem equações e leis da física que envolve o processo em estudo para assim descreve-lo a partir de formalismos matemáticos. Já os modelos estocásticos são aqueles regidos pelas leis da probabilidade, seguindo uma abordagem estatística, seus resultados se baseiam na esperança de que certo valor seja alcançado. (Manzione, 2015, p. 323).

Os modelos determinísticos são também chamados de mecanísticos ou caixa branca, uma vez que todos os dados de entrada do modelo são conhecidos e contornados pelo analista. Já os modelos estocásticos, também chamados de caixa preta, são observações empíricas baseadas somente nos dados de entrada, pois suas variáveis seguem leis estatísticas e seus parâmetros são determinados por sua formulação e não são controladas pelo analista (Manzione, 2015). A Figura 3 apresenta uma representação das classes de modelo.

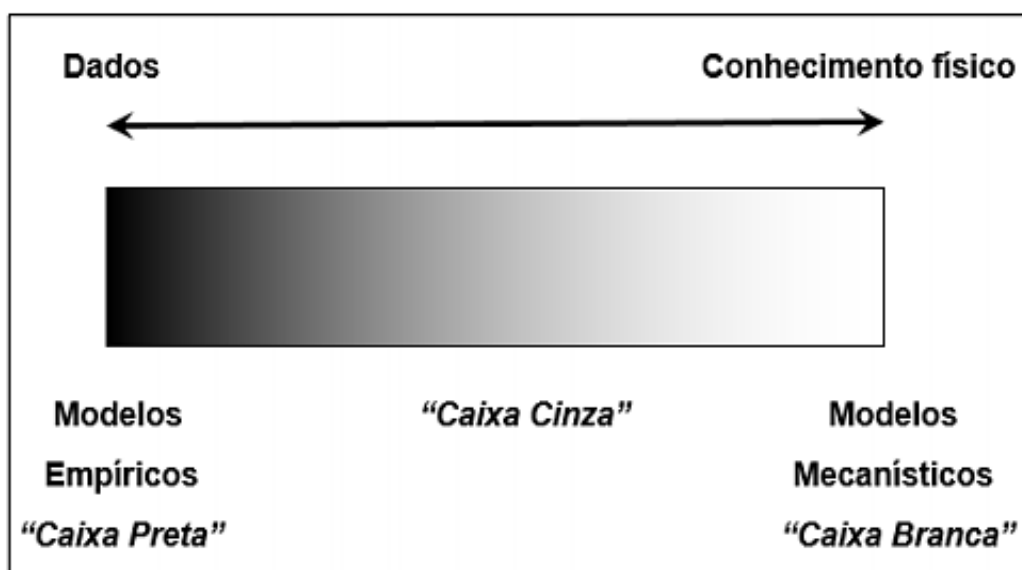


Figura 3. Representação esquemática das classes de modelos abordados  
Fonte: Manzione, 2007

Ao se analisar os dados de monitoramento, modelos de séries temporais são uma solução, já que tratam dados organizados em escala cronológica. Box e Jenkins (1976) afirmam que existem três etapas na construção de um modelo de séries temporais: identificação, estimação (calibração) e diagnóstico (validação).

A identificação é feita por meio da análise visual do gráfico gerado pelo modelo. Neste estágio, busca-se compreender a ordem e o tipo que o processo estocástico que pode assumir (autorregressivo – AR; média móvel – MA ou autorregressivo/média móvel - ARMA, por exemplo) (Nava, 2015). Para identificar a ordem desses processos é preciso o uso de outras ferramentas, como uma representação gráfica da FAC (função de autocorrelação) e FACP (função de autocorrelação parcial), que funcionam como parâmetros para identificar a ordem do processo envolvido, permitindo, através dessa integração, a manipulação de dados espaciais, e, servindo como ferramenta de auxílio para a tomada de decisões relacionadas com o planejamento e o ordenamento do território (Mendes Filho et al., 2007).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo se situa na Estação Ecológica de Santa Bárbara (EEcSB), localizada no Estado de São Paulo, no município de Santa Bárbara, nas coordenadas 22°48'59" S e 49°14'12" O. A Figura 4 ilustra a área e a localização Estação Ecológica de Santa Bárbara (EEcSB).

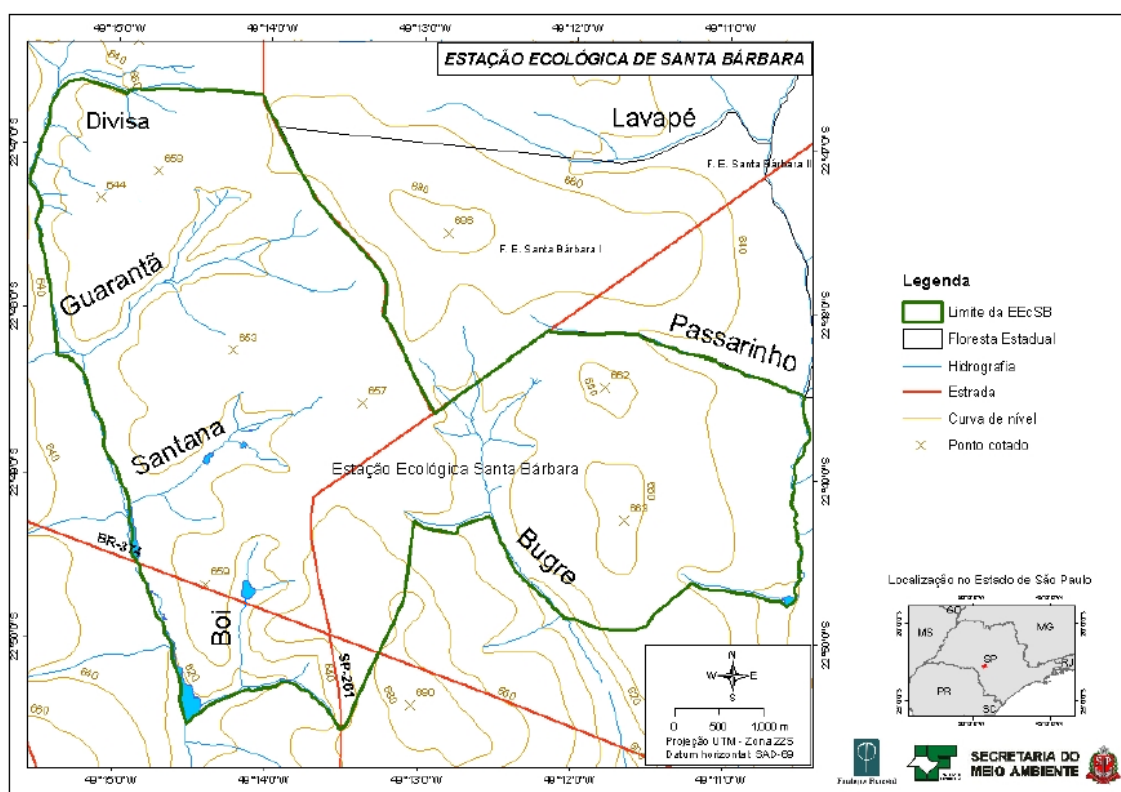


Figura 4. Delimitação da área da Estação Ecológica de Santa Bárbara.

Fonte: Plano de Manejo da Estação Ecológica de Santa Bárbara (Melo e Durigan, 2011).

A estação é uma Unidade de Proteção Integral, criada pelo Decreto nº 22.337, de 07/06/1984 com uma área de 2.712 ha. Segundo a classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo Cwa ou tropical sub-úmido (clima quente com inverno seco). As precipitações anuais estão em torno de 1000- 2086 mm, podendo chegar a 30 mm mensais no inverno. A temperatura média anual está em torno de 18°C, com máximas em janeiro entre 22°C e 30°C e mínimas no mês mais frio 18°C (Melo e Durigan, 2011).

O uso do solo se destina a conservação dos remanescentes de floresta estacional semidecidual e Cerrado. A região está localizada na Bacia Sedimentar do

Paraná, entendida como os afloramentos dos sedimentos das Formações Marília (Km) e Adamantina (Ka), ambas do Grupo Bauru e as rochas ígneas extrusivas basálticas da Formação Serra Geral (JKsg), pertencente ao Grupo São Bento, de idade Jurássica (Teixeira, 2003). Os tipos de solos que prevalecem na EECSB são o Latossolos vermelhos (LV56), que apresentam alta suscetibilidade a erosão, e são pouco filtrantes devido à sua textura arenosa. Portanto, oferecem risco de contaminação do aquífero por insumos agrícolas e outros efluentes, e Gleissolos próximo aos cursos d'água, que são totalmente inadequados a construções civis, ou para a implantação de qualquer tipo de aterro (Melo e Durigan, 2011). Em relação à flora, a região da EECSB era originalmente coberta por Cerrado e Floresta Estacional Semidecidual nas regiões mais férteis e nos solos mais argilosos.

A silvicultura provocou perturbações nas áreas de vegetação nativa, devido à invasão de indivíduos *Pinus spp*, que “disseminam sementes que tem provocado graves danos à vegetação nativa pela invasão biológica” (Melo e Durigan, 2011). Em alguns trechos a invasão é tão intensa, que é possível mapear essas áreas como uma categoria de vegetação a parte. Essas áreas exigem intervenções intensas para a erradicação da espécie invasora. A Tabela 1 mostra a localização dos poços de monitoramento e como é o uso da terra na região onde estão instalados os piezômetros.

Tabela 1. Localização dos poços de monitoramento e uso e ocupação do solo.

| POÇOS          | LOCALIZAÇÃO    |                | USO DA TERRA                                             |
|----------------|----------------|----------------|----------------------------------------------------------|
|                | Latitude Sul   | Latitude Oeste |                                                          |
| <b>P_alto</b>  | 22° 48' 28,4"  | 49° 11' 28,8 " | Transição de Campo Úmido para Cerrado<br>Mata de Galeria |
| <b>P_médio</b> | 22° 48' 28,0"  | 49° 11' 28,7 " |                                                          |
| <b>P_baixo</b> | 22° 48' 26,8"  | 49° 11' 28,6 " |                                                          |
| <b>GP1</b>     | 22° 47' 14,4 " | 49° 14' 72,1 " |                                                          |
| <b>GP2</b>     | 22° 47' 14,3 " | 49° 14' 72,6 " |                                                          |
| <b>GP3</b>     | 22° 47' 14,2 " | 49° 14' 73,3 " | Pinus <sup>1</sup>                                       |
| <b>GP4</b>     | 22° 47' 13,9 " | 49° 14' 73,7"  | Pinus <sup>1</sup>                                       |
| <b>GP5</b>     | 22° 47' 13,8 " | 49° 14' 74,2"  | Pinus <sup>1</sup>                                       |
| <b>GSP1</b>    | 22° 46' 94,7 " | 49° 14' 89,0 " | Campo Cerrado                                            |
| <b>GSP2</b>    | 22° 46' 94,4 " | 49° 14' 89,4 " | Campo Cerrado                                            |
| <b>GSP3</b>    | 22° 46' 94,0 " | 49° 14' 72,1 " | Campo Cerrado                                            |
| <b>AB1</b>     | 22° 49' 10,2 " | 49° 13' 33,7 " | Cerrado típico <sup>2</sup>                              |
| <b>AB2</b>     | 22° 49' 09,7 " | 49° 13' 33,1 " | Cerrado típico <sup>2</sup>                              |
| <b>AB3</b>     | 22° 49' 09,8 " | 49° 13' 32,6 " | Cerrado denso <sup>2</sup>                               |
| <b>AB4</b>     | 22° 49' 09,6 " | 49° 13' 32,0 " | Cerrado denso <sup>2</sup>                               |
| <b>AB5</b>     | 22° 49' 09,3 " | 49° 13' 31,4 " | Cerrado denso <sup>2</sup>                               |

<sup>1</sup>Área invadida por Pinus, manejo com fogo em agosto 2011, árvores cortadas em 2013.

<sup>2</sup>Área invadida após a erradicação de Pinus em março de 2010.

A vegetação descrita na Tabela 1 é a vegetação predominante ao redor dos poços, uma vez que a invasão dos Pinus e a silvicultura ocuparam grandes extensões de áreas originalmente ocupadas por Campos Cerrados. A vegetação nos poços GP1 a GP5 foi queimada em agosto de 2011 e cortada em 2013. Porém, o Pinus voltou a crescer em um raio de cerca de 20 m. Devido a esse fator, a vegetação foi recentemente manejada para que houvesse a sucessão da vegetação nativa. Os poços AB1 a AB5 foram instalados em janeiro de 2010, em uma área invadida (3 ha) sendo que em maio de 2010 a invasão foi totalmente controlada (erradicação do Pinus). As Figuras 5, 6, 7 e 8 ilustram a localização dos poços de monitoramento e a atual situação da vegetação local.



Figura 5. Área dos poços GP1 a GP5, fogo em agosto 2011 e corte total das árvores remanescentes em agosto 2013.



Figura 6. Área do poço GP5.



Figura 7. Visão geral da vegetação ao redor do poço AB5, implantado em janeiro de 2010, onde houve 3 ha de invasão maciça de Pinus.



Figura 8. Visão geral do poço P2 em Campo Úmido, mostrando o avanço gradual do Pinus ao redor do poço.

Todos os poços têm uma característica incomum: no passado houve a invasão de Pinus ao redor dos poços ou ainda existe o avanço de Pinus nessas áreas. Na Figura 8 é possível observar a proximidade do Pinus com o poço P2, nos resultados verificamos o se a presença dessa espécie pode afetar ou não o ciclo hidrológico. Um fator preponderante que pode ter maior influência nas oscilações dos níveis freáticos é o manejo constante da vegetação como se pode ver nas Figuras 6 e 7, esses esforços ocorrem seja para conter o avanço do Pinus, ou para provocar uma sucessão ecológica para que a vegetação nativa possa se recuperar sem a invasão dessas espécies exóticas usadas outrora para o reflorestamento da EECSB.

A partir deste estudo, buscamos entender a dinâmica dos sistemas aquíferos a partir das relações solo – planta – atmosfera, e o quanto essa dinâmica é fundamental para subsidiar uma gestão racional e sustentável de recursos hídricos e fomentar estudos nessa área. Nesse sentido o papel da vegetação nativa e dos sistemas agrícolas sob essa dinâmica deve ser estudado por métodos adequados que quantifiquem a demanda hídrica dos sistemas e os respectivos déficits/excedentes hídricos que uma bacia está apresentando.

### **3.2 Série de dados disponíveis**

A área de estudo contém a infraestrutura implantada para monitoramento dos níveis freáticos nos dezesseis poços descritos acima, visando assim um acompanhamento detalhado das variações climáticas e a flutuação do nível do aquífero. Esses poços estão distribuídos da seguinte forma: três na bacia do Ribeirão Passarinho, oito na bacia do Córrego de Divisa onde a vegetação é Campo Cerrado, sendo cinco em área invadida e três em área não invadida por Pinus, e cinco deles na cabeceira do Ribeirão do Bugre. Os dados sobre os níveis freáticos foram coletados com uma frequência quinzenal, em todos os poços da área de estudo, de março de 2010 a março de 2015.

As séries climatológicas utilizadas foram coletadas com o uso de pluviômetros manuais a partir do ano de 1987 a 2015, como parte dos registros históricos. Também foram coletados dados da Estação Climatológica Compacta, instalada na sede da unidade, para monitoramento climático.

### **3.3 Análise exploratória dos dados**

#### **3.3.1 Estatística descritiva**

O uso da estatística descritiva para análises de fenômenos naturais incorpora mais evidências nas observações sobre a realidade. No entanto, são necessários alguns cuidados, pois as técnicas estatísticas podem levar a uma aproximação com a realidade, mas também podem levar a sérias distorções (Bracarense, 2012).

Neste estudo foram usadas medidas de posição (média, moda, quartis e mediana) e medidas de dispersão (mínimo, máximo, amplitude total, desvio padrão e coeficiente de variação) para cálculo das estatísticas sobre os níveis freáticos de cada poço e para as séries climatológicas.

- **Medidas de posição**

Para interpretar um conjunto de dados, a partir da concentração e a proximidade, é possível verificar valores que podem ser usados para representar todos os dados. Em outras palavras, é possível afirmar que alguns valores podem ser representantes do conjunto de mensurações (Ferreira, 2005) esses valores podem ser denominados medidas de posição ou medidas de tendência central (média, moda e mediana).

A média aritmética é uma medida calculada somando-se os valores de todas as observações e dividindo-se essa soma pelo número de observações. Equivale a dividir o total das  $n^o$  observações em  $n^o$  partes iguais (1):

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

O conceito de mediana se baseia no valor que divide o conjunto de dados em duas partes, onde se encontram 50% das observações. Para calcular a mediana é preciso que os dados estejam ordenados. Já a moda refere-se ao valor mais frequente no conjunto de dados.

- **Medidas de dispersão**

As medidas de dispersão indicam o grau de dispersão, uma vez que as medidas de tendência central descrevem só um aspecto dos dados, e não o grau com que os dados tendem a dispersar-se em torno de um valor central. Nesse trabalho serão usados o desvio padrão e o coeficiente de variação como medidas de dispersão.

O desvio padrão “é a raiz da média dos quadrados dos desvios em relação à média do conjunto e é uma medida do desvio dos valores individuais em relação ao valor central do conjunto de dados” (Drumond, 1996). Se os valores estão próximos uns dos outros, a soma dos quadrados é pequena e, desta maneira, também o desvio padrão (Ferreira, 2005). O desvio padrão é calculado com a seguinte equação (2):

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

O coeficiente de variação (CV) é uma medida de dispersão usada para a comparação de distribuições diferentes. O desvio-padrão, uma medida de dispersão, é relativo à média e como duas distribuições podem ter médias diferentes, o desvio dessas duas distribuições não é comparável (Bracarense, 2012). A solução é usar o coeficiente de variação, que é igual ao desvio-padrão dividido pela média (3):

$$CV = \frac{\text{Desvio Padrão}}{\text{Média}} \times 100\% \quad (3)$$

### 3.3.2 Função de Autocorrelação (FAC) e Autocorrelação Parcial (FACP)

Uma série temporal é a amostragem sequencial de uma variável durante um intervalo de tempo, que possibilita a identificação de padrões. Sua principal característica é a dependência entre as observações (Manziona, 2015), que pode ser obtida analiticamente, ou também por simulação numérica, ou ainda, por medição experimental.

As séries temporais são processos dinâmicos da natureza (estocásticos), ou seja, o seu futuro não pode ser calculado com exatidão, mas é determinado parcialmente a partir de valores do passado (Manziona, 2015). A partir dessas premissas, uma vez identificado o tipo de processo analisado na série, tanto de precipitação, como dos níveis freáticos, foram analisadas através da função de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para determinar qual o modelo estocástico que representa os dados (Manziona, 2015).

Na estatística, a função de autocorrelação representa uma medida que indica o quanto o valor de uma variável aleatória é capaz de influenciar seus vizinhos. Por exemplo, o quanto a existência de um valor mais alto condiciona valores também altos de seus vizinhos, ou seja, esta função mede o grau de dependência entre os valores de uma série temporal em diferentes períodos (Brockwell e Davis, 1991). Já a função de autocorrelação parcial (FACP) pode ser definida como a sequência de correlações de uma série temporal ( $Z_t$  e  $Z_{t-1}$ ), ( $Z_t$  e  $Z_{t-2}$ ), ( $Z_t$  e  $Z_{t-3}$ ) e assim por diante, com os efeitos de defasagens anteriores sobre  $Z_t$  constantes, é usada nesse caso como uma análise complementar, para confirmar ou refutar a hipótese identificada na FAC (Magalhães, 2006).

A FAC e a FACP são calculadas e plotadas para análise a partir de um atraso (lag) para determinar quais valores são significantes. O valor do coeficiente da FAC em uma série temporal varia entre -1 e 1, se o valor do coeficiente de autocorrelação assumir o valor de -1, isso significa que existe uma autocorrelação negativa absoluta, se o coeficiente assumir o valor de 1 isso significa que existe uma autocorrelação positiva, se o coeficiente assumir o valor de 0 não existe correlação entre as variáveis (Manziona, 2015).

Uma vez analisadas a FAC e a FACP, a tabela 2 apresenta um resumo de quais processos podem ser assumidos:

Tabela 2. Comportamento característico das funções FAC e FACP.

| Processo                                       | Autocorrelação                                                                                     | Autocorrelação Parcial                                                                             |
|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AR (p)<br>(autorregressivo)                    | Minimizada e infinita em extensão exponencial ou em ondas                                          | Picos no passo 1 de p e então interrupções                                                         |
| MA (q)<br>(média móvel)                        | Picos no passo 1 de q e então interrupções                                                         | Minimizada e infinita em extensão exponencial ou em ondas                                          |
| ARMA (p,q)<br>(autorregressivo<br>média móvel) | Irregular nos primeiros passos q-p e depois minimizada e infinita em extensão exponencial ou ondas | Irregular nos primeiros passos p-q e depois minimizada e infinita em extensão exponencial ou ondas |

Fonte: Manzione et al. (2015)

O comportamento da série indica o tipo de processo que pode ser assumido. Esta etapa do trabalho exige experiência para essa identificação. Se o coeficiente de autocorrelação diminuir rapidamente para zero, pode-se dizer que a série é estacionária, caso a série se inicie com valores altos próximos a 1 (em uma escala de 0 a 1) e diminuam gradualmente para zero, pode-se dizer que a série é não estacionária (Manzione, 2015). Essas análises existem como um diagnóstico complementar das séries temporais.

### 3.3.3 Modelo HARTT

O modelo HARTT (Hydrograph Analysis: Rainfall And Time Trends) foi desenvolvido por Ferdowsian et al. (2001) para realizar análises em séries de oscilação do nível freático para correlacioná-las com eventos climáticos (precipitação). O modelo calcula o atraso (lag) entre o evento em questão e a resposta freática, determinando assim se existe uma influência adicional (não climática) nas oscilações das águas subterrâneas ao longo do tempo, a partir das entradas da chuva (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. Para o

cálculo, são utilizadas as séries de precipitação e níveis freáticos disponíveis e com os resultados desse modelo espera-se identificar em quais áreas e sob quais cultivos se dão as maiores e menores oscilações dos níveis, e entender o papel da vegetação no ciclo hidrológico.

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):

$$RAPM = \sum_{i=1}^t (M_{i,j} - \bar{M}_j) \quad (5)$$

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.

$$RAPA = \sum_{i=1}^t (M_i - \bar{A}/12) \quad (6)$$

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 do ano.

O modelo de regressão usada no HARTT é formulado como:

$$Prof_t = k_0 + k_1 * RAPM_{t-L} + k_2 * t \quad (7)$$

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  $k_0, k_1, k_2$  são parâmetros a serem estimados.

Uma vez que a análise termina, os resultados da análise de regressão são plotados e apresentados em uma janela a parte. Essa janela exibe o cálculo com o melhor ajuste e um gráfico mostrando a curva ajustada e o efeito da precipitação juntamente com

as leituras de níveis freáticos. Os efeitos da precipitação e dos níveis freáticos se encontram em diferentes eixos e possuem diferentes escalas. Não é possível mudar a escala do gráfico nesse estágio. As flutuações dos níveis de água subterrânea não devem ter uma relação negativa com a precipitação. Se a variável precipitação for negativa, o programa não irá traçar um gráfico do resultado e a caixa para o coeficiente de precipitação irá exibir um fundo vermelho. Se todos os coeficientes de precipitação forem negativos, outro ícone aparecerá no lado direito da janela de resultado. Este ícone permite que você transforme os coeficientes de precipitação em zero. Ao definir o coeficiente de precipitação como zero você assume que a precipitação não tem efeito sobre os níveis de água subterrânea (Ferdowsian et al. 2001).

Uma vez aplicado o modelo HARTT aos dados de monitoramento dos níveis, é possível verificar as diferenças impostas pelos diferentes usos da terra nos resultados do modelo. Imagina-se que o comportamento dos níveis frente aos plantios de Pinus seja diferente daqueles em áreas de Cerrado, influenciando na produção de água das nascentes da área de estudo, por exemplo.

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).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Análise estatística dos dados

Os resultados foram analisados estatisticamente a partir das medidas de posição (média, mediana e moda) medidas de dispersão amostral (desvio padrão, dispersão interquartil, coeficiente de variação e amplitude total); função de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para cada poço. Esta etapa da análise avalia como os dados se comportam, e quais são as variações mais significativas nas séries temporais.

Através de análises estatísticas de hidrogramas gerados pelo modelo HARTT, foi possível distinguir o efeito das flutuações na precipitação da tendência subjacente do nível de água subterrânea ao longo do tempo.

#### 4.1.1 Medidas de posição

Os resultados das medidas de posição amostral calculadas para o conjunto de dados analisados estão representados na Tabela 3.

Tabela 3. Medidas de posição amostral calculadas para as séries temporais de flutuação de níveis freáticos para o período de dezembro de 2010 a março de 2015 e precipitação no período de janeiro de 1987 a fevereiro de 2015.

| DADOS | MED (m) | 1º Q (m) | MD (m) | 3º Q (m) | MOD (m) |
|-------|---------|----------|--------|----------|---------|
| P1    | -0,63   | -0,48    | -0,65  | -0,79    | -0,65   |
| P2    | -0,04   | -0,06    | -0,05  | -0,05    | -0,10   |
| P3    | -0,05   | -0,08    | -0,05  | -0,02    | -0,06   |
| GP1   | -1,77   | -1,59    | -1,80  | -2,21    | -1,80   |
| GP2   | -1,69   | -1,40    | -1,64  | -2,12    | -0,53   |
| GP3   | -1,71   | -1,50    | -1,70  | -2,15    | -2,30   |
| GP4   | -1,73   | -1,49    | -1,72  | -2,24    | -2,36   |
| GP5   | -1,78   | -1,55    | -1,79  | -2,25    | -1,70   |
| GSP1  | -1,33   | -1,13    | -1,37  | -1,58    | -1,30   |
| GSP2  | -1,38   | -1,15    | -1,41  | -1,67    | -1,61   |
| GSP3  | -1,42   | -1,25    | -1,50  | -1,69    | -1,68   |
| AB1   | -3,08   | -2,59    | -3,18  | -3,67    | -3,18   |
| AB2   | -2,99   | -2,53    | -3,12  | -3,56    | -2,53   |
| AB3   | -3,00   | -2,54    | -3,09  | -3,58    | -3,01   |
| AB4   | -2,99   | -2,54    | -3,09  | -3,55    | -3,17   |
| AB5   | -3,00   | -2,59    | -3,12  | -3,52    | -3,59   |
| PREC* | 126,94  | 52       | 107    | 179,5    | 0       |

m=metros; MED=média; MD=mediana; MOD=moda; 1ºQ=primeiro quartil; 3ºQ=terceiro quartil,

\*precipitação em mm.

Ao observar as médias entre todos os valores de profundidade tomados em cada poço, podemos notar menores valores dos piezômetros Passarinho baixo e Passarinho médio, o que significa que o lençol freático está mais próximo da superfície. O que explica esses valores é o fato de esses poços estarem mais próximos do leito do rio, o que faz com que os níveis sejam mais superficiais em relação ao Passarinho alto, ligeiramente mais afastado. Os três poços estão instalados em uma toposequência perpendicular ao rio. Os piezômetros GP1 ao GP5; e GSP1 ao GSP3, mantiveram valores próximos, devido à localização próxima de instalação dos grupos de poços na área.

O Ribeirão Água do Bugre apresenta cotas mais altas e os níveis freáticos mais baixos quando comparado aos outros piezômetros.

#### **4.1.2 Medidas de dispersão amostral**

Em relação ao desvio padrão e ao coeficiente de variação, o comportamento semelhante dos dados pode ser explicado devido às características semelhantes da profundidade dos poços, todos eles não chegam a -5,0 m de profundidade.

Os poços AB1, AB2, AB3, AB4 e AB5 (Tabela 4) apresentaram maior amplitude total. Esses poços apresentaram os níveis mais baixos em relação aos outros poços. A hipótese é que devido ao atraso na recarga do aquífero, a amplitude dos níveis pode ter variado muito nos últimos meses.

Tabela 4. Medidas de dispersão amostral calculadas para as séries temporais de flutuação de níveis freáticos para o período de dezembro de 2010 a março de 2015 e precipitação no período de janeiro de 1987 a fevereiro de 2015.

| DADOS | CV (%) | DP    | MIN (m) | MAX (m) | AMP   |
|-------|--------|-------|---------|---------|-------|
| P1    | 0,38   | 0,24  | -0,16   | -1,09   | -0,93 |
| P2    | 4,16   | 0,15  | -0,24   | -0,30   | -0,54 |
| P3    | -1,51  | 0,08  | -0,30   | -0,19   | -0,49 |
| GP1   | 31     | 0,54  | -0,52   | -2,62   | -2,10 |
| GP2   | 34     | 0,60  | -0,53   | -3,13   | -2,60 |
| GP3   | 32     | 0,54  | -0,51   | -2,62   | -2,11 |
| GP4   | 31     | 0,54  | -0,52   | -2,55   | -2,03 |
| GP5   | 30     | 0,54  | -0,53   | -2,54   | -2,01 |
| GSP1  | 28     | 0,37  | -0,91   | -2,01   | -1,10 |
| GSP2  | 28     | 0,39  | -0,49   | -2,05   | -1,56 |
| GSP3  | 25     | 0,36  | -0,57   | -1,92   | -1,35 |
| AB1   | 25     | 0,77  | -1,26   | -4,31   | -3,05 |
| AB2   | 25     | 0,74  | -1,24   | -3,98   | -2,74 |
| AB3   | 25     | 0,76  | -1,24   | -4,31   | -3,07 |
| AB4   | 25     | 0,76  | -1,23   | -4,27   | -3,04 |
| AB5   | 23     | 0,70  | -1,20   | -4,46   | -3,26 |
| PREC* | 78     | 99,61 | 0       | 546     | 546   |

m=metros; DP=desvio padrão; CV= coeficiente de variação; MAX.= valor máximo; MIN.= valor mínimo; AMP= amplitude; \*precipitação em mm.

A precipitação mensal apresentou dados dispersos, o desvio padrão chegou a 99,61, e a amplitude total foi de 546,00 mm/mês, essa dispersão é comum devido as maiores variações do clima, portanto em uma série de mais de 20 anos como é o caso da precipitação, esses valores dispersos já eram esperados.

#### 4.2 Avaliação dos resultados das séries históricas

As séries temporais foram analisadas através dos gráficos de função de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) gerados no software estatístico Minitab. Esse procedimento auxilia na definição do tipo de processo que caracteriza a série (Soldara, 2013). As Figuras 9 a 24 mostram visualmente essas variáveis.

Os poços AB1, AB2, AB3, AB4, AB5 e P2 mostram o mesmo grau de dependência até o instante  $t_3$  e a partir do  $t_4$  passam a decair. Os poços GP1, GP2, GP3, GP4 e GSP1, GSP2, GSP3, P1 e P3 apresentam autocorrelação até o instante  $t_2$ , todas as FAC atuaram abaixo do intervalo de confiança de 95%. Esses processos podem ser interpretados como autorregressivos (AR) de ordem 3 e 2, pois um instante de tempo é dependente de uma ou mais observações (Nava, 2013). Essa dependência dos dados pode

ser baixa devido a interrupções na série de dados e da ausência de dados em alguns instantes da série. Entretanto, a precipitação incidente em determinado instante de tempo influenciou as alterações nos níveis freáticos a partir de um instante  $t$ , havendo um impulso e uma resposta dos níveis. Mas essa influência foi se perdendo com o tempo, pois o papel desse impulso da precipitação nos níveis já foi efetuado (Soldara, 2013).

A função de autocorrelação parcial (FACP) pode ser definida como a sequência de correlações de uma série temporal ( $Z_t$  e  $Z_{t-1}$ ), ( $Z_t$  e  $Z_{t-2}$ ), ( $Z_t$  e  $Z_{t-3}$ ) e assim por diante, com os efeitos de defasagens anteriores sobre  $Z_t$  constantes (Magalhães, 2006). Essa função é um diagnóstico complementar às FAC em relação à ordem do processo apurado. Nesta análise, todos os poços apresentaram um valor alto no instante  $t_1$ , o que indica que a ordem do processo é de primeira ordem (AR(1)) e a correlação dos poços variou entre 0,6 a pouco mais de 0,8. Após isso essa correlação decai rapidamente. A hipótese nesse caso, é que, devido à baixa profundidade (entre 4,0 a 7,0 m de profundidade), os poços têm impulsos e respostas rápidas da precipitação. O que provoca as pequenas alterações de um poço para outro pode ser o tipo de vegetação e o relevo local.

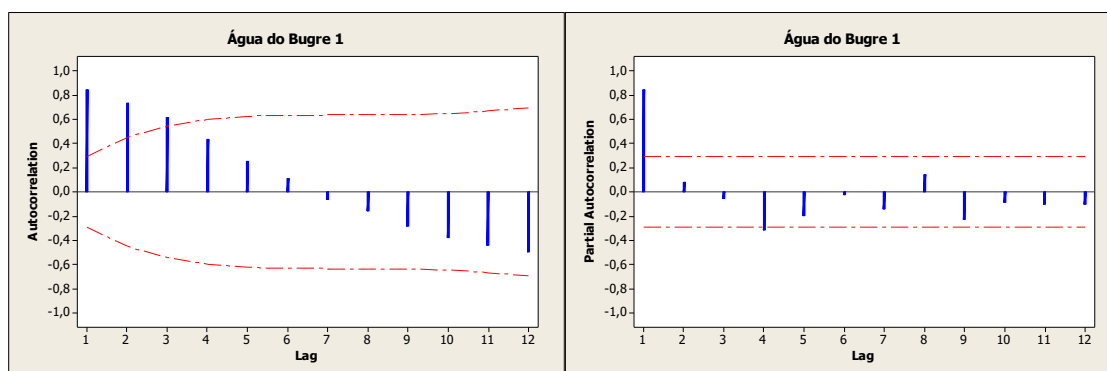


Figura 9. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço da Água do Bugre 1.

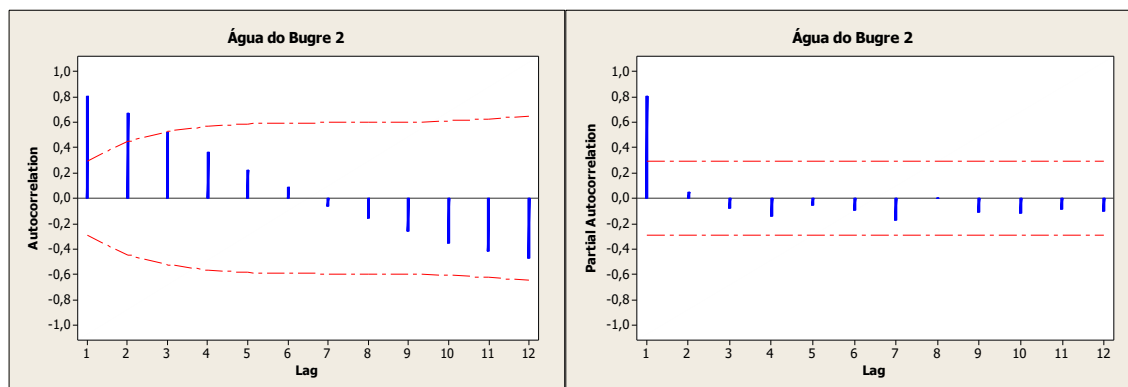


Figura 10. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço da Água do Bugre 2.

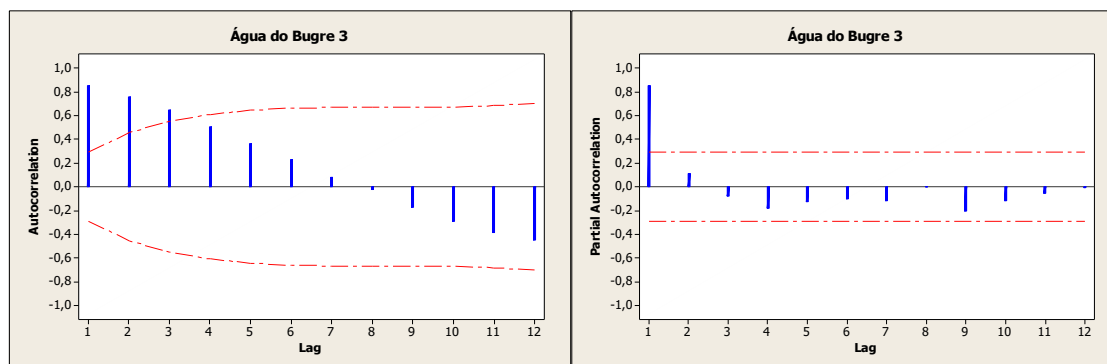


Figura 11. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço de Água do Bugre 3.

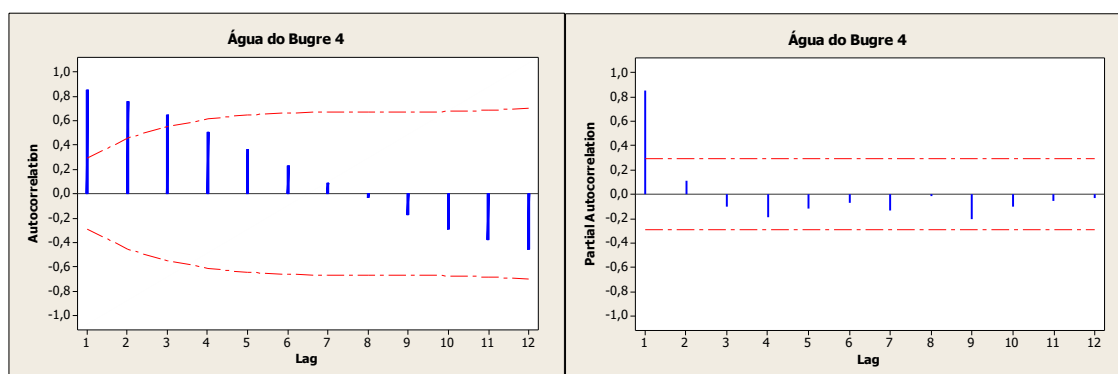


Figura 12. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço de Água do Bugre 4.

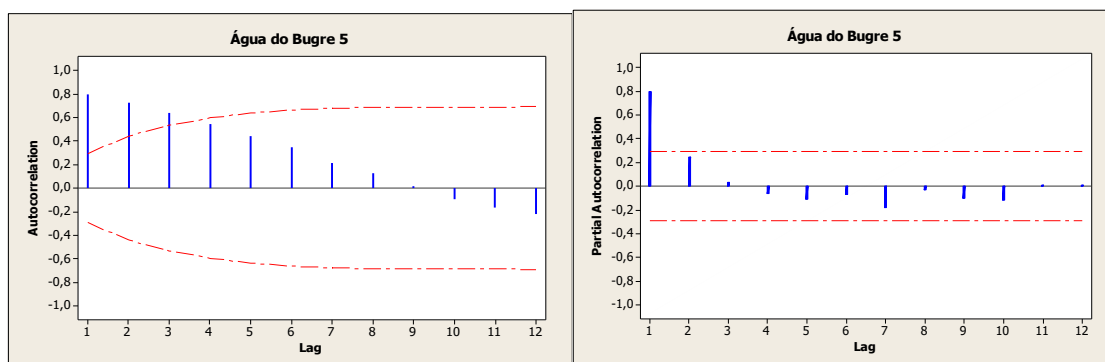


Figura 13. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço de Água do Bugre 5.

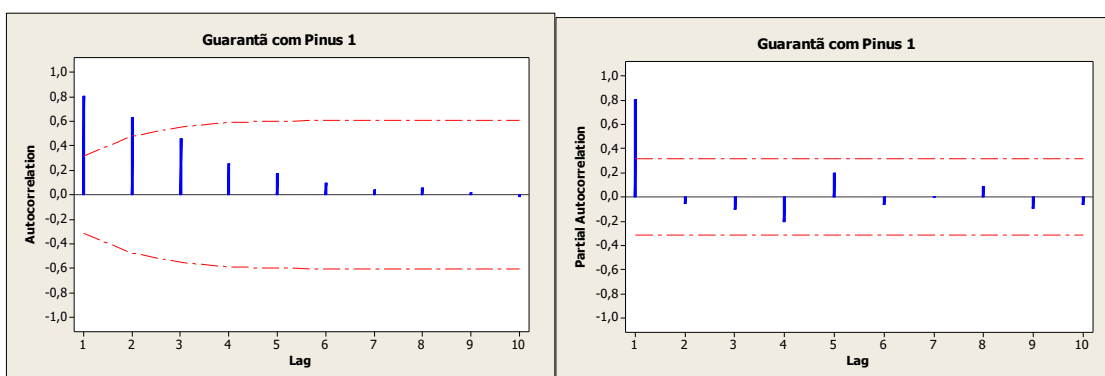


Figura 14. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço Guarantã com Pinus 1.

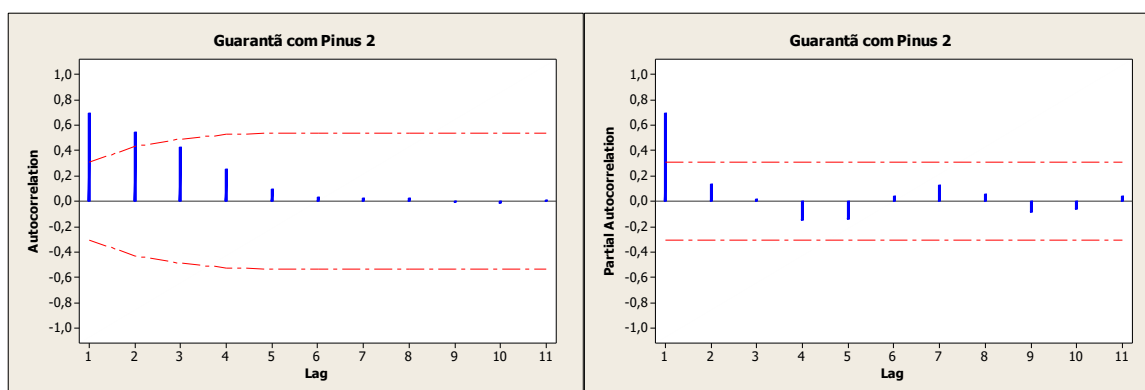


Figura 15. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço Guarantã com Pinus 2.

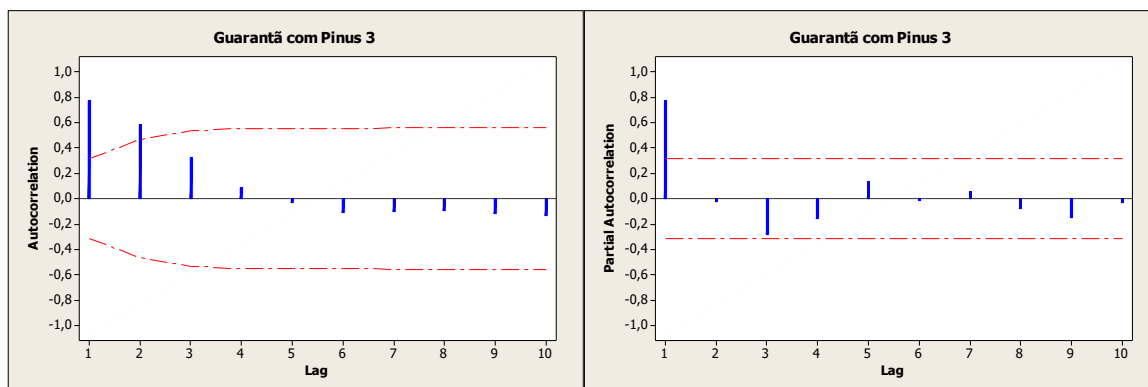


Figura 16. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço Guarantã com Pinus 3.

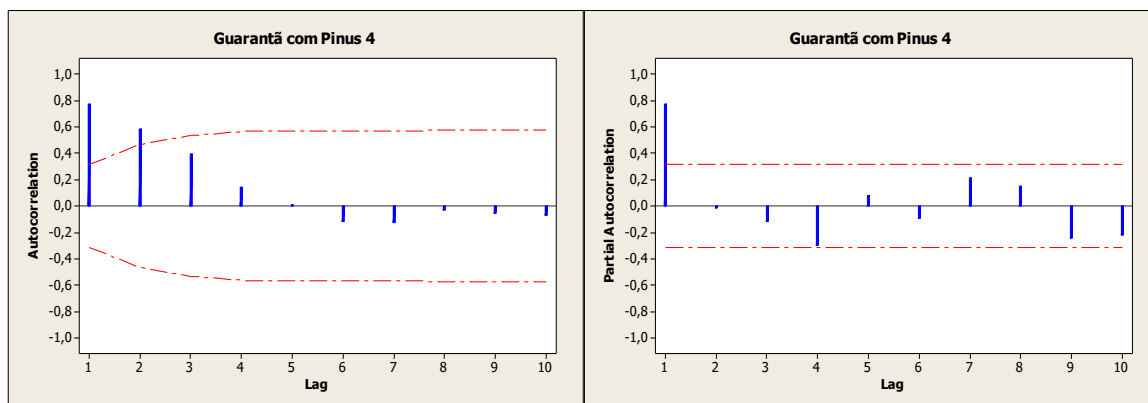


Figura 17. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço Guarantã com Pinus 4.

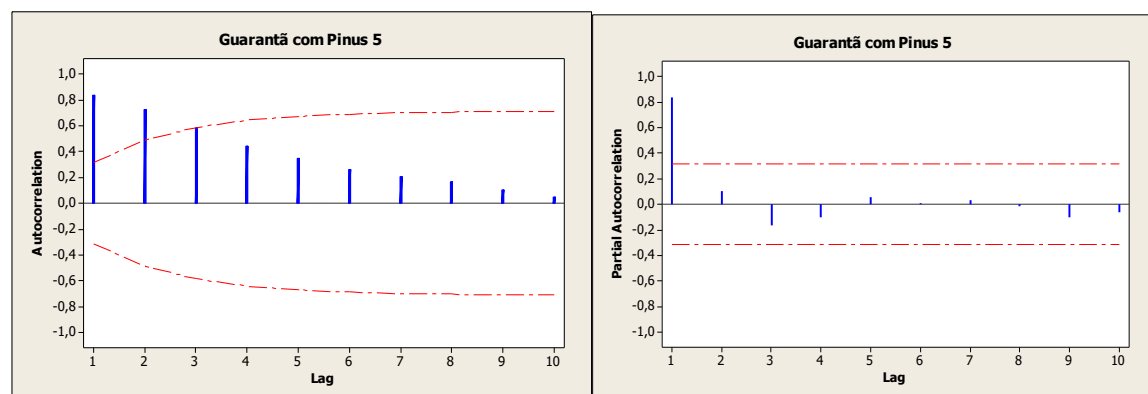


Figura 18. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço Guarantã com Pinus 5.

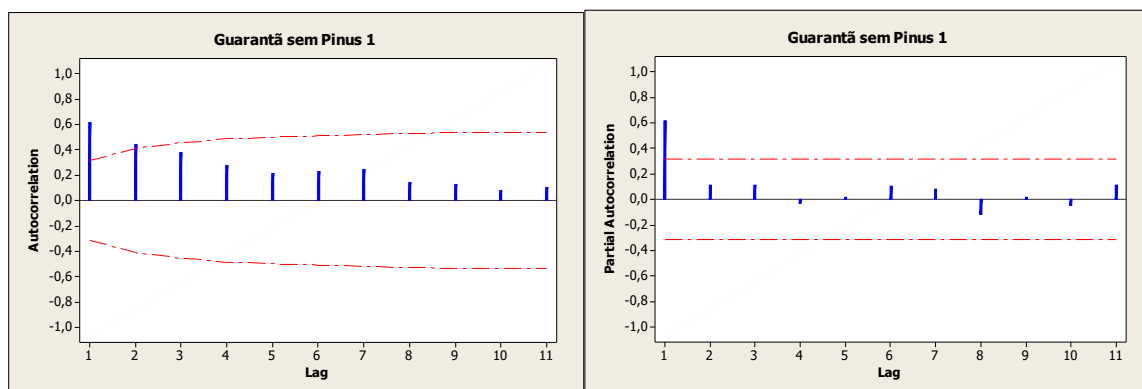


Figura 19. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço Guarantã sem Pinus 1.

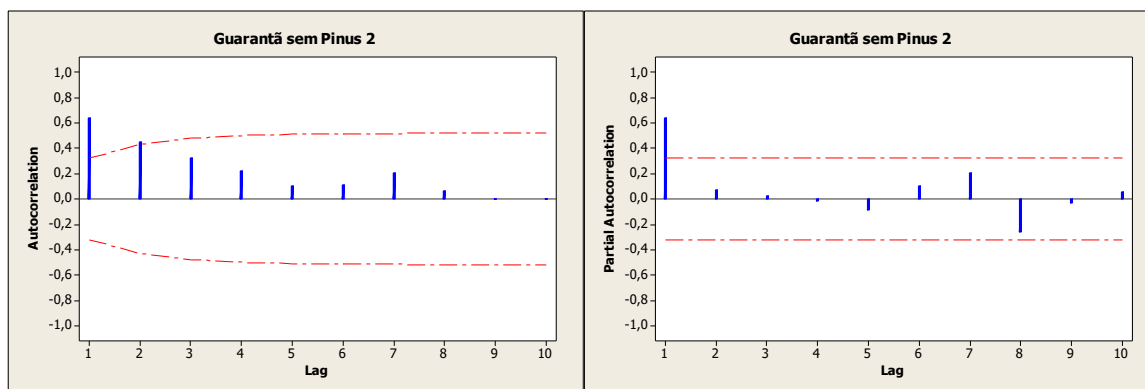


Figura 20. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço Guarantã sem Pinus 2.

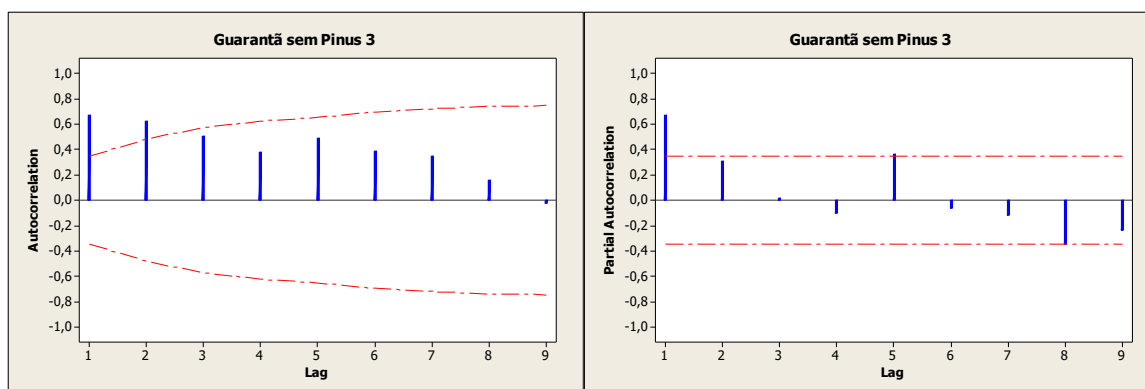


Figura 21. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço Guarantã sem Pinus 3.

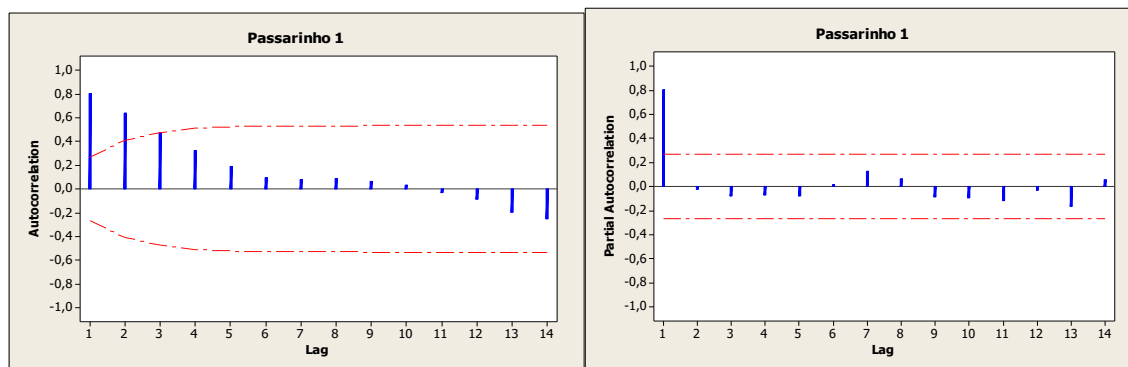


Figura 22. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço Passarinho 1.

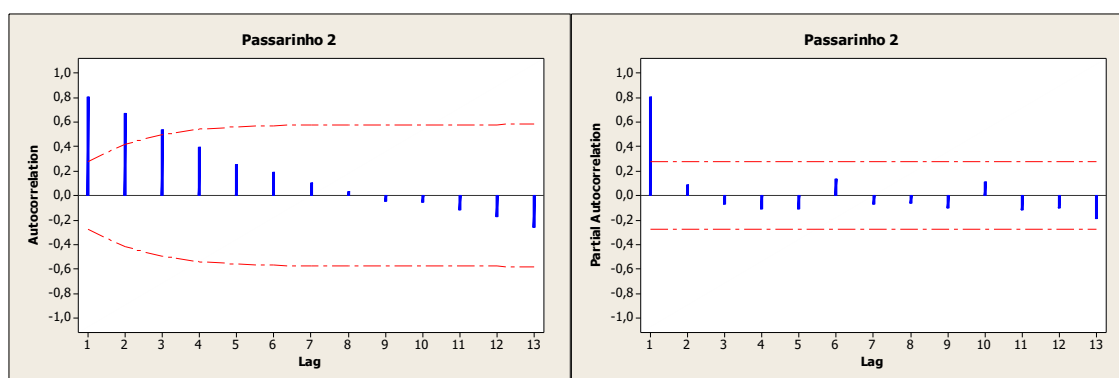


Figura 23. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço Passarinho 2.

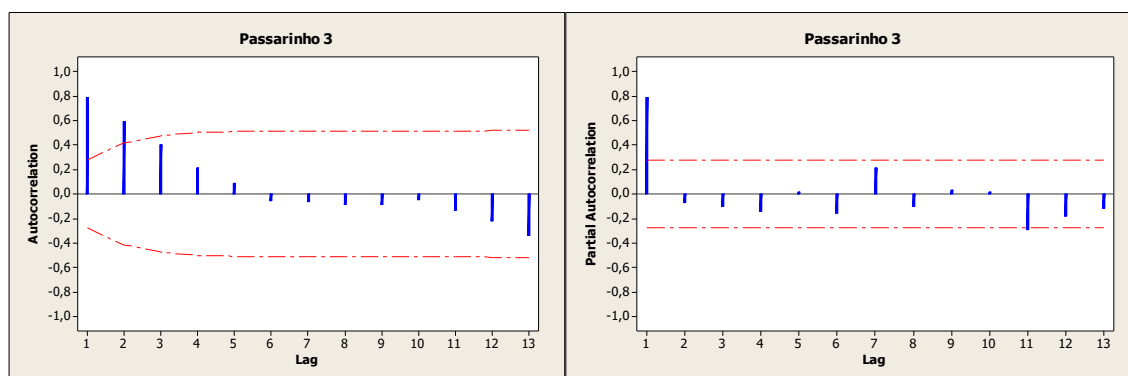


Figura 24. Funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) para o poço Passarinho 3.

#### 4.3 Avaliação dos resultados da modelagem das séries temporais

As séries temporais foram avaliadas através da análise de hidrogramas dos poços de monitoramento instalados na bacia hidrográfica Água do Bugre, Córrego da Divisa e Passarinho. O monitoramento dos níveis freáticos teve início em março de 2010 e

compôs uma série histórica contínua até março de 2015, totalizando cinco anos de monitoramento. Os dados de pluviosidade foram coletados pela equipe da EECsB em um pluviômetro manual, que forneceu dados referentes a precipitação no período entre janeiro de 1987 a fevereiro de 2015.

O software HARTT gerou hidrogramas com os resultados da análise de regressão. Esses hidrogramas exibem o cálculo com o melhor ajuste e um gráfico mostrando a curva ajustada e o efeito da precipitação juntamente com as leituras de níveis freáticos (Ferdowsian et al., 2001).

Através dos hidrogramas gerados foi possível 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). Os efeitos da precipitação sobre os níveis freáticos são estimados separadamente para cada poço, selecionando o valor que resulta no melhor ajuste para a regressão. Portanto, o atraso calculado 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. Em muitos casos, o melhor ajuste de atraso é maior que o primeiro impacto detectado (Ferdowsian et al., 2001). A Tabela 5 mostra os resultados estatísticos dos hidrogramas gerados.

O atraso calculado pelo modelo para os poços P1, P2, P3 GSP2 e GSP3 foi de 0 meses, já para os demais poços GP1, GP2, GP3, GP4, GP5, GSP1, AB1, AB2, AB3, AB4 e AB5 foi de um mês para cada poço. A partir da mensuração desses atrasos, pôde-se inferir sobre a memória do sistema hidrogeológico local, ou seja, qual o tempo entre um evento de precipitação e uma resposta do nível freático (Manziona et al., 2010). Uma vez que existe um elevado número de nascentes na região, os poços não são muito profundos e consequentemente os níveis são superficiais, espera-se uma rápida resposta da oscilação após eventos de precipitação.

Tabela 5. Estatísticas com o melhor ajuste dos dados no modelo HARTT

| Piezômetro | Atraso (meses) | $R^2$ (%) | Intercepto | X1<br>Precipitação (mm) | X2<br>Tempo (meses) | Profundidade Inicial (m) | Profundidade Final (m) |
|------------|----------------|-----------|------------|-------------------------|---------------------|--------------------------|------------------------|
| P1         | 0              | 64        | -1,00776   | 0,00080                 | -0,01392            | -0,92                    | -1,74                  |
| P2         | 0              | 64        | -0,53064   | 0,00048                 | -0,00848            | -0,48                    | -0,97                  |
| P3         | 0              | 50        | -0,56858   | 0,00027                 | -0,00374            | -0,62                    | -0,7                   |
| GP1        | 1              | 84        | -1,53480   | 0,00238                 | -0,02438            | -1,71                    | -1,87                  |
| GP2        | 1              | 75        | -1,44309   | 0,00229                 | -0,02182            | -2,38                    | -1,83                  |
| GP3        | 1              | 73        | -1,44092   | 0,00227                 | -0,02512            | -1,67                    | -1,92                  |
| GP4        | 1              | 77        | -1,49254   | 0,00237                 | -0,02476            | -1,67                    | -1,89                  |
| GP5        | 1              | 75        | -1,83126   | 0,00197                 | 0,00355             | -2,04                    | -1,11                  |
| GSP1       | 1              | 61        | -1,37556   | 0,00117                 | 0,00075             | -1,28                    | -1,21                  |
| GSP2       | 0              | 67        | -1,34098   | 0,00135                 | -0,00669            | -1,56                    | -1,33                  |
| GSP3       | 0              | 72        | -1,41257   | 0,00123                 | 0,00084             | -1,41                    | -1,05                  |
| AB1        | 1              | 85        | -1,07234   | 0,00460                 | -0,07114            | -2,67                    | -3,53                  |
| AB2        | 1              | 79        | -1,69524   | 0,00325                 | -0,04697            | -2,91                    | -3,18                  |
| AB3        | 1              | 85        | -1,90742   | 0,00432                 | -0,05163            | -3,26                    | -3,51                  |
| AB4        | 1              | 85        | -1,90570   | 0,00431                 | -0,05139            | -3,25                    | -3,51                  |
| AB5        | 1              | 84        | -2,37730   | 0,00379                 | -0,03125            | -3,87                    | -2,94                  |

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

O melhor ajuste encontrado para os poços P1, P2, P3 GSP2 e GSP3, foi de 64% para os poços P1 e P2, 50% para o poço P3 e 68% e 72% para o GSP2 e GSP3 respectivamente. Isso significa que no modelo a precipitação acumulada é capaz de explicar nesses valores percentuais parte das oscilações dos níveis freáticos no período. Os ajustes dos demais poços foram respectivamente GP1 84%, GP2 75%, GP3 73%, GP4 77%, GP5 75%, GSP1 61%, AB1 85%, AB2 79%, AB3 85%, AB4 85% e AB5 84%. De forma geral, os piezômetros com um mês de atraso, se ajustaram mais ao modelo, o piezômetro que melhor se ajustou foi AB1, onde 85% das oscilações podem ser explicadas através do modelo HARTT. Já o poço que menos se ajustou ao modelo nesse conjunto de dados, foi o poço P3 com 50% de ajuste. Nesse caso, a proximidade do rio faz com que outros fatores como a conexão hidráulica entre o rio e o aquífero influencie mais a variação dos níveis do que propriamente a precipitação. O mesmo caso foi observado por Soldara e Manzione (2012) em área do SAB no município de Assis/SP, onde a variação de nível em poços próximos a um rio não podia ser completamente explicada pela precipitação e pela evapotranspiração.

Apesar de a profundidade final ser maior para a maioria dos poços como se pode observar na Tabela 5, a tendência de oscilação é positiva para a maioria dos poços durante o período estudado, isso pode ocorrer devido à rápida variação dos níveis.

As Figuras 25 a 40 mostram o ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para todos os poços no período de março de 2010 a março de 2015.

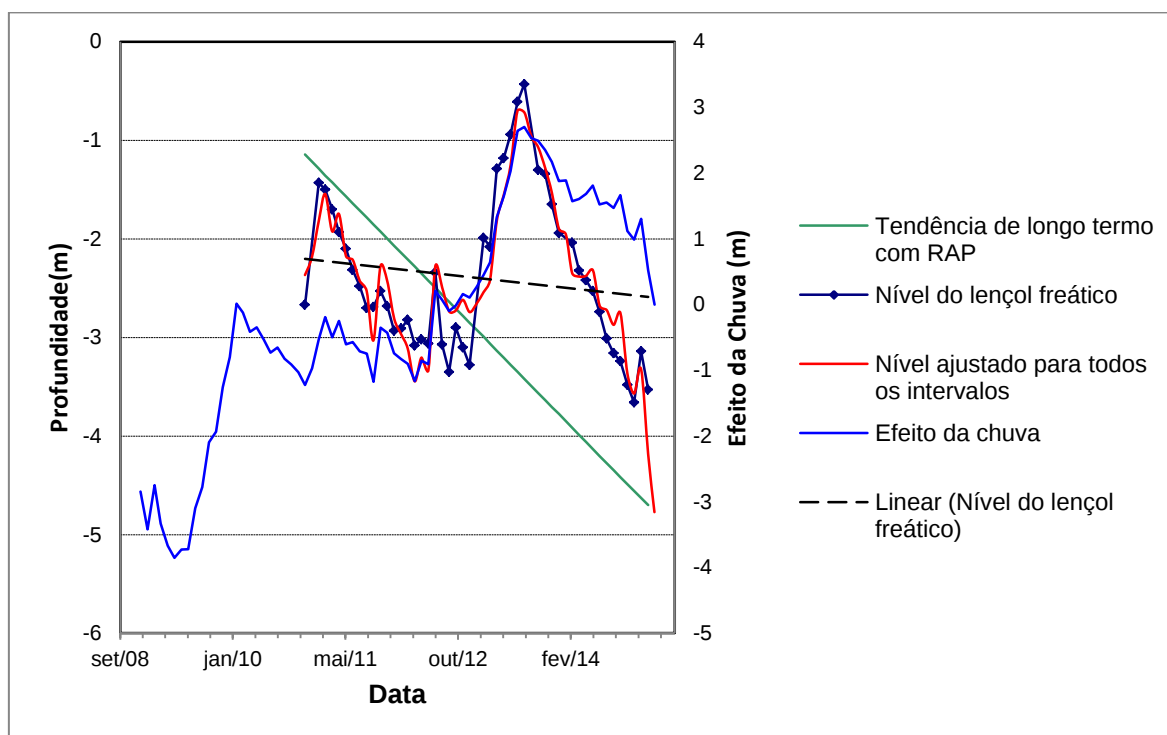


Figura 25. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço AB1 no período de dezembro de 2010 a março de 2015.

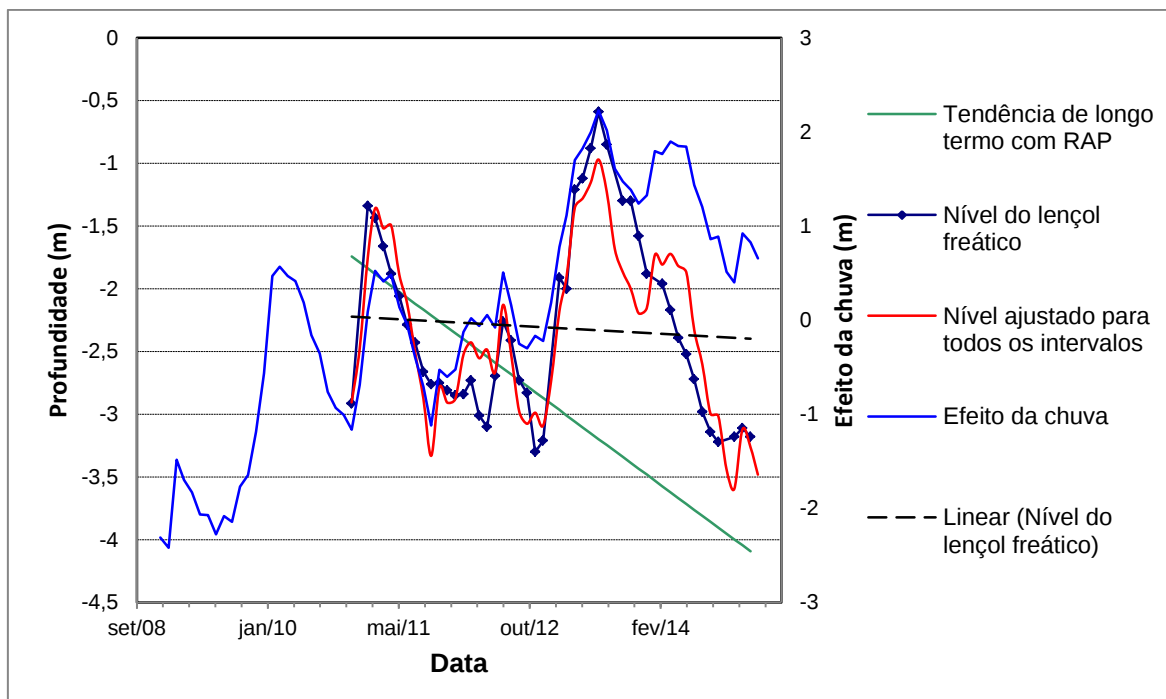


Figura 26. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço AB2 no período de dezembro de 2010 a março de 2015.

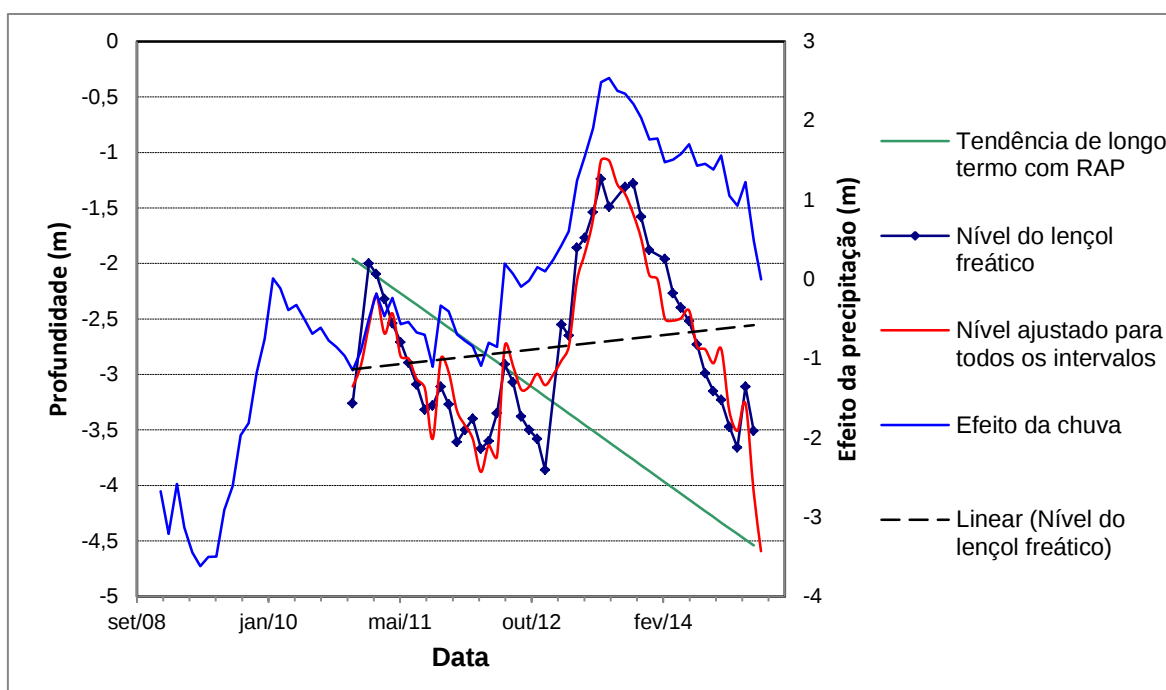


Figura 27. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço AB3 no período de dezembro de 2010 a março de 2015.

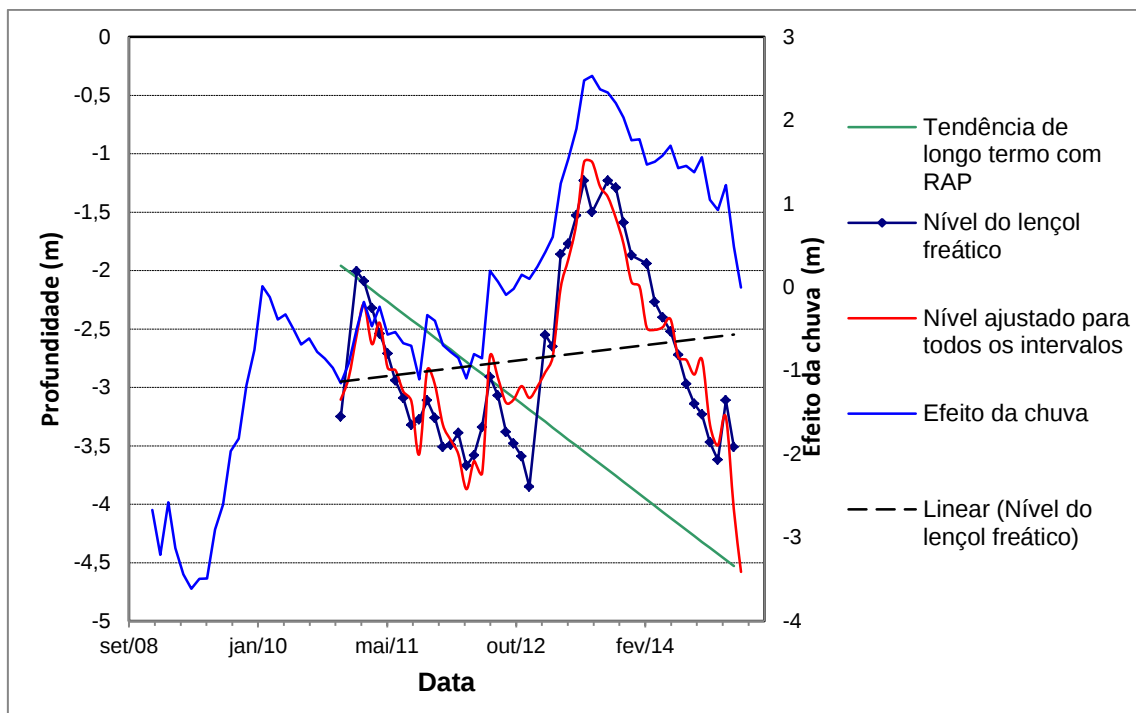


Figura 28. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço AB4 no período de dezembro de 2010 a março de 2015.

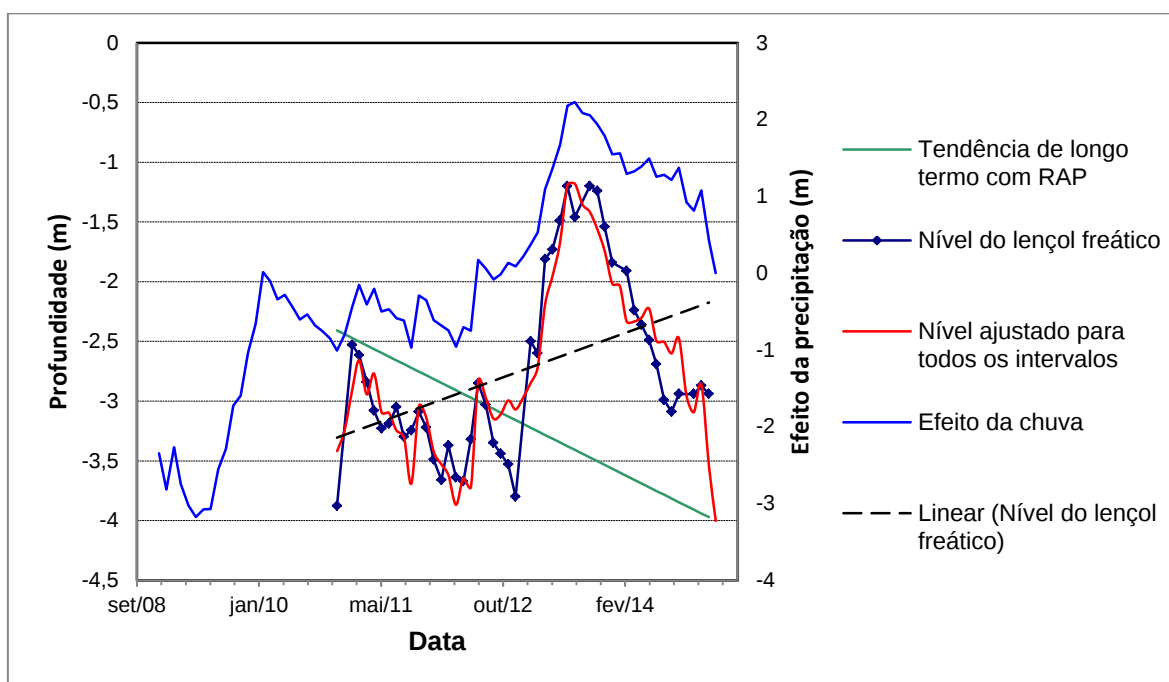


Figura 29. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço AB5 no período de dezembro de 2010 a março de 2015.

Os piezômetros localizados na bacia da Água do Bugre estão em uma área onde até 2010 havia 3 ha de invasão de Pinus ao redor dos poços, espécie que posteriormente foi erradicada da área. Esses poços apresentaram os níveis mais baixos em relação aos demais poços, mas também apresentaram amplitudes mais altas nessas variações, que podem ter ocorrido devido à rápida resposta do solo arenoso em um evento de chuva.

Esses piezômetros acompanharam as rápidas variações na precipitação ao longo do tempo, decaindo em períodos de seca e aumentando nos meses mais chuvosos. O manejo da vegetação também pode ter provocado um pico na elevação do lençol freático como pode ser verificado na Figura 29. Com a ausência do Pinus, a precipitação passou a não ser interceptada pela copa das árvores e por seu sistema radicular, possibilitando que a precipitação infiltrasse diretamente no aquífero provocando uma resposta imediata no aumento dos níveis freáticos.

A tendência de queda nos níveis freáticos acompanhou a queda no regime pluviométrico na EECsB, uma vez que entre os anos de 2014 e 2015 houve um período de seca no Estado de São Paulo, como se pode observar, todos os piezômetros do Ribeirão Água do Bugre sofreram queda nos níveis nesse período, assim como os demais piezômetros monitorados na EECsB.

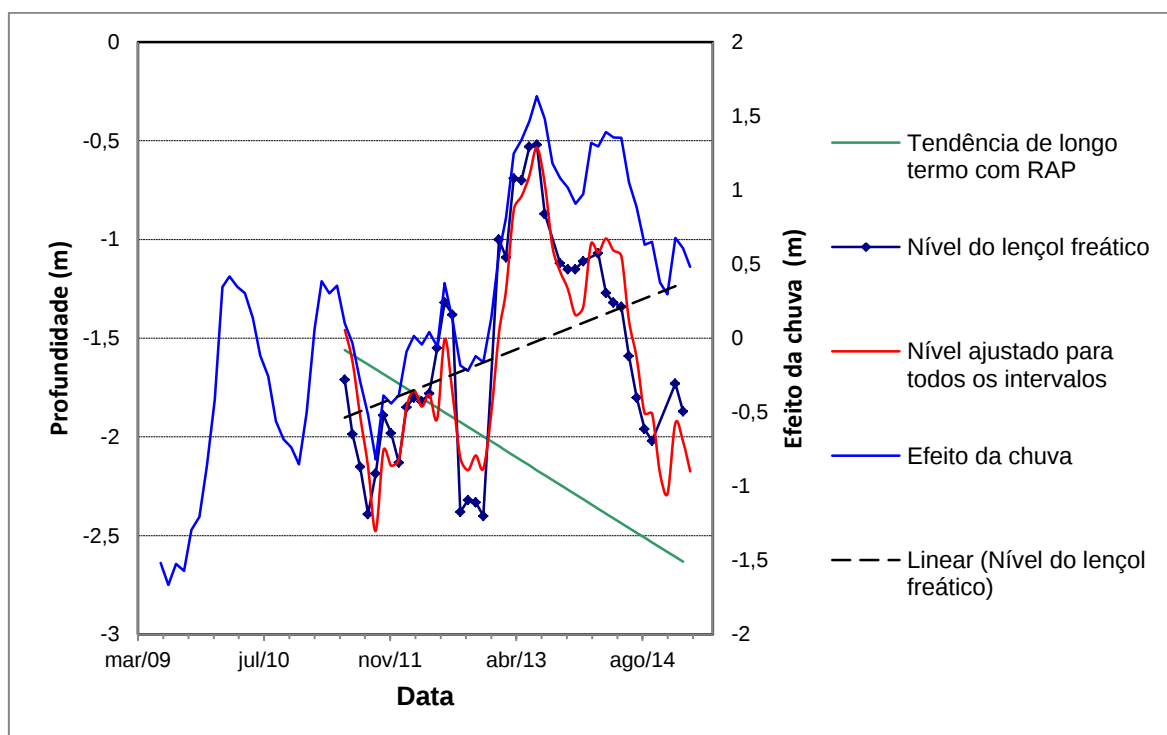


Figura 30. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço GP1 no período de dezembro de 2010 a março de 2015.

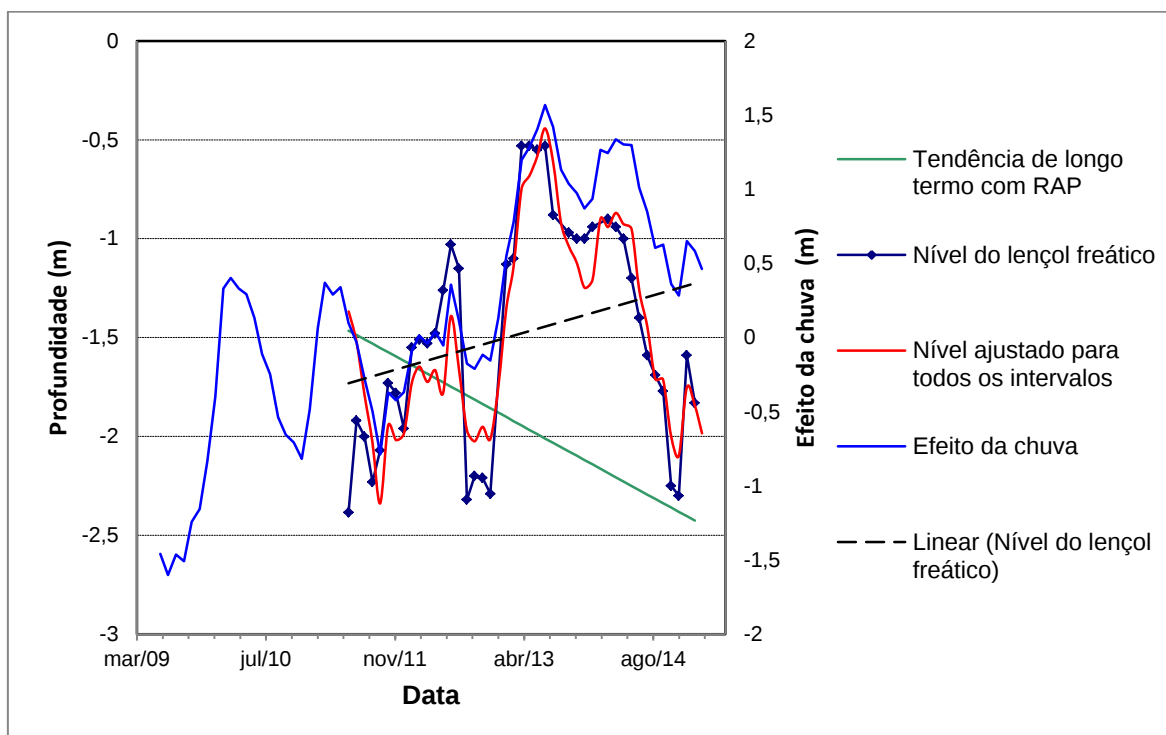


Figura 31. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço GP2 no período de dezembro de 2010 a março de 2015.

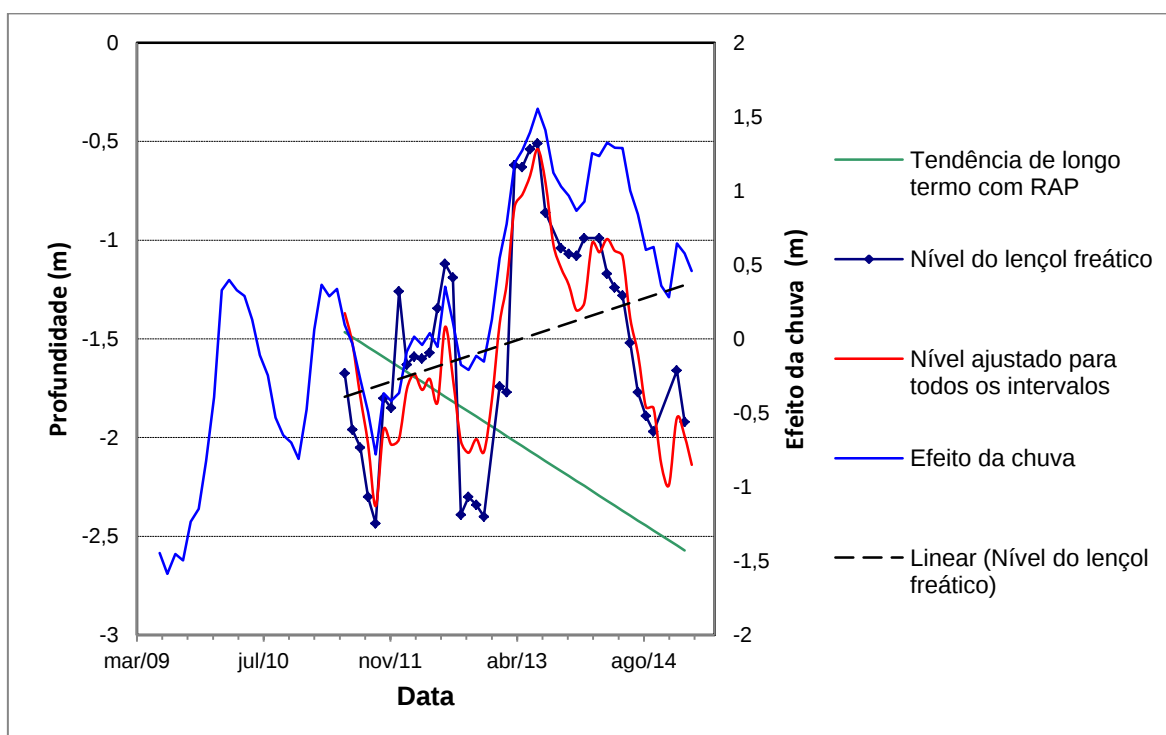


Figura 32. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço GP3 no período de dezembro de 2010 a março de 2015.

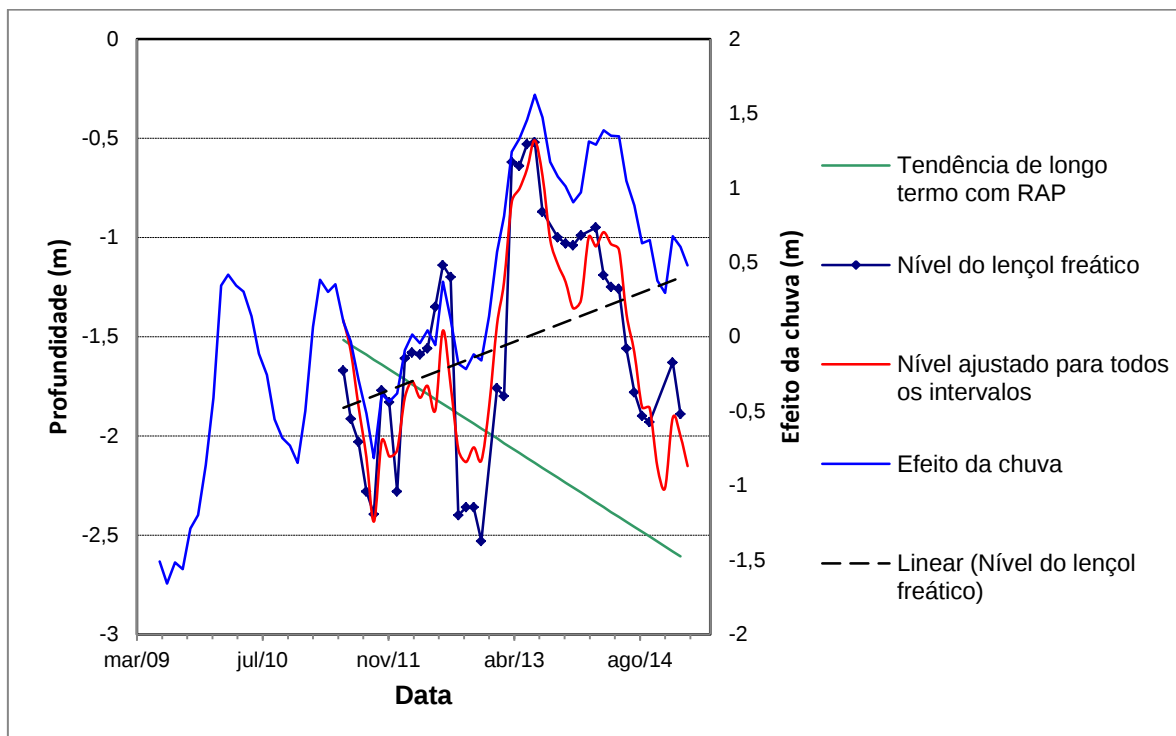


Figura 33. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço GP4 no período de dezembro de 2010 a março de 2015.

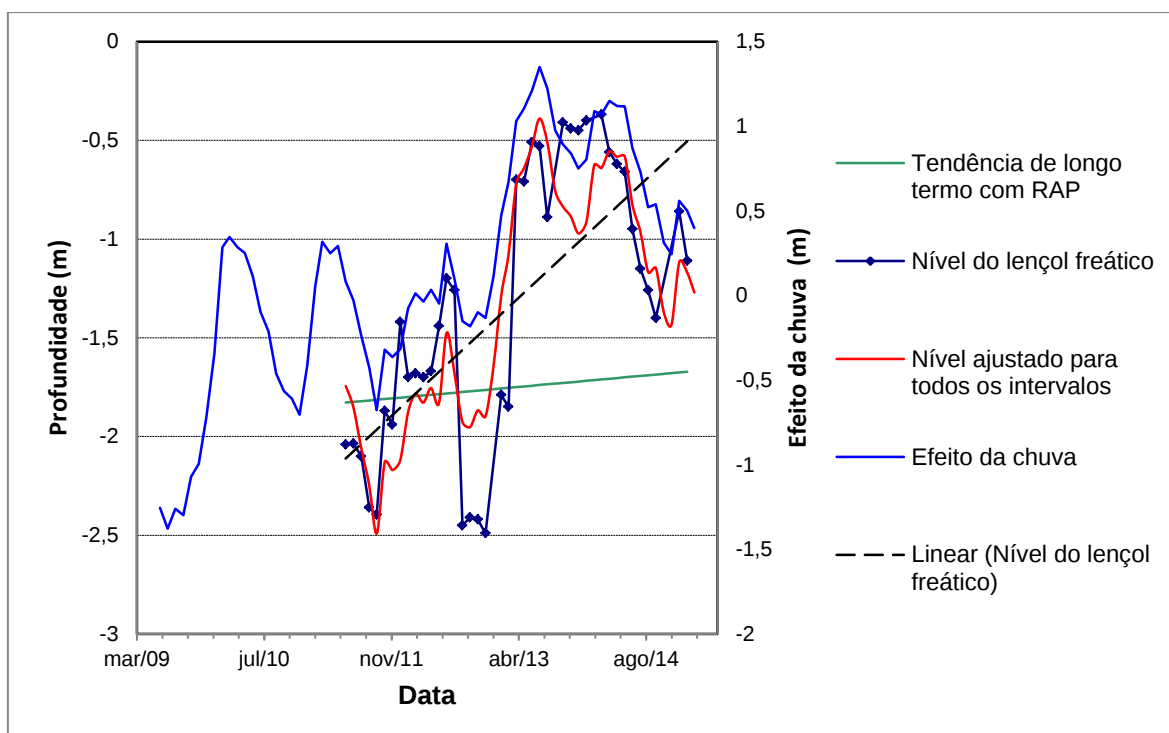


Figura 34. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço GP5 no período de dezembro de 2010 a março de 2015.

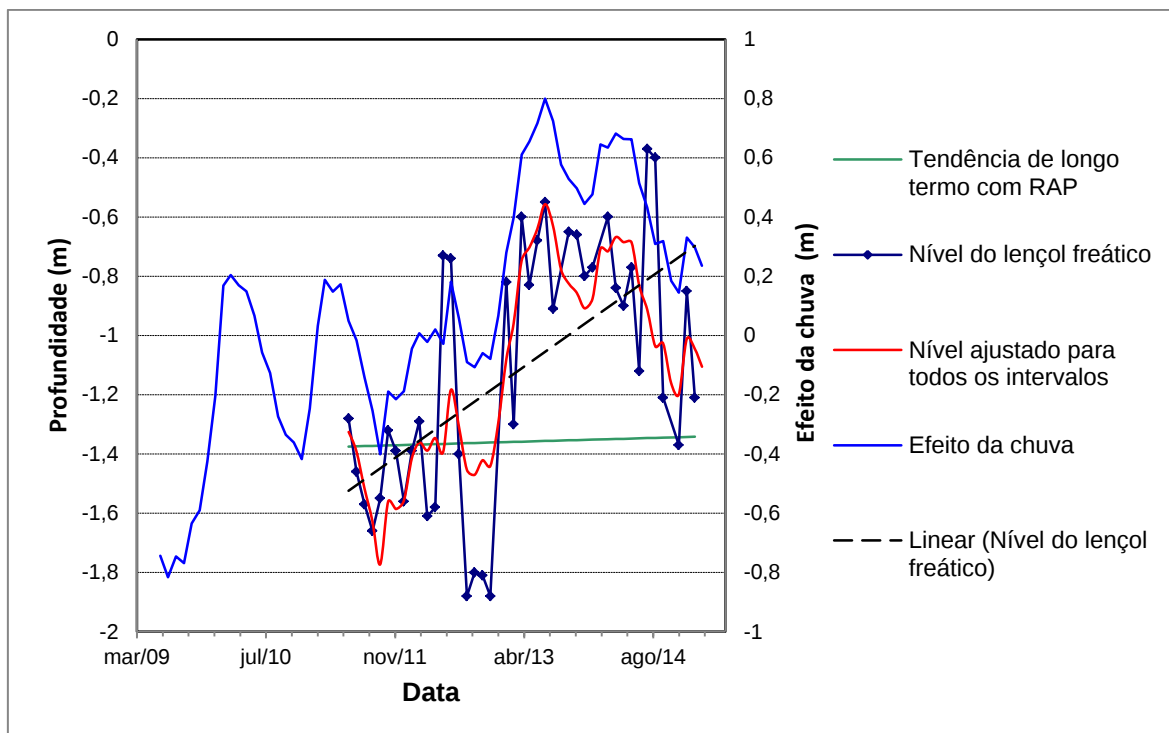


Figura 35. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço GSP1 no período de dezembro de 2010 a março de 2015.

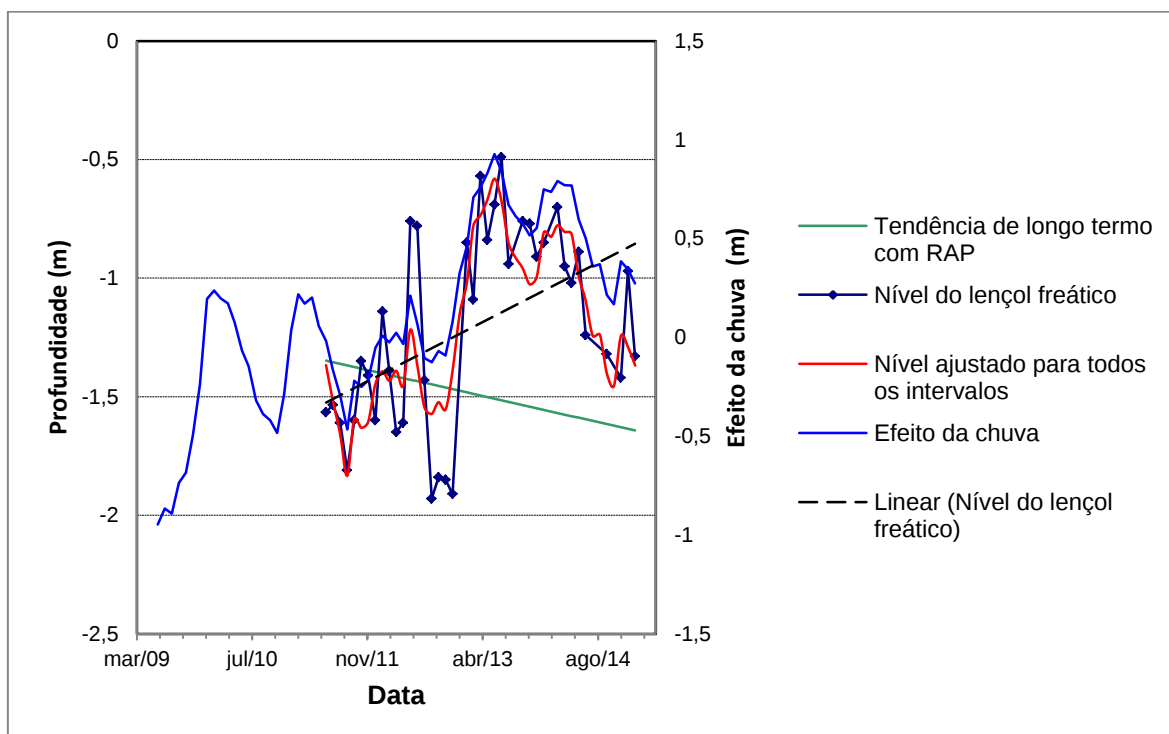


Figura 36. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço GSP2 no período de dezembro de 2010 a março de 2015.

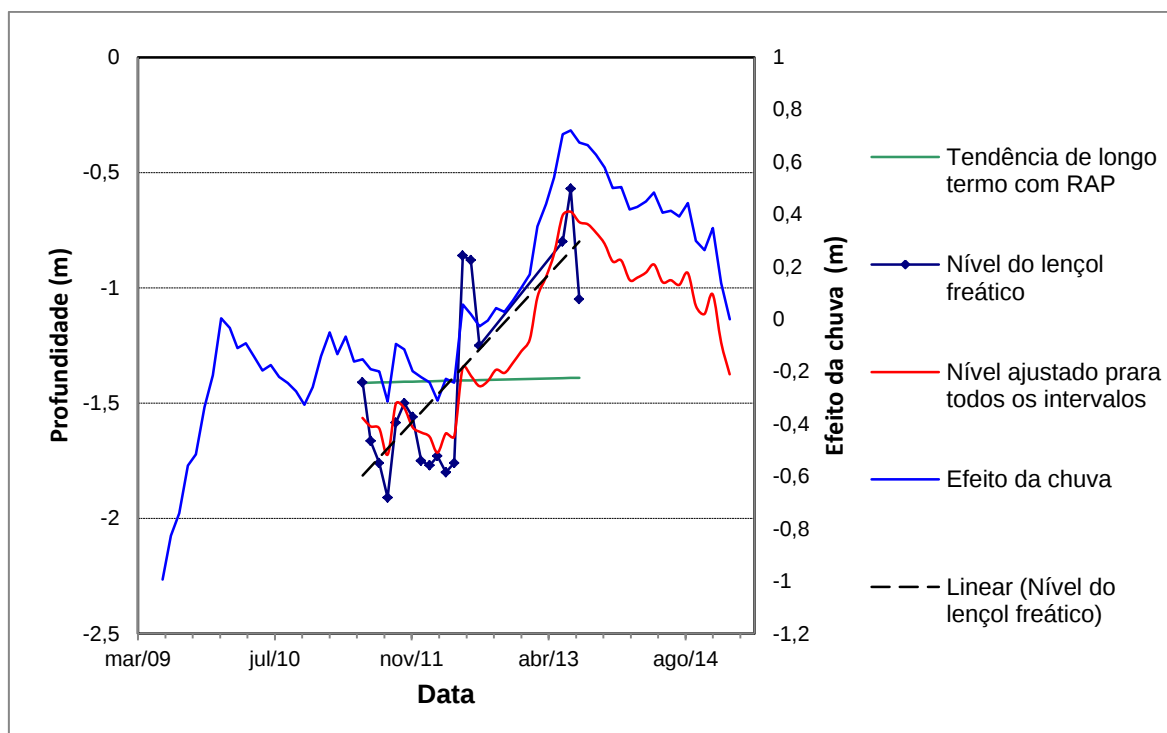


Figura 37. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço GSP3 no período de dezembro de 2010 a março de 2015.

Os poços GP1 a GSP3 se encontram em locais onde a vegetação nativa é o Campo Cerrado. Até julho de 2011 os poços GP1 a GP4, estavam em uma área de invasão por Pinus. Em agosto de 2011 houve um incêndio acidental que queimou cerca de 500 ha, praticamente toda a vegetação que havia, reduzindo a interceptação e a evapotranspiração (Durigan, 2015). Portanto, esse evento contribuiu para o comportamento do aquífero, uma vez que a sem a interceptação das árvores combinada ao solo arenoso, à resposta da elevação do nível freático nesses poços é imediata.

Nas Figuras 30 a 37, houve um pico na elevação dos níveis a partir de 2011, e daí por diante passam a acompanhar os eventos de precipitação. Em 2013 as árvores de Pinus que haviam sobrevivido ao incêndio de 2011 foram cortadas, e à medida que a vegetação cresceu novamente, ela passa a exercer influência nos níveis dos poços seguem em queda lentamente.

Outro fator que pode influenciar é o sistema radicular formado pelo Pinus remanescente do incêndio que volta a crescer. Essa interceptação através das raízes contribui para diminuir a taxa de recarga, retirando do solo grande parte da água que infiltra e se movimenta pela zona saturada. Essas modificações na vegetação geram alterações no ciclo hidrológico local.

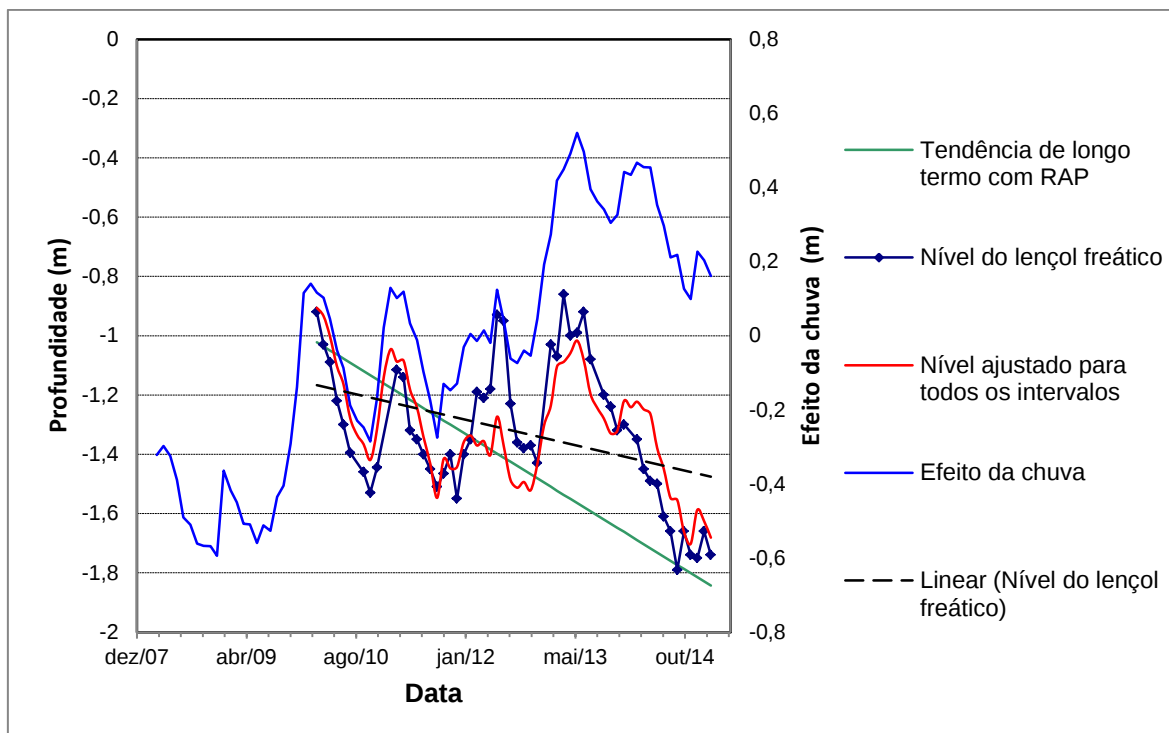


Figura 38. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço P1 no período de março de 2010 a março de 2015.

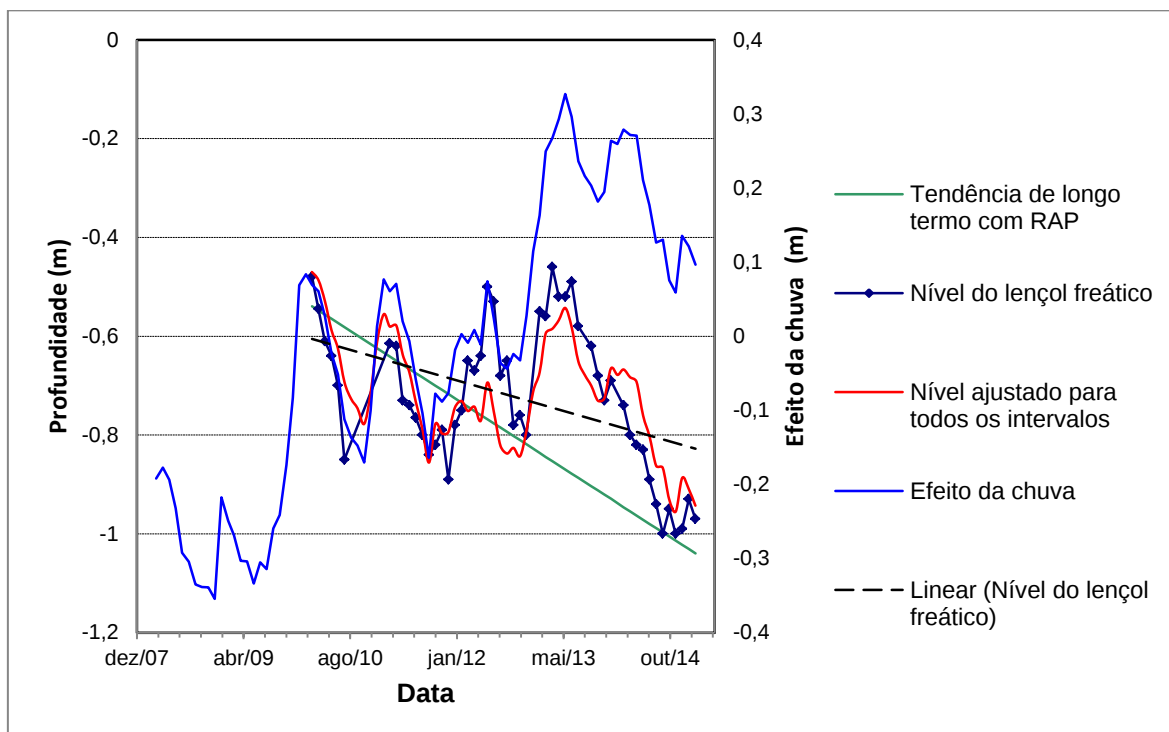


Figura 39. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço P2 no período de março de 2010 a março de 2015.

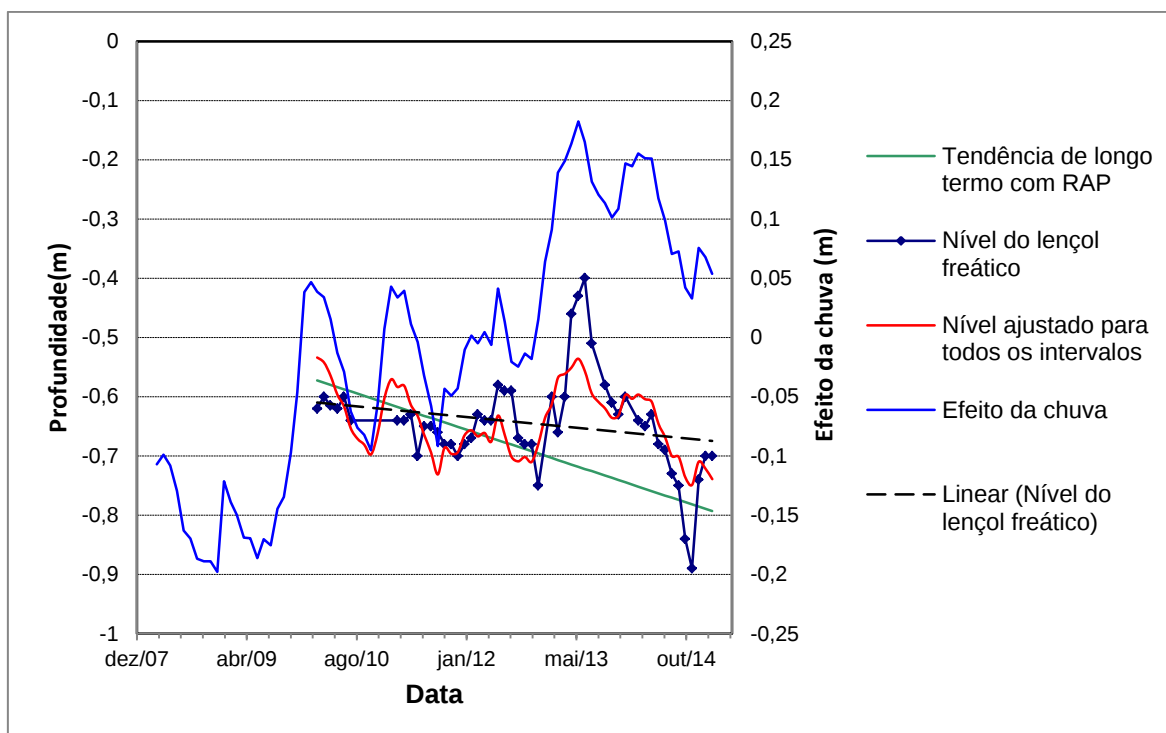


Figura 40. Ajuste realizado para os dados de oscilação do nível freático e precipitação do SAB para o poço P3 no período de março de 2010 a março de 2015.

Os poços do Ribeirão Passarinho estão instalados em uma área com uma grande quantidade de nascentes, onde o Pinus avança lentamente. Para tendências futuras, existe a possibilidade de que a planta extraia água diretamente do aquífero, podendo impactar na flutuação do lençol freático.

De modo geral, os níveis dos piezômetros acompanharam o regime de precipitação, que tem como características um momento de pico e queda na série de dados, quando há maior índice pluviométrico os níveis aumentam e os níveis freáticos também, e quando o índice pluviométrico registra menores valores o nível decresce. Alguns piezômetros apresentam resposta imediata nos níveis em relação à precipitação. Outros um pequeno atraso de um mês, sendo esse foi o comportamento geral dos poços, quanto maior a profundidade dos poços, maior é o atraso da recarga.

A topografia local também pode ser uma condicionante nas alterações dos níveis freáticos. Os piezômetros da bacia da Água do Bugre estão em áreas mais altas da EECSB, e apresentam os menores níveis e as maiores amplitudes de níveis freáticos. Pesquisas mais detalhadas podem confirmar ou refutar essas hipóteses.

A espessura da zona saturada não foi mensurada, mas aliada ao regime pluviométrico pode influenciar na flutuação dos níveis freáticos dos piezômetros.

Lembrando que esses poços medem os níveis superficiais e, devido à sua profundidade, estão sujeitos a rápidas variações nos níveis freáticos. O elevado número de nascentes na região também atua como uma variável nos níveis do aquífero, uma vez que o escoamento subsuperficial atua na descarga de águas subterrâneas nesses copos d'água, perenizando-os mesmo em épocas de estiagem prolongada.

A rápida resposta dos níveis freáticos a eventos de precipitação denota também a facilidade de contaminação dos recursos hídricos subterrâneos em áreas como essas, devendo-se tomar precauções ao se desenvolver em atividades agrícolas ou mesmo industriais sob os domínios do SAB. Áreas frágeis e vulneráveis à poluição demandam manejo e ações diferenciadas e isso deve ser considerado pelos planejadores do uso da terra e tomadores de decisão. A comunicação de resultados como esses são fundamentais para uma gestão mais eficiente e sustentável do uso da água, em especial das águas subterrâneas.

## 5. CONCLUSÕES

Compreender o funcionamento da recarga de um aquífero fornece subsídios para a uma gestão sustentável dos recursos hídricos e uma base metodológica para o planejamento de estudos em outras áreas. Esse conhecimento nos permite avançar na compreensão de como os fenômenos climáticos assim como outras variáveis, como solo, planta ou topografia, podem interferir no regime de recarga de um aquífero e na oscilação desses níveis.

Uma vez que conhecemos detalhadamente o que pode interferir na recarga das águas subterrâneas, podemos planejar como deve ser o manejo na região estudada, e aplicar esse conhecimento em áreas urbanas ou agrícolas, por exemplo, considerando outras variáveis de acordo com as características locais, como o consumo humano, ou demanda hídrica das plantas.

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que o modelo HARTT ajustado, é capaz de explicar na maioria dos poços de monitoramento, entre 70% e 85% das oscilações dos níveis freáticos em função da precipitação acumulada, porém temos que considerar que existem outras variáveis que podem interferir na recarga e causar alterações nos níveis freáticos. Em cada ponto de monitoramento foram consideradas as características locais como a topografia, vegetação, profundidade dos poços e o uso da terra, uma vez que o modelo não foi capaz de explicar 100% as alterações no sistema hidrogeológico.

A vegetação tem influência nas oscilações dos níveis do aquífero, mas não interfere o suficiente no ciclo hidrológico para que cause grandes déficits de água no lençol freático, pois ela também ajuda a manter o ciclo hidrológico na região da EECSB. Mesmo que muitos poços não estejam nas áreas de reflorestamento com Pinus, essa vegetação pode exercer influência indiretamente nas oscilações dos níveis freáticos, embora não seja possível distinguir se as diferentes vegetações consomem a mais ou menos água do aquífero, uma vez que em várias áreas da EECSB elas se encontram na mesma área.

Esse estudo foi importante para inferir em como a precipitação podem interferir no sistema hidrogeológico. Realizar esse estudo detalhado em uma área que possui diferentes manejos de vegetação contribui para o conhecimento sistemático dos aquíferos a partir das peculiaridades locais. Recomenda-se o estudo de séries temporais mais longas, pois estas diminuem as incertezas e erros. Esses dados de monitoramento são

disponibilizados para fornecerem conhecimento das características das bacias hidrográficas e sua capacidade de suporte. A partir desses estudos os gestores podem tomar decisões e planejar qual é a capacidade local de uso desses recursos.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE FILHO, J. L. (Coord.). **Subsídios ao Plano de Desenvolvimento e Proteção Ambiental da área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani no estado de São Paulo**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2011. 102 p.

ALI, R. et al. 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. Rottneest Island: CSIRO Water for Healthy Country National Research Flagship, 2010. 116 p.

ANUÁRIO Estatístico 2008. Brasília, DF: Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas, 2009. 120 p. Disponível em: <<http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/3905>>. Acesso em: 19 jan. 2014.

BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M. **Time series analysis: forecasting and control**. 2.ed. San Francisco: Holden-Day, 1976. 575 p.

BRACARENSE, P. A. **Estatística aplicada às ciências sociais**. Curitiba: IESDE Brasil S.A., 2012. 288 p.

BROCKWEEL, P. J.; DAVIS, R. A. **Time series: theory and methods**. 2nd ed. New York: Springer -Verlag, 1991.

CLEARY, R. W. **Águas Subterrâneas**. Princenton Groundwater Inc.: Clean Environment Brasil, 117 p., 1989. Disponível em: <http://www.clean.com.br/cleary.pdf>. Acesso em: Set., 2010.. Acesso em: 29 jun. 2015

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Editora Blücher, 1980.

FERDOWSIAN, R.; et al. Explaining Groundwater Hydrographs: Separating Atypical Rainfall Events from Time Trends. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, AU, 39:pp. 861-875. 2001.

FERREIRA, D. F. **Estatística Básica**. Lavras: UFLA, 2005.

FIDELIS, A. C. E.; LIMA, J. D. **Impactos ambientais da silvicultura no bioma Cerrado**. Catalão, UFF, 2010. Disponível em: <<http://www.uff.br/vsinga/trabalhos/Trabalhos%20Completo/Alex%20Camargo%20Fidelis.pdf>> Acesso em: 18 jan. 2014.

FRANZINI, A. S. MOURÃO, M. A. A. (Coord.). **Projeto rede integrada de monitoramento das águas subterrâneas: relatório diagnóstico Sistema Aquífero Bauru-Caiuá nos Estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Paraná - Bacia do Paraná**. Belo Horizonte: Serviço Geológico do Brasil, 2012.

GOMES, M. A. F. **Aquífero Guarani: valor dos ativos ambientais**. Ribeirão Preto: Embrapa, 2007. Disponível em: <  
[http://webmail.cnpma.embrapa.br/down\\_hp/343.pdf](http://webmail.cnpma.embrapa.br/down_hp/343.pdf)>. Acesso em: 20 jan. 2014.

HAGER, F. P. V.; D'ALMEIDA, M. L. Legislação Aplicada às Águas Subterrâneas. **Revista Águas Subterrâneas**. São Paulo, SP. v. 29, n. 3. 2015. Disponível em:  
 <<http://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/download/23747/15816>>. Acesso em: 15 mai. 2015

HEUVELINK, G. B. M.; PEBESMA, E. J. The aggregation problems in environmental models. **Geoderma**, Filadélfia, PA, v. 89, p. 47-65, 1999.

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

HIRATA, R. ZOBY, J. L. G.; OLIVEIRA, F. R. Águas do Brasil. In: BICUDO, C. E. D. E. M.; TUNDISI, J. G.; SCHEUENSTUHL, M. C. B. **Águas subterrâneas: reserva estratégica ou emergencial**. São Paulo: Instituto de Botânica, 2010. p. 149-164.

IPEF. Fibra. **Jornal da Cenibra**, Belo Horizonte, MG, n. 217, nov. 2003.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. 1981. **Mapa geológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: Governo do estado de São Paulo, 1981. Escala 1:500.000. 2 v.

IRITANI, M. A.; EZAKI, S. **As águas subterrâneas do estado de São Paulo**. 3. ed. São Paulo: Secretaria do Estado do meio Ambiente, 2012. 104 p.

MAGALHÃES, M. N. **Probabilidade e variáveis aleatórias**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2006.

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, São José dos Campos, 2007.

\_\_\_\_\_. Incorporação de incertezas associadas à predição de modelos hidrológicos aos instrumentos de gestão dos recursos hídricos. **Caderno Prudentino de Geografia**, Presidente Prudente, n. 36, p. 215-227, 2014.

MANZIONE, R. L. et al. Modelagem de níveis freáticos em área de recarga do Sistema Aquífero Guarani sob diferentes usos do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 16.; ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS, 17., 2010, São Luis. **Anais...** São Paulo: ABAS, 2010. CD-ROM.

\_\_\_\_\_. **Águas Subterrâneas: conceitos e aplicações sob uma visão interdisciplinar**. Jundiaí: Paco Editorial, 2015. 386 p.

MARCUZZO, F. F. N. **Modelagem espaço-temporal e mapeamento de riscos dos níveis freáticos do sistema aquífero Guarani**. São Carlos, SP. Relatório de Pós-Doutorado (Escola de Engenharia de São Carlos), 2009. Disponível em: <[http://www.cprm.gov.br/publique/media/posdoc\\_marcuzzo.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/posdoc_marcuzzo.pdf)>. Acesso em: 16 jan. 2014.

MARTINS, G. A; DOMINGUES, O. **Estatística geral e aplicada**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2011.

MELO, A. C. G. DURIGAN, G. (Org.). **Estação Ecológica de Santa Bárbara: plano de manejo**. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, 2011. 222 p. Disponível em: <[http://iflorestal.sp.gov.br/files/2013/03/Plano\\_de\\_Manejo\\_EEc\\_Santa\\_Barbara.pdf](http://iflorestal.sp.gov.br/files/2013/03/Plano_de_Manejo_EEc_Santa_Barbara.pdf)>. Acesso em: 28 abr. 2014.

MENDES FILHO, W. M.; VENDRAME I. F.; CARVALHO, R. G.; Utilização de sistema de informações geográficas para o mapeamento do potencial de retenção de águas pluviais no município de São José dos Campos – SP. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, **Anais XIII**, 2007, Florianópolis. pag. 3453-3460.

MONDIN, M. et al. Mecanismos de Controle da Recarga em Aquíferos Sedimentares Livres Estudo na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê. **RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, São Paulo, v. 11, n. 3, p. 89-99, jul./set. 2006. Disponível em: <[https://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/ed179ace787f40ceb8ed2b0cb45a1bdb\\_518ad2623210a3c5b8a3cdd8790ae5dc.pdf](https://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/ed179ace787f40ceb8ed2b0cb45a1bdb_518ad2623210a3c5b8a3cdd8790ae5dc.pdf)>. Acesso em: 18 jan. 2014.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 4. ed. Viçosa. Editora UFV, 2011. 422 p.

NAVA, A; MANZIONE, R. L. 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. In: XXXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. **Ciência do Solo: Para que e para quem? Programa & Resumos**. Florianópolis, 2013, Epagri e SBCS, p. 1-4.

ORGANIZAÇÃO DOS ESTADOS AMERICANOS – OEA. Aquífero Guarani: programa estratégico de ação. Cidade: OEA, 2009. 424 p. Edição bilíngue.

PONZONI, F. J. E SHIMABUKURO, Y. E. Sensoriamento remoto no estudo da vegetação. Cidade: Instituto de Pesquisas Espaciais, 2012. Disponível em: <<http://www.cvmn.com.br/HTML/Arquivos/Sensoriamento%20remoto/SENSORIAMENTO%20REMOTO%20NO%20ESTUDO%20DA%20VEGETA%C7%C3O.pdf>>. Acesso em: 28 abr. 2014.

RANZINI, M. et al. Processos hidrológicos de uma microbacia com Mata Atlântica, na região da Serra do Mar, SP. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 66, p. 108-119, 2004. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr66/cap11.pdf>>. Acesso em: 19 jan. 2014.

REBOUÇAS, A. C. Água subterrânea. In. REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J.G. **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 3. ed. São Paulo: 2006. p. 111-141.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental. São José dos Campos, SP: INPE, 2000. Disponível em:  
<[http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:UgIUTGalSrAJ:www.dpi.inpe.br/geopro/modelagem/relatorio\\_modelos\\_hidrologicos.pdf+&cd=2&hl=ptBR&ct=clnk&gl=br](http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:UgIUTGalSrAJ:www.dpi.inpe.br/geopro/modelagem/relatorio_modelos_hidrologicos.pdf+&cd=2&hl=ptBR&ct=clnk&gl=br)>. Acesso em: 06 jul. 2015

SÃO PAULO (Estado). Departamento de Águas e Energia Elétrica. Instituto Geológico. Instituto De Pesquisas Tecnológicas do Estado De São Paulo. **Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo**. São Paulo: Serviço Geológico do Brasil, 2005. Escala 1:1.000.000. Disponível em:  
<[http://www.daee.sp.gov.br/images/documentos/MAPA\\_AS.pdf](http://www.daee.sp.gov.br/images/documentos/MAPA_AS.pdf)>. Acesso em: 15 jan. 2014.

SÃO PAULO (Estado). Gerônimo Rocha. Conselho Estadual de Recursos Hídricos (Org.). **Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo**. São Paulo: Câmara Brasileira do Livro, 2005. Escala. Disponível em:  
<[http://www.daee.sp.gov.br/acervoepesquisa/mapasub/MAPA\\_AS.pdf](http://www.daee.sp.gov.br/acervoepesquisa/mapasub/MAPA_AS.pdf)>. Acesso em: 12 maio 2014.

SOLDERA, B. C. **Modelagem de Séries de Monitoramento de Nível Freático em Área de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG) Sob Influência de Diferentes Usos Agrícolas da Terra**. 2013. 122 f. Dissertação de Mestrado em Agronomia (Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP, Botucatu. 2013.

SOLDERA, B. C.; MANZIONE, R. L. Modelagem de níveis freáticos no Sistema Aquífero Bauru como ferramenta na gestão de recursos hídricos subterrâneos. **Revista Ciência Geográfica**, Bauru, v. 16, n. 1, 2012. p. 54-61.

TEIXEIRA, W. et al. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

TUBELIS, A. **Conhecimentos práticos sobre clima e irrigação**. Viçosa: Editora Aprenda Fácil, 2001. 215 p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: Universidade UFRGS, 1998. 680 p.

VILLAR, P. C. Gestão das águas subterrâneas e o Aquífero Guarani: desafios e avanços. In: V ENCONTRO ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA EM AMBIENTE E SOCIEDADE. 2010, Florianópolis. **CD ROM**. Brasília, DF: Editora UNB. 2010. P. 1-17.

VITAL, M. H. F. Impacto ambiental de florestas de eucalipto. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 28, p. 235-276, dez. 2007. Disponível em:  
<[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/revista/rev2808.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/revista/rev2808.pdf)>. Acesso em: 18 jan. 2014.

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**, Cidade, v. 19, p. 877-887, 2011.