

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

**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**

BRUNA CAMARGO SOLDERA

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

BOTUCATU - SP
Julho - 2013

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

**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**

BRUNA CAMARGO SOLDERA

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Lilla Manzione

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

BOTUCATU - SP
Julho - 2013

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

S679m Soldera, Bruna Camargo, 1988-
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 /Bruna Camargo Soldera. - Botucatu : [s.n.], 2013
viii , 111 f.: il. color, grafs., tabs.

Dissertação(Mestrado)- Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2013
Orientador: Rodrigo Lilla Manzione
Inclui bibliografia

1. Águas subterrâneas. 2. Variações sazonais. 3. Agricultura - Estatística. I. Manzione, Rodrigo Lilla. II. Universidade Estadual Paulista."Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agronômicas. III. Título

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

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: “MODELAGEM DE SÉRIES DE MONITORAMENTO FREÁTICO EM
ÁREA DE AFLORAMENTO DO SISTEMA AQUIFERO GUARANI (SAG)
SOB INFLUÊNCIA DE DIFERENTES USOS AGRÍCOLAS DA TERRA”

ALUNA: BRUNA CAMARGO SOLDERA

ORIENTADOR: PROF. DR. RODRIGO LILLA MANZIONE

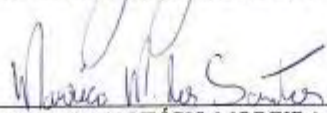
Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. RODRIGO LILLA MANZIONE



PROF. DR. JOÃO CARLOS CURY SAAD



PROF. DR. MAURÍCIO MOREIRA DOS SANTOS

Data da Realização: 25 de julho de 2013.

Dedico e Ofereço a meus pais, José Élio e Sueli, a minha irmã, Gabrielle, que sempre me apoiaram e auxiliaram nesta trajetória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me guiar nesta conquista.

Agradeço meus pais, Sueli e José Élio e minha irmã Gabrielle, pelo imenso carinho e confiança.

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

As queridas amigas de Taguaí, que desde a infância me acompanham e a quem devo as mais divertidas conversas e risadas, e sempre estiveram na torcida por meu sucesso pessoal e profissional.

Agradeço ao professor Rodrigo Lilla Manzione pelo auxílio, dedicação e paciência na orientação deste trabalho.

A todos que fazem parte do grupo de estudos GEPAG (Grupo de Estudos e Pesquisas Agrárias Georreferenciadas), em especial a Professora Célia Regina Lopes Zimback que me recebeu de braços abertos e com muita atenção sempre me ajudou nas dúvidas e pesquisas. E a todos os funcionários do Departamento de Recursos Naturais / Área de Ciência do Solo.

A equipe do Laboratório de Hidráulica Computacional (LHC) do Departamento de Saneamento e Hidráulica e Saneamento (SHS) da Escola de Engenharia de São Carlos-USP pelo compartilhamento dos dados e auxílios técnicos e logísticos nos trabalhos de campo.

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

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
RESUMO.....	1
SUMMARY	2
1. INTRODUÇÃO	3
2. OBJETIVOS	7
2. 1 Objetivo Geral	7
2. 2 Objetivos Específicos.....	7
3. REVISÃO DE LITERATURA	9
3. 1 Definindo água subterrânea.....	9
3. 2 Importância das Águas Subterrâneas e do Sistema Aquífero Guarani (SAG)	12
3. 3 Aproveitamento dos Recursos Hídricos Subterrâneos.....	16
3. 4 Fatores que influenciam na oscilação de níveis freáticos e a recarga das águas subterrâneas	18
3. 5 Monitoramento em águas subterrâneas.....	22
3. 6 Modelagem de dados de monitoramento freático	25
3. 6. 1 Método do Balanço Hídrico.....	26
3. 6. 2 Método de Flutuação da Superfície Livre (WTF – Water Table Flutuation).....	27
3. 6. 3 Métodos baseados na interação rio – aquífero.....	28
3. 6. 4 Método de traçadores	29
3. 6. 5 Modelagem Hidrológica	29
3. 6. 6 Modelagem de séries temporais.....	32
4. MATERIAIS E METODOS.....	38

4. 1 Área de Estudo	38
4. 2 Dados históricos.....	42
4. 3 Modelagem da dinâmica do aquífero	45
4. 3. 1 Modelagem das séries temporais de monitoramento	45
4. 3. 2 Validação dos parâmetros do modelo fisicamente embasado	49
4. 4 Organização e análise dos dados	50
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
5. 1 Análise exploratória dos dados	52
5. 1. 1 Medidas de posição	53
5. 1. 2 Medidas de dispersão amostral	54
5. 1. 3 Medidas de forma	56
5. 2 Avaliação das séries históricas	58
5. 3 Modelagem das séries temporais	59
5. 3. 1 Modelagem das séries de monitoramento sob diferentes influências integradas	60
5. 3. 2 Calibração dos parâmetros do modelo e sua interpretação física	69
5. 3. 3 Identificação das respostas do sistema em função dos cultivos e manejos	72
6. CONCLUSÕES	76
7. REFERÊNCIAS.....	78
APÊNDICE 1- Histogramas das distribuições de frequência das variáveis observadas.....	94
APÊNDICE 2- Gráficos de Função de Autocorrelação (ACF) e Função de Autocorrelação Parcial (PACF)	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama das etapas de calibração de um modelo hidrológico	31
Figura 2. Função de Transferência de Ruído	36
Figura 3. Localização dos poços e instrumentos na Bacia do Ribeirão da Onça, Brotas/SP	39
Figura 4. Mapa de uso e ocupação do solo na Bacia do Ribeirão da Onça para os anos de 2003 (a) e 2010 (b) gerados a partir da classificação de imagens Landsat	41
Figura 5. Combinação dos efeitos de respostas da zona não saturada e saturada	48
Figura 6. Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observações de alturas de lençol freático (pontos) no poço de monitoramento 8.....	60
Figura 7. Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observações de alturas de lençol freático (pontos) no poço de monitoramento 12.....	60
Figura 8. Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observações de alturas de lençol freático (pontos) no poço de monitoramento 9.....	61
Figura 9. Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observações de alturas de lençol freático (pontos) no poço de monitoramento 10.....	61
Figura 10. Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observações de alturas de lençol freático (pontos) no poço de monitoramento 13.....	62
Figura 11. Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observações de alturas de lençol freático (pontos) no poço de monitoramento 14.....	62
Figura 12. Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observações de alturas de lençol freático (pontos) no poço de monitoramento 16.....	63
Figura 13. Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observações de alturas de lençol freático (pontos) no poço de monitoramento 19.....	63
Figura 14. Variação da precipitação entre 19 de abril de 2012 e 19 de março de 2013	67
Figura 15. Flutuação dos níveis freáticos e a relação com as variáveis de entrada: precipitação, evapotranspiração, nível do rio e tendências lineares, para calibração do modelo para o Poço 12.....	68

Figura 16. Calibração do modelo das séries temporais de níveis freáticos para os diferentes usos do solo: cana de açúcar (P08); eucalipto (P09); citros (P13); pastagem (P16) – linha sólida previsão do nível do lençol freático e símbolos dados observados 71

Figura 17. Calibração do modelo das séries temporais de níveis freáticos para os diferentes usos do solo: eucalipto (P10); cana de açúcar (P12); citros (14); pastagem (17) – linha sólida previsão do nível do lençol freático e símbolos dados observados..... 71

Figura 18. Funções de IR para precipitação nos poços: 08 (cana de açúcar), 09 (eucalipto), W13 (citros) e 16 (pastagem) 73

Figura 19. Funções de IR para precipitação nos poços: 12 (cana de açúcar), 10 (eucalipto), 14 (citros) e 17 (pastagem)..... 73

Figura 20. Funções de IR para evapotranspiração nos poços: 08 (cana de açúcar), 09 (eucalipto), W13 (citros) e 16 (pastagem) 74

Figura 21. Funções de IR para evapotranspiração nos poços: 12 (cana de açúcar), 10 (eucalipto), W14 (citros) e 17 (pastagem) 75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Localização dos poços de monitoramento e uso e ocupação do solo.	43
Tabela 2. Medidas de posição amostral calculadas para as séries temporais de flutuação de níveis freáticos para o período de abril de 2004 a janeiro de 2013..	54
Tabela 3. Medidas de dispersão amostral calculadas para as séries temporais de flutuação de níveis freáticos para o período de abril de 2004 a janeiro de 2013..	55
Tabela 4. Medidas de forma calculadas para as séries temporais de flutuação de níveis freáticos para o período de abril de 2004 a janeiro de 2013	57
Tabela 5. Estatísticas da calibração do modelo PIRFICT às séries temporais de alturas de lençol freático observadas no período de abril de 2004 a janeiro de 2013	65
Tabela 6. Parâmetros calibrados pelo modelo PIRFICT	69
Tabela 7. Desvios padrões dos parâmetros calibrados pelo modelo PIRFICT	72

RESUMO

O uso e ocupação da terra e as atividades desenvolvidas no espaço geográfico determinam a pressão exercida sobre os recursos hídricos, consequentemente as alterações e poluição gerada nos mananciais. Em áreas onde o uso da água é feito de maneira contínua, informações sobre a água disponível são importantes para o planejamento das atividades ali desenvolvidas. Especificamente, a intensidade do uso e ocupação da terra pela agricultura determinará o grau de pressão que as atividades exercem sobre os mananciais. O presente trabalho procurou analisar uma bacia hidrográfica em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG) em relação ao seu uso agrícola e a resposta do sistema aquífero às culturas e as variações climatológicas sazonais. Essas áreas são estratégicas para manutenção da recarga direta do sistema aquífero e merecem atenção por apresentarem vulnerabilidade natural a contaminação e superexploração. O uso agrícola é a principal atividade nessas áreas no Estado de São Paulo, e o manejo do solo pode representar impacto ao sistema aquífero. Com esta perspectiva fez-se uma análise utilizando dados de monitoramento freático sob a ótica da identificação de sistemas em águas subterrâneas. Modelos de séries temporais baseados em funções de Impulso e Resposta foram calibrados buscando diferentes respostas quanto a diferentes estresses no sistema hídrico. Os resultados demonstraram que foi possível modelar a relação dinâmica entre as diferenças variáveis e a variação dos níveis freáticos por meio de modelos baseados em séries temporais e fisicamente embasados. As variações climáticas, tipo de vegetação, interação com a precipitação, consumo de água, práticas agrícolas, como irrigação, e propriedades locais de uso da terra que influenciam a flutuação dos níveis freáticos sob diferentes maneiras. Diferentes respostas quanto as culturas de cana-de-açúcar, pastagem, citros e eucalipto foram observadas com base no ciclo das culturas e práticas de manejo aplicadas. Dados de monitoramento fornecem importantes informações para o planejamento do uso da água e capacidade suporte em bacia hidrográficas.

Palavras-chave: água subterrânea; função de impulso e resposta; modelo PIRFICT; uso da água no meio agrícola

SUMMARY

Land use and occupation and the activities in geographic space determine the pressure on water resources, hence the changes and pollution generated in the watershed. In areas where water use is kept constant, water availability is important information for planning the activities developed there. Specifically, agricultural land use and occupation will determine the degree of pressure that the activities exerts in the water bodies. The present work examined a watershed located in a Guarani Aquifer System (GAS) outcrop area and its relation with agricultural land use and aquifers responses due crop and seasonal climatological variations. These areas are strategic to maintaining direct recharge of the aquifer system and deserve attention because they have natural vulnerability to contamination and overexploitation. Agricultural use is the main activity in these areas in the State of São Paulo, and soil management may represent impact the aquifer system. With this perspective, monitoring data of water table depths were analyzed from the perspective of groundwater system identification. Time series models based in impulse response functions were calibrated searching for different responses from multiple stresses acting in the hydrological system. The results showed that it is possible to model the dynamic relationship between the variable differences and variation of groundwater levels using models based on time series physically grounded. Climatic variations, vegetation type, interaction with rainfall, water consumption, agricultural practices such as irrigation, local hydrogeological properties and land use influence the fluctuation of groundwater levels in different ways. Different responses from sugarcane, pasture, citrus and eucalyptus reforestation were observed from the crop cycle and management practices. Monitoring data gives important information to water use planning and support capacity studies in watersheds.

Key-words: groundwater; impulse response functions; PIRFICT model; agricultural water use

1. INTRODUÇÃO

Impacto ao meio ambiente e ocupação do solo pela agricultura contribuem para mudanças na disponibilidade de recursos hídricos. Muitas vezes, alterações no ciclo hidrológico e nos recursos hídricos disponíveis possuem influências em nível regional, municipal, estadual e até mesmo federal, e não apenas no nível da bacia hidrográfica (HOFFMANN & JACKSON, 2000). Assim, o volume explorável de um aquífero é uma variável de decisão a ser determinada como parte de um plano de gestão do sistema de águas de uma região.

As águas subterrâneas têm ganhado destaque na sociedade moderna. Com isto, ficam visíveis também os efeitos negativos, isto é, ações que estão afetando a quantidade e qualidade das águas subterrâneas, ações que aumentam os riscos de contaminação dos aquíferos. Deve-se tomar cuidado na exploração desse tipo de recurso, já que a renovação das águas, ou recarga do aquífero, não se faz na mesma velocidade da extração, e isso pode resultar em uma exploração de partes das reservas permanentes do manancial subterrâneo, com riscos até mesmo de exaustão quando a captação não é devidamente monitorada.

A água subterrânea pode ser considerada uma das maiores riquezas naturais do nosso planeta. Seu monitoramento é um instrumento

fundamental para a avaliação das condições que este meio natural se encontra, e posteriormente poder tomar medidas preventivas e/ou proativas para o predomínio da qualidade e quantidade, buscando promover o uso sustentável junto a uma ação integrada de gerenciamento. Os principais problemas relacionados aos sistemas aquíferos são a poluição, desperdício, bombeamentos excessivos, dificuldades para controle dos poços instalados e exploração desenfreada (IRITANI & EZAKI, 2008). Para que as futuras gerações também possam usufruir deste recurso são necessárias estratégias que visem a sua proteção.

Sabendo da importância que a água exerce para a sociedade, tanto para abastecimento doméstico, atividades industriais e agricultura, os recursos hídricos subterrâneos despertam grande interesse ambiental em relação a sua conservação.

O monitoramento dos padrões de qualidade e da quantidade disponível em um aquífero possibilita diagnosticar o atual estado do aquífero, em relação a estados passados, para tomar as devidas medidas em relação a modificações causadas por efeitos naturais e/ou antrópicos.

Para equilibrar interesses econômicos e ambientais, é importante conhecer a dinâmica do lençol freático em relação ao uso e ocupação das terras (VON ASMUTH & KNOTTERS, 2004). Isso pode ser realizado por meio de medidas de níveis freáticos, que irão fornecer informações sobre a dinâmica do aquífero. A avaliação do comportamento do aquífero através do monitoramento, principalmente nas áreas de afloramento, fornece dados importantes para sua conservação e subsídios aos projetos de proteção ambiental e desenvolvimento sustentável (Organization of American States / Global Environment Facility - OAS/GEF, 2001), assegurando a qualidade e a quantidade de seu manancial. Através do monitoramento e posteriormente pela análise dos dados em modelos hidrológicos, pode-se entender melhor o comportamento dos aquíferos. Tendo em vista as diferentes funções das águas subterrâneas (social, ambiental ou mesmo econômica), um programa que seja eficiente de monitoramento deve envolver o controle da qualidade e quantidade, considerando

as inter-relações existentes com as águas superficiais, condições climáticas e usos da terra (MESTRINHO, 2008).

Prever a resposta de um aquífero (em termos de quantidade e qualidade) quanto às atividades de exploração propostas e em tempo hábil para gerar políticas racionais de exploração em determinada região é uma questão complicada, devido à complexidade dos processos envolvidos (MANOEL FILHO, 2008). Isso faz com que muitas vezes a gestão de águas subterrâneas não seja incluída no planejamento e gestão de recursos hídricos.

Processos hidrológicos são aleatórios, isto significa que suas realizações não são conhecidas a priori (GOUVÊA, 2009). Geralmente esses processos se caracterizam por ser contínuos no tempo e no espaço. Nesse sentido, modelos que utilizam séries temporais geradas por programas de monitoramento de aquíferos são uma alternativa interessante para modelar dados relacionados a processos hidrológicos, como por exemplo a dinâmica do lençol freático. Em geral, a calibração dos parâmetros é primeiramente estatística, com ênfase nas propriedades dos dados. A identificação do sistema pode ser integrada para análise de séries temporais de água subterrânea, revelando informações sobre as condições hidrogeológica locais (VON ASMUTH, 2012).

Séries temporais fornecem informações importantes sobre o comportamento anterior e atual de um fenômeno e contribuiu para o entendimento do comportamento de processos futuros. De acordo com a literatura (BOX & JENKINS, 1976; HIPEL & McLEOD, 1994; VON ASMUTH, 2012), a análise de séries temporais perpassa a estatística exploratória dos dados, a identificação de um modelo que represente o processo envolvido, estimação dos parâmetros e verificação dos resultados do modelo. Métodos de identificação são aplicados como alternativas a modelos com bases puramente físicas que podem ser excessivamente complexos ou impossíveis de se obter em tempo razoável, inerentes à natureza de muitos sistemas e processos que envolvem o ciclo hidrológico. Isto se aplica a sistemas e processos ambientais, tais como precipitação, infiltração, recarga de aquíferos, oscilação de níveis freáticos, entre outros (VON ASMUTH, 2012).

A dinâmica da água subterrânea é governada por uma série de variáveis, e para sua análise é necessário medições à campo e monitoramento sistemático das reservas. A resposta do sistema aquífero aos diversos estresses que estão expostos, tal como variáveis climáticas, uso e ocupação da terra, influência dos recursos hídricos superficiais, é importante para compreender como o manancial subterrâneo se comporta. Em áreas onde os níveis de reserva hídrica podem se tornar críticos existe a necessidade que as previsões a respeito sejam seguras, auxiliando assim no suporte a decisão. Os efeitos de variações sazonais sendo expressos em termos de probabilidades são explicados através de modelos estocásticos (HEUVELINK & PEBESMA, 1999), permitindo com que o risco associado às estimativas seja mensurado.

Com o auxílio do monitoramento do nível freático e modelagem utilizando séries de dados abundantes tanto na dimensão temporal, como na dimensão espacial, pode-se entender melhor a variação das condições climáticas, relevo, corpos hídricos superficiais, uso agrícola, evapotranspiração, entre outros estímulos, sobre o aquífero, e através do conhecimento desta dinâmica formular medidas para melhor gerir tanto o uso da água como, o uso da terra, para que no futuro ambos possam ser utilizados.

Deste modo, o presente trabalho procurou analisar uma área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG) sob a ótica da identificação de sistemas em águas subterrâneas usando análise de séries temporais. Áreas de afloramento do SAG são estratégicas para manutenção da recarga direta do sistema aquífero e merecem atenção por apresentarem vulnerabilidade natural a contaminação e superexploração. O uso agrícola é a principal atividade nessas áreas no Estado de São Paulo, e o manejo do solo pode representar impacto ao sistema aquífero.

2. OBJETIVOS

2. 1 Objetivo Geral

- Análise das aplicações de modelos baseados em observações e em séries temporais para caracterizar e entender como as oscilações meteorológicas, tipo de vegetação, interação com a precipitação, consumo de água, práticas agrícolas, como irrigação, e propriedades locais de uso da terra influenciam a flutuação dos níveis freáticos sob diferentes maneiras em área de afloramento do SAG.

2. 2 Objetivos Específicos

- Avaliação de dados de séries temporais a partir do monitoramento das águas subterrâneas de uma área de afloramento do SAG em uma bacia denominada Ribeirão da Onça localizada no município de Brotas/SP;
- Calibração de modelos de séries temporais fisicamente embasados que consideram diferentes variáveis para o ajuste do modelo;
- Inferir sobre a dinâmica dos níveis freáticos do SAG utilizando uma abordagem de identificação do sistema para verificar os diferentes

comportamentos dos níveis freáticos influenciados pelo uso da terra, profundidade da zona não saturada, interceptação de água pela cultura.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3. 1 Definindo água subterrânea

Os recursos hídricos, incluindo os mananciais superficiais e os subterrâneos, estão sendo crescentemente demandados para atender os interesses dos setores da sociedade civil, bem como do setor ambiental. Atualmente vivencia-se uma série de conflitos relacionados aos usos e disponibilidade dos recursos hídricos, em relação à quantidade e qualidade.

No mundo e no Brasil, os usos múltiplos da água e sua elevada demanda estão associados ao desenvolvimento socioeconômico, em nível local, regional ou global. Em função do aumento da urbanização, da necessária expansão agrícola e industrial e consequente degradação da qualidade das águas superficiais, o aproveitamento específico dos recursos hídricos subterrâneos tem ganhado destaque na sociedade nos últimos anos (BRASIL, 2007). De acordo com Gómes *et al.* (2010) tratados e acordos internacionais sobre água subterrânea datam dos últimos 50 anos, sendo limitado o desenvolvimento desse tipo de iniciativa na América do Sul.

A água subterrânea é a parcela de água que permanece no subsolo, flui lentamente até descarregar em corpos de águas superficiais, ou ser

interceptada por raízes de plantas ou ser extraída em poços (REBOUÇAS, 2006). É responsável pelo fluxo de base dos rios e sua perenização durante os períodos de estiagem. Apresenta diversas funções como: produção, ambiental, estratégico, transporte, filtro, energético, estocagem e regularização (REBOUÇAS, 2006). Pode ser classificado em relação à porosidade da rocha que armazena a água em: granular, fissural e cárstico. Podem ainda ser agrupados por suas características hidráulicas, em livres ou confinados.

Aquíferos livres, também chamados de freáticos, estão mais próximos à superfície e ficam submetidos à pressão atmosférica. A água que infiltra atravessa a zona não saturada e abastece o aquífero. Já os aquíferos confinados estão intercalados por camadas impermeáveis, estando submetidos a uma pressão maior que a da atmosfera. Para seu reabastecimento a água deve atravessar a camada menos permeável, em um processo lento, ou penetrar na área que este se encontra livre e aflorante. Há ainda o chamado aquífero suspenso, é quando a água encontra alguma forma de barreira na zona não saturada e fica armazenada por algum tempo (IRITANI & EZAKI, 2008).

De acordo com REBOUÇAS (2006) as águas subterrâneas, quando comparadas às superficiais, têm as seguintes vantagens que justificam seu uso: 1) as águas, ao percolarem o solo, vão sendo naturalmente filtradas e purificadas, de modo que, em geral, apresentam excelente qualidade, não necessitando de tratamentos prévios; 2) as obras para sua captação não ocupam muito espaço em superfície; 3) são menos susceptíveis a variações climáticas; 4) a viabilidade para sua extração, em termos de custos, é potencializada quando os poços são construídos próximos ao local de uso; 5) a implantação de projetos de abastecimento pode ser viabilizada conforme as necessidades locais; 6) o tempo e o custo de implantação de uma captação subterrânea são bem menores, em torno de semana ou meses, enquanto que para captação superficial podem levar anos.

O manancial subterrâneo, além dos seus aspectos associados à boa qualidade, também é responsável por movimentar uma parcela do setor econômico, como o turismo associado a águas termais e a água mineral ou engarrafada de mesa. De acordo com estudos desenvolvidos pela Agência

Nacional de Águas (BRASIL, 2007) a água mineral, é amplamente usada pelas populações dos centros urbanos devido a sua imagem de garantia de qualidade.

A água subterrânea, quando presente, ocorre em áreas extensas, não sendo necessário um sistema de distribuição, pois o acesso à água é realizado através de poços de bombeamento e o crescimento da demanda é proporcional ao aumento da perfuração de poços (MANOEL FILHO, 2008). De acordo com os estudos de Manoel Filho (2008) embora as águas subterrâneas sejam menos vulneráveis à contaminações que as águas superficiais, podem ser afetadas por contaminantes provenientes de despejos de esgoto doméstico, industrial, agrícola, intrusão de águas de qualidades inferiores ou por intrusão salina. Quando isto acontece à recuperação ou remediação pode ser um processo inviável.

A potencialidade dos recursos hídricos subterrâneos no Brasil não é homogênea. Há regiões com escassez hídrica e outras com relativa abundância. Certas localidades apresentam expressiva disponibilidade hídrica, como aquelas abrangidas por aquíferos sedimentares, que ocupam aproximadamente 48% da área nacional. Essas regiões apresentam grande potencial para a água subterrânea, pois estão aliados a condições climáticas favoráveis, enquanto outras apresentam baixa disponibilidade, como locais constituídos por rochas cristalinas no semi árido brasileiro (BRASIL, 2009).

No território nacional o controle da utilização e a qualidade das águas subterrâneas é ainda precário, devido à falta de pesquisas na área, dados defasados, clandestinidade no setor de perfurações e ausência de articulação legal, institucional e técnica. É necessário que os diversos organismos que têm atribuições intervenientes na gestão das águas subterrâneas estejam devidamente articulados para que a gestão integrada seja viabilizada.

A remediação dos aquíferos é trabalhosa e tem custo elevado. Muitas vezes não é viável, podendo se tornar um recurso não utilizável por causa da poluição e exaustão. Neste contexto o monitoramento é ferramenta fundamental para o entendimento da dinâmica e estado que este recurso se encontra para posteriormente poder tomar medidas preventivas e proativas para prevenir riscos.

3. 2 Importância das Águas Subterrâneas e do Sistema Aquífero Guarani (SAG)

No Brasil dispõe-se de um amplo sistema hídrico. Segundo Zoby (2007) o Brasil é um país de dimensões continentais, com diferentes condições físico-climáticas, e situado sobre um embasamento geológico que inclui desde rochas pré-cambrianas do Arqueano (mais de 2,3 bilhões de anos atrás) até sedimentos quaternários recentes. Associado a estas características, as águas subterrâneas apresentam-se com diversas condicionantes físico-químicas que estão também conectadas às condições de dissolução das rochas e de circulação em subsuperfície.

De acordo com Hirata *et al.* (2006) os aquíferos do Brasil apresentam boa qualidade natural de águas, na maior parte do território. A geoquímica natural é basicamente controlada por rochas e sedimentos, e clima favorável nas áreas de recarga. Na porção norte do território, onde a chuva é abundante, as águas são ácidas, bicarbonadas e de baixa mineralização, já nas regiões costeiras são ricas íons de cloreto e sódio (HIRATA *et al.* 2006).

A utilização das águas subterrânea só tem aumentado. No território nacional seu uso é expressivo e a quantidade de aquíferos significativa. Neste contexto Souza (2009) menciona que por não possuir dados confiáveis e controle adequado para utilização destas águas, tem-se um quadro de usos irregulares, ocorrendo em algumas áreas exploração/exploração intensiva, desperdício do recurso, grande número de poços irregulares e casos de contaminação e poluição. Para Leal (1999), fatores importantes que contribuíram para o aumento do uso das águas subterrâneas foram à crescente oferta de energia elétrica e a poluição das fontes hídricas de superfície. Zoby (2007) complementa que, além disso, as condições climáticas e geológicas do país permitiram a constituição de sistemas aquíferos, alguns de extensão regional, com potencial para abastecer água em quantidade e qualidade necessárias às mais distantes atividades.

As recargas efetivas de água subterrânea no Brasil equivalem $42.289 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, correspondendo a 24% do escoamento dos rios em

território nacional (vazão média anual de $179.433 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e 49% da vazão de estiagem (considerada como a vazão de estiagem com 95% de permanência). Os principais aquíferos sedimentares, os quais ocupam 32% da área do país, contribuem com $20.473 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Esta expressiva vazão de água é distribuída, de forma simplificada, em dois grandes grupos: aquíferos de rochas e materiais sedimentares e aquíferos de rochas fraturadas (BRASIL, 2005a; BRASIL 2005b; HIRATA *et al.* 2006).

Os terrenos sedimentares ocupam uma área equivalente a 48,5 % do território nacional, associados às grandes bacias sedimentares das eras Paleozóicas e Mesozóicas e às bacias menores das eras Mesozóicas e Cenozóicas. Nessas áreas, estão localizados 27 sistemas aquíferos de porosidade granular, cársticos e fraturados, com área de afloramento ou recarga de 2,76 milhões de km^2 , aproximadamente 32 % do país (HIRATA *et al.* 2010).

De acordo com Hirata *et al.* (2010) a principal bacia sedimentar do éon proterozóico no Brasil é a do Rio São Francisco, que abrange dois sistemas aquíferos importantes de dimensões regionais, como o Sistema Aquífero Bambuí (Neoproterozóico) e o Sistema Aquífero Urucuaia-Areado (Cretáceo), correspondendo a 175 mil km^2 . A Bacia Sedimentar do Paraná que abrange os sistemas aquíferos Bauru-Caiuá, Guarani, Tubarão, Ponta Grossa e Furnas. Na Bacia do Parnaíba destacam-se os sistemas aquíferos Itaperucu, Corda, Motuca, Poti-Piauí, Cabeças e Serra Grande. A Bacia Sedimentar do Amazonas contém os sistemas aquíferos Boa Vista, Solimões e Alter do Chão.

Já para as formações fraturadas temos os terrenos cristalinos pré-cambrianos, que ocupam uma área de cerca de 4,38 milhões de km^2 (cerca de 51,5 % do território nacional) e coincidem, na maior parte, com o Cráton do Amazonas e os cinturões de dobramento do Neoproterozóico, englobando parte do embasamento do Cráton do São Francisco (MANTESSO NETO, 2004). Basaltos e diabásios da Formação Serra Geral (período Cretáceo) da Bacia do Paraná constituem, em conjunto com as rochas pré-cambrianas, os principais aquíferos fraturados do país. Em terrenos cristalinos, os problemas de qualidade natural das águas subterrâneas estão concentrados no semi-árido nordestino (ZOBY, 2007) e referem-se à sua alta salinidade.

3. 2. 1 Sistema Aquífero Guarani (SAG)

Visto as distribuições dos dois grandes grupos de formações geológicas do país e como diversos dos aquíferos brasileiros estão neles inseridos, é necessário destacar um dos principais sistemas aquíferos do país e do Mundo, o SAG. O SAG está inserido nas formações sedimentares da Bacia do Paraná e por abranger outros países da América do Sul, merece significativa atenção. Sua gestão deve ser de modo integrado e o uso sustentável da água subterrânea deve respeitar os limites do aquífero e dos países que dele usufruem, tornando o desafio ainda maior.

Localizado entre os paralelos 12° e 35° de latitude Sul e 47° e 65° de longitude Oeste, o SAG é um aquífero transfronteiriço que estende-se desde a Bacia Sedimentar do Paraná (Brasil, Paraguai e Uruguai) até a Bacia do Chaco-Paranaense (Paraguai e Argentina) (CHANG, 2001; BORGHETTI *et al.*, 2004). De acordo com Gomes *et al.* (2010) o sistema Aquífero Guarani cobre uma área de 1,2 milhões de Km², estende-se pelo território de quatro países, sendo 840.000 Km² referente à área brasileira, 255.000 Km² na Argentina, 71.700 Km² no Paraguai e 58.500 Km² no Uruguai.

A geologia estrutural está baseada em um conjunto de rochas sedimentares mesozoicas continentais clásticas que está presente nas Bacias do Paraná e Chacoparanaense, a disposição de camadas está limitada por discordância regional permotriássica de 250 milhões de anos e na porção superior pelos derrames basálticos da Formação Serra Geral de aproximadamente 130 milhões de anos. É um sistema hidroestratigráfico da era Mesozóica, constituído por depósitos de origem fluvio-lacustre/eólicos do período (Formações Piramboia e Rosário do Sul no Brasil, Buena Vista no Uruguai) e por depósitos eólicos do período Triássico (Formação Botucatu no Brasil, Misiones no Paraguai e Tacuarembó no Uruguai e Argentina) (ASSINE *et al.*, 2004). O SAG é complexo e heterogêneo, com fluxos regionais e locais de água subterrânea controlados por estruturas geotectônicas, como arcos, falhas e diques; e condicionamentos sedimentares, como geometria, granulometria, grau de diagênese e estratos; e condicionantes geomorfológicos, como altimetria,

declividade e formas de relevo (Organização dos Estados Americanos - OEA, 2009).

Os arenitos da Formação Botucatu e da Formação Tacuarembó apresentam porosidade entre 20 a 30%. De acordo com o OEA (2009) as zonas de recarga e de descarga, apresentam fluxo com tendência de direcionamento norte-sul, e acompanha a Bacia Sedimentar do Paraná a partir da confluência entre os Estados do Paraná e Mato Grosso do Sul no Brasil e do território paraguaio. Porém, em função das diversas características geológicas que o compõe, o SAG pode apresentar dinâmica própria do fluxo local. Nestes locais parte da recarga alimenta o fluxo das redes de drenagem, exercendo influência sobre áreas alagadiças do Pantanal brasileiro, com quase todo o limite oeste do sistema aquífero constituindo uma área de descarga que alimenta a rede de drenagem que forma a Bacia do Rio Paraguai.

As áreas de afloramento do SAG representam 124 650 Km², sendo que 80 000 Km² deste total (64%) são áreas de recarga. Por meio destas áreas de recarga, ocorre o abastecimento profundo do SAG em direção às zonas que encontram-se confinadas (OEA, 2009).

De acordo com Chang (2001), cerca de 8.444.620 habitantes fazem uso direto ou indireto das águas do SAG, gerando um consumo aproximado de 500 milhões de m³ por ano. E de acordo com OEA (2009) cerca de 90% da extração da água é em território brasileiro, sendo o Estado de São Paulo o local de maior concentração de poços e consequente maior exploração do aquífero. O uso da água muitas vezes é feito de maneira contínua, não respeitando as variações sazonais de modo que afetam a recarga do sistema aquífero. Deste modo existe uma demanda por estudos detalhados no sentido de quantificar a recarga e compreender os seus mecanismos (ROCHA, 1997; CHANG, 2001).

É necessário que uma rede de monitoramento que integre os países que o SAG faz parte, seja introduzida para que se possa constituir um banco de dados com informações confiáveis tanto de qualidade como de quantidade do recurso hídrico subterrâneo, para posteriormente planejar políticas públicas eficientes.

3. 3 Aproveitamento dos Recursos Hídricos Subterrâneos

A água é um recurso natural fundamental para a sobrevivência, responsável por proporcionar o desenvolvimento econômico e o bem estar social, além de ser indispensável para a manutenção de ecossistemas. As atividades desenvolvidas no espaço geográfico determinam a pressão exercida sobre os recursos hídricos e consequentemente as alterações e poluição gerada nos mananciais. Em áreas onde o uso da água é feito de maneira contínua, as características da água disponível são importantes para o planejamento das atividades ali desenvolvidas. Paralelamente, o uso e ocupação da terra pela agricultura determinarão o grau de pressão que as atividades exercem sobre o manancial. Neste sentido Impedir a escassez e a poluição de mananciais hídricos é tarefa árdua, mas essencial para a manutenção e continuidade da vida na Terra.

Segundo Silva *et al.* (1998) em levantamento realizado pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo (CETESB), verificou que o Estado de São Paulo consta com 645 municípios, sendo 462 municípios (71,6%) abastecidos total ou parcialmente com água subterrânea, e deste total, 308 municípios (47,7%) são abastecidos totalmente por recursos hídrico subterrâneo. Os autores ainda destacam que em 223 municípios (34,6%) apresentam população inferior a 10.000 habitantes. Santos (2009) verificou que 69 % dos municípios no estado de São Paulo fazem uso da água subterrânea, 20% utilizam um sistema misto para o abastecimento público, ou seja superficial e subterrâneo, e somente 11% dos municípios fazem a captação de água superficial para o abastecimento.

Estudos desenvolvidos por Paz *et al.* (2000) relatam que em escala mundial a demanda hídrica no ano de 1996 era de $5.692 \text{ Km}^3.\text{ano}^{-1}$ versus um uma oferta de $3.745 \text{ Km}^3.\text{ano}^{-1}$. Este valor equivale a aproximadamente 66% dos usos múltiplos de água, e deste modo as reservas hídricas devem ser expandidas e, para isto, necessita-se desenvolver pesquisas para elaboração de um modelo sustentável de uso da água, seja ela superficial ou subterrânea.

Não se trata exclusivamente da água utilizada para a dessedentação de pessoas e animais, mas também da água designada à

agricultura, a chamada “água para comer” (CHRISTOFIDIS, 2005). Atividades que exercem pressão sobre os recursos hídricos, superficiais ou subterrâneos, como a agricultura, precisam monitorar indicadores de quantidade e qualidade para que se alcance um equilíbrio entre oferta, demanda hídrica e exploração equilibrada dos recursos. No Brasil, quase metade da água consumida é designada a agricultura irrigada (CARDOSO *et al.*, 1998). Embora consuma grande quantidade de água, a irrigação representa a maneira mais eficiente de aumento da produção de alimentos (PAZ *et al.*, 2000). De acordo com Paz *et al.* (2000), na maioria dos países as melhores práticas de irrigação são aquelas que visam a utilização de forma sustentável da água, visando a maior produção e evitando salinização e erosão do solo. Porém, como estruturar e implantar os procedimentos eficientes para isso é um problema que ainda é enfrentado, e segundo Alfaro & Marin (1991) este fato deve ser superado com base na habilidade, experiência e nível educacional do produtor agrícola.

Por ser o setor agrícola o que mais consome água, é necessário fazer o manejo adequado para preservação da qualidade e quantidade do recurso hídrico. Em nível mundial a agricultura consome aproximadamente 69% de total de água procedida de fontes (rios, lagos e aquíferos) e o restante está sendo consumido pela indústria e uso doméstico (SHIKLOMANOV, 1998).

A contaminação da água subterrânea é mais lenta quando comparado às águas superficiais. De acordo com Bernardo (1997) o tempo necessário para a água infiltrar e atingir o aquífero aumenta com o decréscimo da permeabilidade do solo e com a profundidade do lençol freático, e isto pode ser tanto um fator benéfico como um problema, uma vez que o tempo que se leva para perceber e diagnosticar a contaminação do manancial subterrâneo é maior. Isto pode afetar a preservação e remediação do aquífero, sendo os contaminantes que mais preocupam os nitratos, pesticidas e metais pesados. Quanto maiores às perdas por escoamento superficial na irrigação, maiores serão as chances de contaminação do manancial subterrâneo, fato que requer cada vez mais um dimensionamento otimizado do sistema de irrigação (BERNARDO, 1997). A interligação existente entre a agricultura irrigada, recursos hídrico e meio ambiente pode ser observado pelo problema enfrentado devido ao processo

de infiltração. A poluição por nitratos, pesticidas e outros elementos químicos tóxicos solúveis, contribuem para que ao longo do tempo haja contaminação dos reservatórios de água subterrânea (PAZ, TEODORO & MENDONÇA, 2000).

O uso da água subterrânea na agricultura, em especial em países subdesenvolvidos, tem a outorga do uso da água um instrumento importante como apoio para o uso racional e conservação, e pode incentivar o desenvolvimento de tecnologias mais eficazes para a utilização da água neste setor.

A cobrança pelo uso da água está definida pela Lei 12.183 de 2005, cujos principais objetivos são reconhecer o recurso hídrico como bem público de valor econômico, dando indicação ao usuário de seu real valor; incentivar uso racional e sustentável; obter recursos financeiros para o financiamento e intervenções complementares nos planos de recursos hídricos e de saneamento; e utilizar a cobrança da água como instrumento de planejamento, gestão integrada e descentralizada do uso da água e seus conflitos (SÃO PAULO, 2013). Não há cobrança pelo uso da água em nenhum setor da sociedade, o que há é o pagamento pelo serviço prestado pelas empresas de abastecimento, e a regularização pela cobrança ainda está em andamento.

Os usuários sujeitos a cobrança são todos aqueles que fazem captação ou derivação de água superficial e extração de água subterrânea e necessitam de outorga do direito de uso para utilização da água no abastecimento humano, industrial, agrícola, bem como aqueles que lançam efluentes em corpos d'água (SÃO PAULO, 2013). Neste sentido o uso agrícola é o setor isento desta cobrança, é o setor que mais demanda água e por isto vem enfrentando problemas com nesta questão de regularizar da cobrança.

3. 4 Fatores que influenciam na oscilação de níveis freáticos e a recarga das águas subterrâneas

A descarga e a recarga das águas de um aquífero são atributos que possuem variabilidade espacial, devido ao fato que as diferenças que ocorrem no solo em relação à absorção e retenção de água, e temporal devido aos efeitos climáticos, tais como precipitação e evapotranspiração, e no

que diz respeito ao próprio uso da água, que geralmente obedecem padrões sazonais (MANZIONE *et al.*, 2007).

Avaliar a recarga de um aquífero é um processo complexo, pois não pode ser estimado com exatidão, mas pode ser examinada com certo detalhe analisando a flutuação do nível de água subterrânea. Em regiões de afloramento e recarga de aquíferos o conhecimento das condições climáticas é parâmetro importante para o entendimento da sua dinâmica. Diante deste fato, se considerar que em períodos de seca há decréscimo de água no manancial subterrâneo e a reposição se dá em períodos chuvosos, assim o quanto se perde e se recupera de água neste sistema é questão fundamental para o manejo e gestão das águas (OLIVEIRA *et al.*, 2005).

As mudanças climáticas são frequentemente avaliadas por respostas hidrológicas, como é o caso de enchentes, rebaixamento do nível freático dos mananciais subterrâneos e os impactos nas qualidades dessas águas (GUNAWARDHANA & KAZAMA, 2011; RANJAN *et al.*, 2006; GUNAWARDHANA & KAZAMA, 2012). A precipitação é uma variável importante quando se fala em efeitos climáticos influenciando flutuações de níveis freáticos. De acordo com Majorowicz *et al.* (2006) a variação da precipitação pode alterar o estado natural do transporte de calor convectivo, isto porque a temperatura em subsuperfície é distribuída não apenas por condução mas também pela recarga e descarga subterrânea.

Neste contexto a recarga do aquífero é uma variável com indexação espaço-temporal, por razões que envolvem o uso da terra, cobertura do solo e a sazonalidade do regime pluviométrico. Isto irá alterar parâmetros que controlam a recarga, tais como evapotranspiração, estrutura do solo e profundidade de raízes (SCANLON *et al.*, 2005; VAERET *et al.*, 2009; TANIKAWA & MANZIONE, 2011). A análise da flutuação do lençol freático, relacionada a diferentes tipos cobertura do solo, e da precipitação, são importantes na implantação de estratégias de manejo sustentável, tanto para o uso da terra como para exploração da água subterrânea.

Healy (2010) menciona um estudo realizado, no qual foram elaborados mapas de estimativa da recarga anual nos estados do Texas e

Minnesota, nos Estados Unidos, e comparados com mapas de precipitação anual, constatando-se que a recarga aumenta com o aumento da taxa de precipitação. Isto pode ser intuitivo, uma vez que a recarga não pode ocorrer se a água meteórica não estiver disponível. A variação na recarga pode ser observada como variação em escala local, que pode ser atribuída, por exemplo, como a heterogeneidade natural da permeabilidade na superfície do solo ou mesmo a variabilidade da vegetação, e pode ser comprometida por aspectos temporais, sazonais ou mudanças no uso da terra (HEALY, 2010).

Outro parâmetro que irá influenciar na recarga e por consequência a oscilação freática em aquíferos livres é a taxa de evapotranspiração. Deste modo a vegetação e o uso da terra têm profundos efeitos, pois os tipos e densidades de padrões de vegetação influenciam a evapotranspiração (HEALY, 2010). Áreas vegetadas têm tipicamente uma alta taxa de evapotranspiração, e o consumo de água pela vegetação é maior, contribuindo para diminuir a quantidade de água para infiltração e causando o rebaixamento do nível d'água. Healy (2010) afirma que as condições são mais favoráveis para drenagem através da zona não saturada para o lençol freático quando a taxa de precipitação excede a taxa de evapotranspiração.

A dinâmica do aquífero também está relacionada à permeabilidade do solo, sendo que as altas permeabilidades do leito dos rios facilitam o intercambio entre águas superficiais e subterrâneas. De acordo com Betiollo (2006) vários fatores influenciam nas características hidrogeológica do aquífero e consequentemente na dinâmica da água subterrânea, como recarga e flutuação freática, e um desses fatores é permeabilidade do solo. Segundo Mesquita & Moraes (2004) a permeabilidade é dependente de diversos atributos do solo, em especial a densidade, porosidade, macro e micro porosidade, e Neves (1987) salienta que o coeficiente de permeabilidade pode ser definido por diferentes métodos, como fórmulas empíricas, ensaios em laboratórios ou ensaios em campo.

Assim em estudos relacionados fluxo de água no solo o conhecimento da permeabilidade é essencial, de acordo com Stephens (1996) na zona não saturada o coeficiente de permeabilidade irá variar em função das

propriedades do meio poroso, das características do fluido e do teor de umidade volumétrica do material. Já na zona saturada o coeficiente de permeabilidade será em função das propriedades do meio poroso e das características do fluido.

A interconexão entre sistemas aquíferos e rios é mal compreendida em muitos locais do mundo, e o entendimento desta dinâmica é importante para gestão da qualidade e quantidade do recurso hídrico (IVKOVIC, 2006). De acordo com Toth (1970), Winter (1998) e Sophocleous (2002), é documentado que os sistemas de água subterrânea e de superfície interagem em uma variedade de ambientes geológicos, topográficos e climáticos, e que as características da água superficial, como rios, lagos, represas e áreas alagadas apresentarão diferentes graus de conexão com os sistemas subterrâneos.

A água se move de maneira contínua entre o sistema superficial e subterrâneo e o uso e a qualidade de um pode impactar o uso e a qualidade do outro (IVKOVIC, 2006). O declínio do fluxo do rio como consequência da exploração de água subterrânea tem se tornando uma ameaça a atividades industriais e comunidades que se dependem deste recurso. E estes riscos aumentarão à medida que a pressão sobre os recursos hídricos aumentem, como consequência de padrões climáticos mais secos e desenvolvimento econômico nas bacias hidrográficas (SOPHOCLEOUS, 2002).

De acordo com Ivkovic (2006) uma alternativa para analisar a relação entre o recurso hídrico superficial e subterrâneo é reunir uma série de dados hidrométricos, que para muitas bacias já estão disponíveis (pela estação de fluxo de dados e piezômetros), e em seguida, analisar os padrões de dados e inferir sobre os processos. Winter *et al.* (1998) menciona que rios geralmente interagem com as águas subterrâneas de três formas: as águas dos rios recebem água subterrânea através do leito do rio (ganhando fluxo) são os rios denominados efluentes; perdem água subterrânea através do leito do rio (perdendo fluxo) são os rios influentes; e podem ganhar em alguns trechos e perder em outros.

Segundo Gomes (2008) para se avaliar a contribuição da água subterrânea para o rio, ou a recarga que um aquífero pode receber de um rio, e de significativa importância conhecer o tipo de conexão hidráulica existente

entre os dois sistemas. Esta conexão pode considerar a situação das formações geológicas permeáveis em relação ao leito do rio e a situação dos níveis do rio e níveis piezométricos na zona do aquífero contigua ao rio (CUSTODIO E LLAMAS, 1976).

3. 5 Monitoramento em águas subterrâneas

A água subterrânea por ser considerada reserva hídrica estratégica, devido seus múltiplos propósitos, tais como produção, estratégico em relação ao abastecimento em épocas de estiagem, energético, transporte, ambiental, entre outros. Por isso é necessário o conhecimento de seu potencial hídrico e suas limitações em relação ao uso e vulnerabilidades. Constantemente observam-se os problemas associados à poluição e superexploração de sistemas aquíferos. Isto tem se evidenciado tanto em nível nacional como internacional, e a ausência de um sistema de saneamento básico e a falta de controle de lançamentos de poluentes nos corpos d'água tem contribuído para impactos ao meio ambiente, em consequência afetam as águas superficiais e subterrâneas. De acordo com Manoel Filho (2008) poços são construídos sem os devidos cuidados sanitários, em locais inadequados e que quando abandonados, não apresentam uma vedação adequada, o que constitui uma via de contaminação para o manancial subterrâneo.

Dados sobre água subterrânea em especial, são de escopo e de disponibilidade limitados (BRASIL, 2011), e o monitoramento de nível e qualidade é uma ferramenta adicional e fundamental dos programas de proteção dessas águas. De acordo com BRASIL (2008) o monitoramento de água subterrânea ainda é assunto novo no Brasil, e começou a ganhar destaque no início da década 70.

Segundo Foster *et al.* (2002) o monitoramento é necessário para conhecer a qualidade natural da água do sistema; coletar novos dados sobre os sistemas aquíferos para posterior melhora de modelagens conceituais e numéricas; avaliar o perigo de contaminação de uma área; e atestar a eficácia de medidas de proteção de qualidade e quantidade de água.

Neste contexto a necessidade de séries histórica de dados e profissionais qualificados para analisá-los, conduz a complexa questão de prever a resposta do aquífero a diferentes situações (SILVA & PRUSKI, 2000; CAMPOS & STUDART, 2003), e em tempo hábil para gerar políticas racionais de exploração, tanto em escala global, regional e local (SOLDERA & MANZIONE, 2012). Em locais que os níveis freáticos das reversas hídricas podem se tornar críticos devido a uso intenso e contaminação são necessários prognósticos seguros para auxiliar na gestão. Assim a falta de pesquisas e dados consistentes faz com que muitas vezes as águas subterrâneas não sejam incluídas no planejamento e gestão de recursos hídricos.

A análise do desempenho do recurso hídrico subterrâneo por meio de monitoramentos em áreas de afloramento, fornece dados importantes para conservação e desenvolvimento sustentável (OAS/GEF, 2001), tornando segura a qualidade e quantidade de seu manancial para gerações futuras. De acordo com Mestrinho (2008) devido às diferentes funções das águas subterrâneas (social, ambiental e econômica), o eficiente monitoramento deve abranger o controle da quantidade e qualidade das águas, considerar a integração das águas superficiais e subterrâneas, regimes climáticos, uso e ocupação do solo.

Por meio de monitoramentos e modelos hidrológicos pode-se compreender mais detalhadamente a dinâmica e desenvolvimento da água subterrânea, a relação com as incertezas climáticas, que a cada passo se tornam mais acentuadas, e o impacto da poluição (por atividades industriais, domésticas e agrícolas) que podem afetar a disponibilidade dos recursos hídricos superficiais e em consequência comprometer o recurso hídrico subterrâneo.

Planejamento, execução, interpretação, avaliação de resultados e reavaliação da eficiência do programa de monitoramento são requisitos básicos para um ideal monitoramento (MESTRINHO, 2008). Mestrinho (2008) também menciona que através do monitoramento há a produção de grande quantidade de dados, que deverão ser analisados com auxílio de métodos estatísticos, gráficos e modelagem. Deste modo os sistemas de monitoramento de águas subterrânea no país ainda é assunto incipiente que deve ser

aprofundado e incentivado a realização de pesquisas na área, para que possa dar base à formulação de gestões eficientes promovendo a integração de instrumentos técnicos e científicos.

Diversas iniciativas vêm sendo tomadas para o desenvolvimento das redes de monitoramento das águas subterrâneas, seja em termos qualitativos como quantitativos. A Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas (RIMAS) proposta pelo CPRM (Serviço Geológico do Brasil) surgiu devido a necessidade de ampliação do conhecimento hidrogeológico dos principais aquíferos do país. Assim de acordo com Brasil (2013) os resultados do monitoramento que será permanente de forma contínua irão fornecer a médio e longo prazo identificação de impactos às águas subterrâneas em decorrência da exploração ou das formas de uso e ocupação dos terrenos, a estimativa da disponibilidade do recurso hídrico subterrâneo, avaliação da recarga e estabelecimento de balanço hídrico e análise de tendências em relação à modificação naturais ou por interferências antrópicas. A rede de monitoramento é fundamentalmente quantitativa, com o objetivo de registrar as oscilações de nível d'água. Porém, ainda que a rede não tenha como objetivo específico a avaliação qualitativa da água subterrânea foi elaborado um sistema de alerta de qualidade com medições semestrais da condutividade elétrica, pH, potencial de oxi-redução além parâmetros mínimos fixados pela resolução CONAMA 396 para o monitoramento (BRASIL, 2013).

Devido a grande variedade hidrogeológica do país, associada às significativas diferenças sociais e econômicas em relação as demandas por água, houve a necessário de estabelecer critérios de priorização de aquíferos a serem monitorados, tais como: a) Aquíferos sedimentares; b) Importância sócio-econômica da água; c) Uso da água para abastecimento público; d) Aspectos de vulnerabilidade natural e riscos; e) Representatividade espacial do aquífero; f) Existência de poços para monitoramento (BRASIL, 2013). Esse projeto de expansão da rede foi apresentado do Plano de Aceleração do Crescimento (PAC) em 2008 e iniciado em 2009. A RIMAS conta hoje com 274 estações de monitoramento de nível freático, precipitação, temperatura e umidade

relativa, com poços com profundidade que variam de 50 a 100 metros, divididos em 26 unidades aquíferas abrangendo 18 Estados (BRASIL, 2013).

Outro exemplo é a rede de monitoramento realizada pelo Estado de São Paulo, o monitoramento regional da qualidade das águas subterrâneas é executado pela CETESB. A rede de monitoramento começou ser operada em 1990 e tem como principal objetivo subsidiar as ações de prevenção e controle da poluição do solo e da água subterrânea (SÃO PAULO, 2007). Até o ano de 2007 a rede era composta por 184 pontos de amostragem selecionados de forma a abranger os principais aquíferos do Estado, nos quais são realizadas coletas semestrais de amostras de água para determinação de mais de 40 parâmetros. Em 2010 a rede foi ampliada para 238 poços, o projeto enfoca no monitoramento dos aquíferos livres, sendo que a rede de monitoramento abrange os Aquíferos Bauru e Guarani (SÃO PAULO, 2011). De acordo com o São Paulo (2007) a gestão do recurso hídrico subterrâneo prevê o monitoramento integrado da qualidade e quantidade, no Estado de São Paulo a CETESB e o DAEE possuem redes de monitoramento que devem ser operadas conjuntamente.

É necessário que uma rede de monitoramento que integre os países que o SAG faz parte, seja introduzida para que se possa constituir um banco de dados com informações confiáveis tanto de qualidade como de quantidade do recurso hídrico subterrâneo, para posteriormente planejar políticas públicas eficientes.

3. 6 Modelagem de dados de monitoramento freático

Os instrumentos e formas de monitoramento, avaliação da vulnerabilidade de um aquífero e a outorga de uso da água são ferramentas essenciais para desenvolvimento sustentável de um sistema aquífero. Assim a análise espacial e temporal do estado das águas subterrâneas deve ser realizada através de monitoramento sistemático do meio subterrâneo, e este pode ser feito de diversas formas, conforme o método adequado para cada caso.

Há diversos métodos para estimativa do nível freático, bem como de sua recarga, que de acordo com Gomes (2008) cada método terá suas limitações e confiabilidade o que irá depender da escala de estudo e da

qualificação do pesquisador envolvido. Os métodos produzem estimativas nas mais diversas escala de tempo e espaço, abrangendo uma série de complexidade (HEALY & COOK, 2002).

Gomes (2008) cita diversos métodos e maneiras para se estimar o fluxo subterrâneo para os corpos de água superficiais, entre eles o método de balanço hídrico, em especial o balanço hídrico do canal, uso de infiltrômetros, mini-piezômetros e lisímetros de fundo de rio, traçadores e modelos hidrométricos em escala de bacia hidrográfica.

De acordo com Gómes, Rodríguez & Vives (2010) escolher uma técnica que seja apropriada para monitorar será de acordo com o objetivo do estudo, precisão dos resultados e escalas temporais e espaciais.

A seguir são descritos os principais meios para se determinar a recarga e flutuação dos níveis do aquífero.

3. 6. 1 Método do Balanço Hídrico

As etapas do ciclo hidrológico, que ocorrem em determinada região, pode ser explicada pelo denominado método do balanço hídrico, que envolve em sua análise grande variabilidade espacial (SILVA *et al.*, 2012). O método do balanço hídrico é segundo Gomes (2008) utilizado para estimar quantitativamente os recursos hídricos e os impactos antrópicos no ciclo hidrológico de uma bacia hidrográfica, são incorporados no modelo todos os parâmetros que irão influenciar na medição, tais como precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial e os fluxos no subsolo. A equação do balanço hídrico é (SCALON *et al.*, 2002):

$$P + Q_e = ET + Q_s + \Delta_s \quad [1]$$

Onde P é a precipitação (pode incluir a irrigação), Q_e e Q_s entrada e saída de fluxo, ET é a evapotranspiração, ΔS é a variação de armazenamento de água.

Para estimação do balanço hídrico de uma determinada bacia devem-se inserir dados de entrada e de saída para que seja possível quantificar o que se pretende. A equação para estimação do balanço hídrico para zona saturada pode ser descrito por (SCHICHT & WALTON, 1961 *apud* SCALON, 2002):

$$R = \Delta S^{zs} + Q^b + ET^{zs} Q_s^{zs} - Q_e \quad [2]$$

R é a recarga, ΔS^{zs} é o armazenamento subsuperficial, Q^b é o fluxo de base, ET^{zs} é a evapotranspiração da zona saturada, $Q_s^{zs} - Q_e$ é o fluxo líquido subsuperficial e inclui os efeitos causados por bombeamentos.

De acordo com Scalon *et al.* (2002) há a vantagem de utilizar este método devido a facilidade de disponibilidade de dados, porém uma das principais limitações é que a precisão da estimativa irá depender da precisão com a qual as outras componentes foram estimadas.

3. 6. 2 Método de Flutuação da Superfície Livre (WTF – Water Table Flutuation)

O Método de Flutuação da Superfície Livre (WTF: Water Table Flutuation) é muito utilizado para estimativas de recarga e consequente de medidas de níveis freáticos, é aplicável somente para aquíferos livres e há necessidade de se ter dados da porosidade drenável.

O método WTF considera que o aumento do nível freático ocorre por meio da água subterrânea que abastece o aquífero (GOMES, 2008). A oscilação dos níveis pode flutuar de acordo com o volume de precipitação, declividade do terreno, características do aquífero, como formação geológica (MOON *et al.*, 2004).

Este método baseia-se na premissa que a elevação do lençol freático é devido à recarga de água no aquífero, esta recarga é descrita como (HEALY & COOK, 2002):

$$R = S_y \frac{dh}{dt} = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad [3]$$

Onde R é a recarga, S_y é o rendimento específico, h altura do lençol freático, t o tempo e Δh é a diferença entre os níveis freáticos entre a segunda e a primeira medição do nível de água. Healy & Cook (2002) afirmam que o método é

simples e fácil de ser operado, mas trás limitações quanto: é aplicado a meios que apresentam acentuada oscilação de níveis e os poços de monitoramento devem ser localizados em áreas que abrangem a bacia como um todo. A flutuação do nível freático pode ser atribuída a vários fatores, como a sazonalidade de precipitação, evapotranspiração, irrigação e bombeamento de água subterrânea, o método WTF é aplicado a eventos de curto prazo e em aquíferos rasos, e esses parâmetros devem ser identificados para melhor estimar a recarga e a oscilação.

3. 6. 3 Métodos baseados na interação rio – aquífero

A interação entre água subterrânea e superficial é questão complexa e dependerá de diversos fatores, tais como topografia, forma do leito, carga hidráulica, variação do regime de precipitação e padrão de fluxo subterrâneo (HEWLETT & HIBBERT, 1963, *apud* CEY, 1998). Sophocleous (2002) menciona que estudo sobre a interação entre o sistema de água superficial e subterrâneo vem sendo estudado desde 1960 devido a problemas de eutrofização e de chuva ácida, e atualmente tem ganhado destaque devido ao aumento do uso de água subterrânea.

Segundo Cey (1998) a interação entre rio e aquífero pode ser influenciada pelas condições químicas e biológicas existentes no meio ambiente subterrâneo e superficial, e o entendimento e a quantificação da interação entre estes dois sistemas é através de métodos de mensuração do fluxo subterrâneo próximo ao leito do rio.

As técnicas mais utilizadas para estimação da relação entre o nível freático e o corpo hídrico superficial são medições hidrométricas que exigem medições diretas de condutividade e gradiente hidráulico, medidores de infiltração, medição da vazão e técnicas utilizando traçadores (CEY, 1998).

As interações hidrológicas entre águas de superfície e subsuperfície ocorrem por fluxo lateral através de subsuperfície insaturada e por infiltração da zona saturada, além disso, no caso de carste e fraturas no terreno, as interações irão ocorrer por meio de canais na fratura (SOPHOCLEOUS, 2002).

3. 6. 4 Método de traçadores

Para o monitoramento e mapeamento da qualidade e quantidade da água doce foram desenvolvidas diferentes técnicas, segundo Silva *et al.* (2009) surgiram as técnicas de traçadores, que podem ser utilizadas tanto para águas superficiais como para subterrâneas. Os autores salientam que através desta metodologia podem ser obtidas a comprovação das fontes de água, bem como a comprovação de novos efluentes aquáticos, delineamento e velocidade de fluxo e fontes de poluição.

Traçador é qualquer substância, ou partícula, quer seja química ou biológica, utilizada de forma pontual ou contínua para determinar o comportamento de um sistema ou componente, como o volume de água superficial ou subterrânea (SILVA *et al.*, 2009). Os traçadores podem ser naturais, como por exemplo, isótopos ambientais, temperatura ou mesmo flora e fauna, ou podem ser artificiais, como pigmentos, compostos fluocarbonados, radioativos, químicos, e biológicos como vírus e bactérias.

O uso de traçadores a fim de monitoramento cresceu nas ultimas décadas, pois se mostram uma forma eficiente para monitorar, são cada vez mais utilizados nos mais variados campos das ciências, seja nas áreas ambientais como também da saúde.

3. 6. 5 Modelagem Hidrológica

Através da modelagem das incertezas relacionadas às estimativas sobre a quantidade de água explorada e os parâmetros mencionados, que influenciam seja de modo direto ou indireto a dinâmica do aquífero, pode-se mensurar o risco e examinar casos extremos que possam ocorrer no sistema (GOOVAERTS, 2002). Sendo que os modelos computacionais de fluxo subterrâneo podem ser ferramentas bastante úteis para auxiliar na gestão do recurso subterrâneo.

Simulações de modelos são bastante utilizados em estudos hidrológicos. Estimativa de recarga e flutuação de níveis freáticos podem ser obtidos através do processo de calibração de modelo. Os valores dos parâmetros

do modelo são ajustados de modo que a simulação do nível da água esteja em concordância aos níveis de água medidos a campo.

A calibração de modelo é o processo de ajustar os dados de entrada (parâmetros) do modelo, de forma que a saída corresponda às observações independentes ou medições. Parâmetros são as propriedades que interferem na dinâmica do meio em análise, tais como a condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento, níveis iniciais do lençol freático, precipitação, evapotranspiração, vazão de um rio, entre outros. Durante processos de calibração, múltiplos modelos são executados, valores para um ou mais parâmetros são ajustados entre os modelos, e os resultados simulados são avaliados, em relação ao ajuste do modelo, se foi satisfatório (HEALY, 2010).

Modelos hidrológicos tem sido uma importante ferramenta para estudos de processos hidrológicos e impactos antropológicos no ciclo hídrico. Modelos matemáticos são governados por leis de conservação de massa e no momento são utilizados para descrever as variações temporais e espaciais do sistema hídrico, com base nas informações climatológicas, uso e cobertura da terra e hidrologia. Modelar as respostas hidrológicas a várias forças naturais e antrópicas tem contribuído para o conhecimento dos processos físicos, tais como fluxo e transporte em superfície e subsuperfície, interação entre a superfície e atmosférica (YU, 2003).

Assim modelos hidrológicos fisicamente embasados possibilitam a representação de processos hidrológico e distribuição espacial de dados (YU, 2003). Em geral, os modelos hidrológicos seguem cinco etapas, (Figura1).

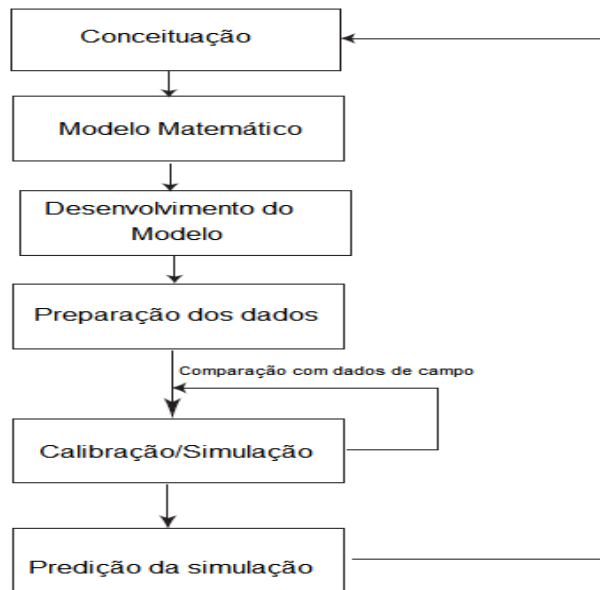


Figura 1. Diagrama das etapas de calibração de um modelo hidrológico

Após a modelagem hidrológica estabelecida, o modelo conceitual pode ser construído para descrever o sistema hidrológico, para posteriormente ser realizado a sua simulação. No segundo passo, diversos modelos matemáticos podem ser utilizados para descrever processos individuais dentro do sistema hidrológico.

O terceiro passo diz respeito à preparação dos dados, isto é copilar e analisar dados meteorológicos e hidrológicos para a simulação. Dados adicionais podem ser obtidos através de estudos laboratoriais e trabalhos em campo. Depois dos dados terem sido integrados aos modelos, deve ser realizada a calibração para avaliar o desempenho do modelo. A calibração do modelo pode ser usada para prever a resposta hidrológica de várias forças externas, como por exemplo, futuro uso da água, mudança do uso e ocupação do solo e mudanças climáticas (YU, 2003).

Portanto, a calibração de modelos é uma demonstração que o modelo foi capaz de reproduzir as observações obtidas a campo, utilizando valores das diversas variáveis hidrológicas (YU, 2003). A dificuldade na obtenção de uma calibração satisfatória se deve ao fato dos valores hidrológicos e parâmetros hidráulicos estarem sujeitos a incertezas.

Quando se trata de análises em meio ambiente subterrâneo, como recarga e oscilações de níveis freáticos as incertezas são claras, devido a grande quantidade de parâmetros que interferem na sua dinâmica, podendo ser exemplificados por variáveis diretas como precipitação, evapotranspiração e espessura da zona não saturada, ou indiretas como vegetação e manejo e uso da terra.

3. 6. 6 Modelagem de séries temporais

Séries temporais, também chamadas de séries históricas, são sequências de observações alcançadas em intervalos de tempo durante certo período. Na avaliação de séries temporais pretende-se modelar o fenômeno em estudo e com isso descrever o comportamento da série, fazer estimativas e enfim analisar os fatores que influenciam o comportamento da série histórica (LATORRE, 2001). Latorre (2001) menciona em seu estudo que há um conjunto de processos estatísticos disponíveis que dependerá do modelo selecionado ou estimado, e também do tipo de série analisada e do objetivo do trabalho.

Morettin & Tolo (1987) afirmam que uma série temporal é qualquer conjunto de dados observados ordenados no tempo, composto por quatro elementos: 1) Tendência, que irá verificar a direção de deslocamento da série, ao longo de um período de tempo; 2) Ciclo, que é o movimento da série que se repete ao longo do tempo observado; 3) Sazonalidade, que relata as flutuações periódicas de comprimento constante, repetindo nos períodos; 4) Ruído aleatório ou erro, que é o que não é explicado pelos outros fatores da série, ou seja, o que o modelo não consegue captar.

De acordo com Soldera (2011) os estados dos fenômenos na natureza mudam com o tempo, e a dinâmica de seu comportamento pode ser descritas por modelos de séries temporais, as quais podem ser utilizadas para estimar parâmetros específicos. Esses parâmetros específicos são estimados com a finalidade de obter características que se desenvolvem no tempo (SOLDERA, 2011), que de acordo com Knotters (2001) as características podem ser utilizadas em situações futuras.

Os objetivos das análises de séries temporais em geral são: investigação do mecanismo que gerou a série; realizar previsões de valores futuros da série temporal; descrever comportamentos por meio de gráficos; procurar periodicidade relevante nos dados (BEZERRA, 2006). De acordo com Bezerra (2006) em todos estes casos podem-se construir modelos determinísticos ou estocásticos, tanto em domínio de tempo como de frequência. Quando valores podem ser representados por uma função matemática e dita estacionária, porém quando envolve além da função matemática do tempo um termo aleatório será denominada estocástica (OLIVEIRA & FAVERO, 2002).

Segundo o modelo proposto por Box & Jenkins (1976) a análise de série temporal pode ser realizada através das seguintes etapas:

- i) identificação do modelo;
- ii) estimação dos parâmetros;
- iii) verificação;
- iiii) previsão

De acordo com Soldera (2011) na etapa de identificação é analisado que tipo de processo estocástico é mais representativo para a série temporal estudada, a identificação inicia-se com uma análise do gráfico da série histórica. Pode haver presença de componente sazonal ou outro tipo de tendência. Mas nesta etapa há a necessidade de outro instrumento para análise, a Função de Autocorrelação (ACF), ou correlação serial de ordem K e a Função de Autocorrelação Parcial (PACF).

A ACF irá medir a correlação existente entre as observações que se encontram a K períodos distantes, e remove o efeito causado pelas correlações intermediárias, ou seja, entre Y_t e Y_{t-k} . De acordo com Hipel & McLeod (1994) o coeficiente de autocorrelação de uma série temporal denominado ρ varia de 1 a -1, sendo classificada como positiva se $\rho = 1$ e negativa se $\rho = -1$ e quando $\rho = 0$ não há correlação nas séries observadas. Em resumo a ACF demonstra o quanto um processo é correlacionado a ele mesmo em dois instantes de tempo diferentes, sendo assim uma medida de dependência temporal. Em relação a PACF, Hipel & McLeod (1994) define como sendo uma medida da intensidade da

relação entre duas observações em uma dada série de dados estudada, esta função tem efeito dos demais dados da série.

A análise dessas duas funções irá auxiliar a indicar o tipo de processo estocástico que pode ser assumido (autorregressivo (AR), média móvel (MA), autorregressivo/média móvel (ARMA) e a ordem que este processo possui. Se ρ diminuir bruscamente para zero, pode-se dizer que a série é estacionária. Segundo estudos desenvolvidos por Pindyck & Rubinfeld (2004), a ACF para uma série estacionária declina à medida que k , o número de defasagens, se torna maior. Ainda segundo os autores, não acontece com séries não estacionárias. Os autores complementam que uma das características das funções de autocorrelação é que elas iniciam com valores altos (próximo a 1, na escala de -1 a 1) e diminuem gradualmente quando se trata de uma série não estacionária.

A etapa de verificação é indicada para avaliar se o modelo identificado e posteriormente estimado foi satisfatório, e se sim se pode utilizá-lo para previsão. Se caso não for adequado o modelo deve-se identificar e estimar outro (SOUZA, 2006). Geralmente para verificar se o modelo foi adequado é necessário analisar o resíduo (ruído branco); definir que tipo e ordem do modelo, com isso verificar se o modelo está superespecificado e subespecificado, sendo que no modelo não deve conter parâmetros em excesso.

A etapa final é a previsão, que consiste na simulação do sistema pelo modelo com parâmetros ajustados para quantificação de sua resposta a diferentes entradas, sendo este o objetivo principal, o modelo depois de ser ajustado e verificado é usado para representar a saída do sistema para situações desconhecidas (TUCCI, 2005).

As análises de séries temporais são importantes em diversas áreas de estudo, permitindo fazer uma análise prévia através dos gráficos gerados e análises detalhada dos cenários por meio dos diversos modelos.

De acordo com Manzione *et al.* (2007) a perda de água e a recarga de um aquífero são parâmetros que possuem variabilidade no espaço e no tempo, e isto se explica devido as diferenças existentes nos solos em relação a absorção, retenção de água, aos efeitos do regime climático e a exploração de

água. Assim o monitoramento e a avaliação de cenários associados a estimativas de qualidade e quantidade de água é fundamental para gerar medidas necessárias para uso sustentável da água, quer seja superficial ou subterrânea.

Segundo Manzione *et al.* (2012) as geotecnologias aliam as informações e a análise estatística para avaliação local e regional de áreas de recarga, porém é necessário estimular a conexão de fontes de informações nos modelos de predição espacial para melhorar as estimativas e diminuir as incertezas dos resultados. Dados sobre a dinâmica de níveis freáticos são importantes para balancear os interesses econômicos e ecológicos quanto ao uso do solo e da água (VON ASMUTH & KNOTTERS, 2004). No caso de dados de poços de monitoramento de níveis freáticos, as informações são poucas e fundamentais para o sucesso de sistemas agrícolas instalados sobre reservas de água subterrânea.

Modelar a relação dinâmica entre o saldo hídrico e a oscilação de níveis freáticos a partir de modelos fundamentados em séries temporais é uma ferramenta importante para análise da dinâmica dos recursos hídricos subterrâneos. Diante disto, no campo das análises de séries temporais, modelos de função de transferência de ruído (transfer-function noise models-TFN) têm sido aplicados para descrever a relação dinâmica entre a precipitação excedente e as alturas de lençol freático (BOX & JENKINS, 1976; HIPEL & McLEOD, 1994; TANKERSLEY & GRAHAM, 1994; VAN GEER & ZUUR, 1997; YI & LEE, 2003). O sistema transforma séries de observações de entrada (variáveis explicativas) em séries de saída (variável de resposta, no caso alturas de lençol freático), conforme a Figura 5, as variáveis vão sendo inseridas ($X_{1,t}$; $X_{2,t}$; $X_{3,t}$; ...), junto ao ruído e posteriormente transformadas em uma série de saída (Z_t).

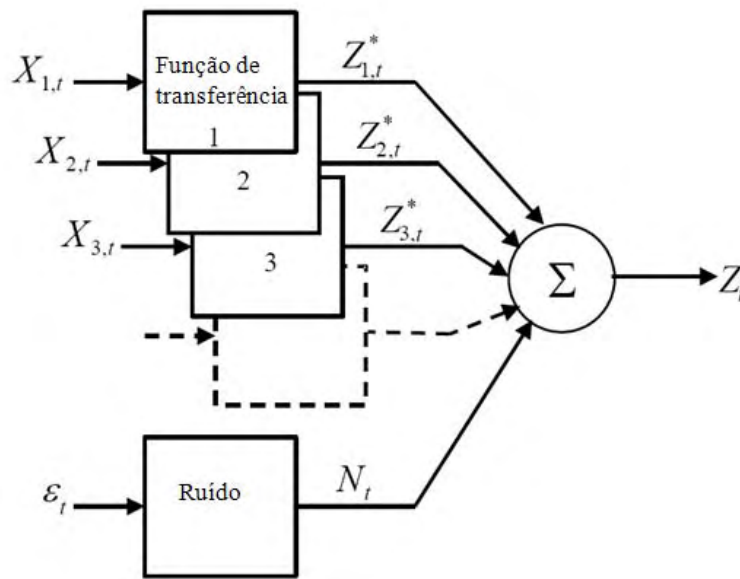


Figura 2. Função de Transferência de Ruído

As variáveis de entrada são introduzidas, assim como um termo de ruído estocástico, e sumarizadas por um termo aditivo como a resposta da variável de saída. Basicamente funcionam como um modelo de regressão linear múltipla (MANZIONE, 2007).

O modelo PIRFICT (Predefined Impulse Response Function In Continuous Time) é uma alternativa a modelos TFN em intervalos de tempo discretos apresentada por Von Asmuth *et al.* (2002). No modelo PIRFICT, o pulso de entrada é transformado em uma série de saída por uma função de transferência em tempo contínuo. Os coeficientes dessa função não dependem da frequência de observação. Essa transformação é completamente governada pela função de impulso e resposta (IR). Para uma descrição detalhada do modelo PIRFICT, Von Asmuth *et al.* (2002) apresentam um exemplo de entrada e saída, Von Asmuth & Kotters (2004) explicam os parâmetros do modelo e sua interpretação física, e Von Asmuth *et al.* (2008) introduzem uma aproximação mais complexa usando múltiplas series de perturbações nos níveis freáticos.

Dentre os fatores que podem perturbar os níveis Von Asmuth *et al.* (2008) citam a precipitação, evapotranspiração, bombeamentos, níveis dos rios da bacia, pressão barométrica, intervenções hidrológicas. Essas variáveis podem ser entradas do modelo PIRFICT para explicar a oscilação dos

níveis na bacia. Assim este tipo de modelo é uma alternativa para entender como a dinâmica do manancial subterrâneo se comporta para poder realizar uma gestão eficiente.

4. MATERIAIS E METODOS

4. 1 Área de Estudo

A Bacia do Ribeirão da Onça localiza-se na região do Município de Brotas-SP (Figura 3), ao centro-norte do Estado de São Paulo, entre os paralelos 22°10' e 22°15' latitude sul e entre os meridianos 47°55' e 48°00' longitude oeste (WENDLAND *et al.*, 2007).

O Ribeirão da Onça é um dos formadores do Rio Jacaré-Guaçu, afluente do Rio Tietê pela margem direita. A região pertence à área de afloramento do Aquífero Guarani e é de extrema importância por apresentar características representativas típicas da região de afloramento do SAG no Estado de São Paulo e devido a sua alta representatividade como possível área de recarga do sistema.

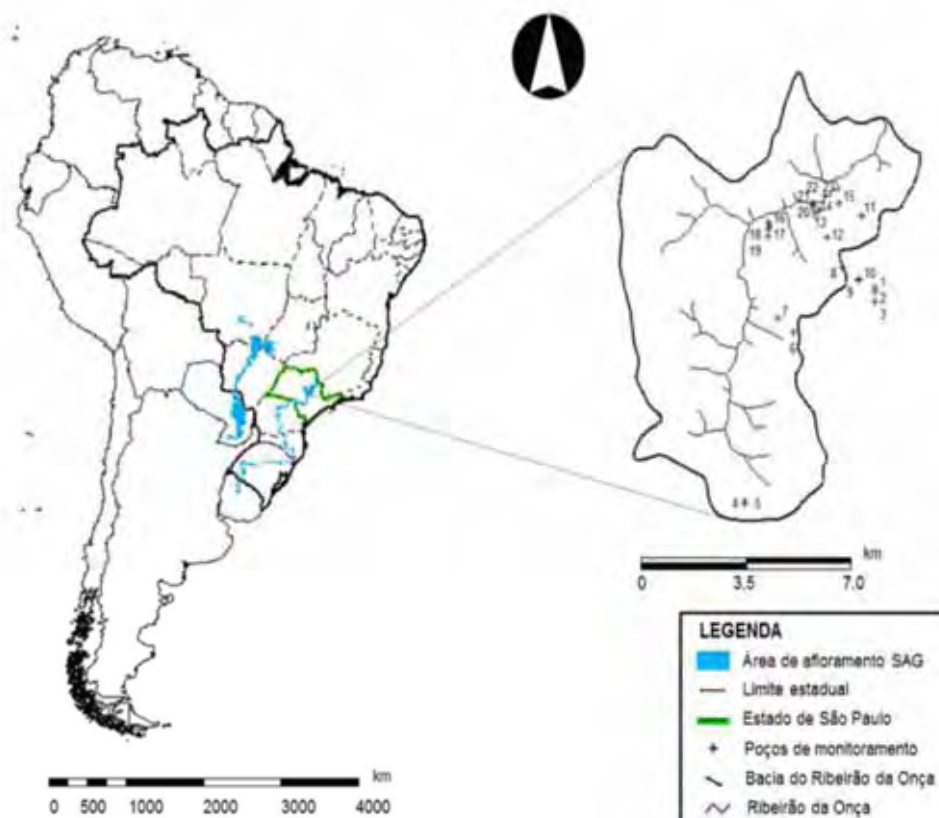


Figura 3. Localização dos poços e instrumentos na Bacia do Ribeirão da Onça, Brotas/SP

Pompêo (1990) apresenta as seguintes feições fisiográficas para a bacia do Ribeirão da Onça, com base em mapa de escala 1:10.000:

- Área de drenagem igual a 65 km²;
- Perímetro 42 Km;
- Comprimento axial 11 Km;
- Extensão do curso d'água principal igual a 16 Km;
- Comprimento total do curso d'água 55 Km;
- Altitude máxima 840 m;
- Altitude mínima 640 m;
- Declividade média igual a 7,6 m.Km⁻¹.

Uma característica importante desta bacia é situar-se quase inteiramente em uma das regiões de afloramento da Formação Botucatu, podendo fornecer elementos de interesse para o aprofundamento dos

conhecimentos sobre o comportamento do SAG. A bacia do Ribeirão da Onça passa a jusante, sobre *sills* de diábasio, e faz parte do grupo São Bento de idade Mesozoica, além de possuir ainda a Formação Bauru recobrindo a Formação Botucatu e os possíveis basaltos da Formação São Bento (GOMES, 2008).

De acordo com Castro Júnior (2008) na bacia do Ribeirão Onça há cinco principais tipos pedológicos, sendo representados por: a) areia quartzosa profunda (AQ); b) latossolo vermelho- amarelo álico (LV- 2); latossolo roxo eutrófico (LRe); c) terra roxa estruturada distrófica ou eutrófica (TE2); d) solos hidromórficos (Hi); e) latossolo vermelho- escuro distrófico ou álico (LE- 1).

O SAG é formado por rochas sedimentares e está inserida geologicamente nos limites da Bacia Sedimentar do Paraná, sua estratigrafia constitui rochas do período Triássico, Jurássico e Cretáceo, que determinam a capacidade de armazenamento e transmissividade de água do sistema aquífero (LUCAS, 2012). De acordo com Rabelo & Wendland (2009) os arenitos do período Jurássico que fazem parte da Formação Botucatu são de origem eólica e os arenitos do período Triássico que faz parte da Formação Pirambóia é de origem fluvial-lacustre/eólica, sendo que ambas constituem o SAG.

A Formação Botucatu está sobreposta à Formação Pirambóia, estão cobertas por camada de basalto proveniente da Formação Serra Geral e por camadas sedimentares do Grupo Bauru (SRACEK & HIRATA, 2002)

A temperatura média da região é 20,5°C, valor obtido na estação do CRHEA (Estação Climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada) (GOMES, 2008). Segundo a classificação climática de Koppen a bacia possui clima subtropical úmido com chuvas no verão (Cwa), variando para o clima tropical úmido com inverno seco, apresentando precipitação média anual entre 1300 e 1400 mm.

A Bacia do Ribeirão da Onça é uma típica bacia hidrográfica encontrada no interior do Estado de São Paulo, fortemente sujeita a utilização econômica, não possui áreas industriais e sendo essencialmente de uso agrário e pecuário, apresentando diversos cultivos como cana de açúcar, citros, eucalipto, pastagens, entre outras culturas. Consequentemente, a bacia está exposta a

mecanismos potenciais de contaminação decorrente de atividades agrícolas (WENDLAND *et al.*, 2007).

Manzione *et al.* (2011), realizaram uma classificação de imagens multitemporal de imagem do satélite Landsat da Bacia do Ribeirão da Onça, entre os anos de 2000 e 2011, para análise dos diferentes usos do solo na bacia. Os autores aplicaram um Modelo Linear de Mistura Espectral sobre as imagens, obtendo imagens de fração de solo, vegetação e sombra a partir da resposta espectral do pixel nas diversas bandas, resultado em mapas temáticos de uso e ocupação do solo, divididos em classes dos alvos presentes na cena: cana-de-açúcar, pastagens, soja, citros, eucalipto e mata nativa. A Figura 4 ilustra o mapa do uso e ocupação do solo confeccionado pelos autores para o ano de 2003 e 2010.

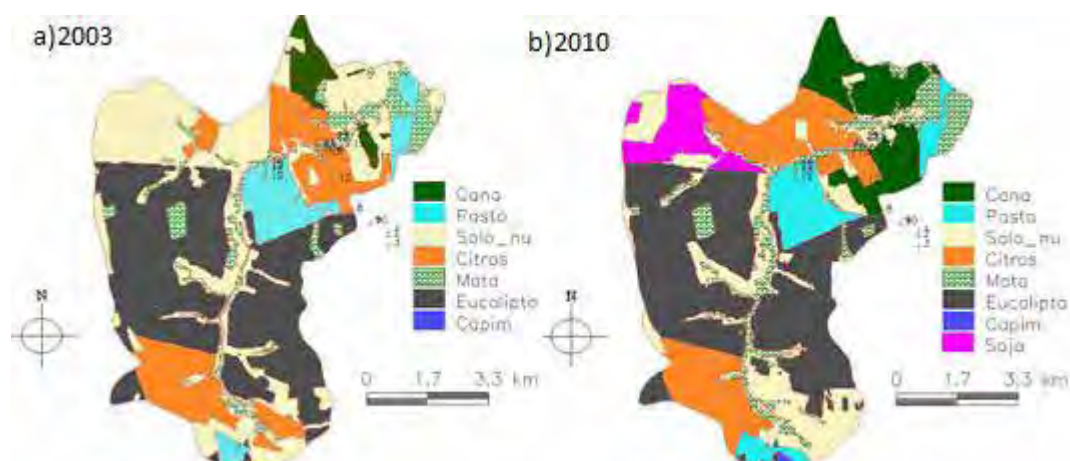


Figura 4. Mapa de uso e ocupação do solo na Bacia do Ribeirão da Onça para os anos de 2003 (a) e 2010 (b) gerados a partir da classificação de imagens Landsat
Fonte: Manzione *et al.* (2011)

Através da visualização dos mapas pode-se verificar que houve uma mudança do uso do solo na bacia, no ano de 2003 a maior parte da área era ocupada pela cultura de eucalipto e citros, havendo uma parcela significativa de solo nu. Ao se comparar com o ano de 2010 verifica-se que a cultura de eucalipto é ainda a maior parte do uso do solo, houve uma diminuição do solo nu e aumento da cultura de citros e cana de açúcar, principalmente na parte norte da bacia. São culturas representativas do sistema agricultura do Estado de São Paulo.

4. 2 Dados históricos

A bacia do Ribeirão da Onça e arredores possui 23 poços de monitoramento de níveis freáticos (piezômetros), nos quais 20 encontram-se em operação e 3 estão desativados (poço 1, 6 e 7) por problemas construtivos, o poço 21 também está representando o nível de água superficial, e apresenta valores positivos. Os poços 9, 10, 2 e 3 encontram-se fora do limite da bacia.

Os poços estão localizados em regiões que representam diferentes usos e ocupações do solo na bacia e ao redor (Tabela 1), permitindo observar as diferenças no comportamento dos níveis freáticos sob diferentes exigências hídricas, como no caso do eucalipto, pastagens e citros. Uma equipe do LHC-SHS-EESC-USP percorre os poços e estações de monitoramento a cada 15 dias, mediando às variáveis de interesse (níveis dos poços e vazão da bacia), coletando e descarregando dados observados no intervalo (dataloggers, pluviômetros e dados climatológicos) e verificando mudanças no uso do solo na bacia (colheitas, queimadas, novos plantios).

Os dados de oscilações dos níveis formam uma série com início em abril de 2004 até fevereiro de 2013. Também estão disponíveis séries de vazão e altura do nível do ribeirão medidos na estação fluviométrica da bacia.

Próxima à bacia (1,5 km) encontra-se a Estação Climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada da Universidade de São Paulo (CRHEA/USP), o que permite a inclusão de dados históricos de precipitação, insolação e infiltração nos estudos de estimativa de evapotranspiração para a realização do balanço hídrico da bacia. Os dados climáticos disponíveis na estação formam uma série temporal com início em 1974.

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

Poços	Localização		Cultura
	Latitude Sul	Latitude Oeste	
1	22°11'31,2"	47°55'18,5"	Eucalipto/Pasto
2	22°11'34,5"	47°55'18,7"	Eucalipto/Pasto
3	22°11'43,3"	47°55'18,7"	Eucalipto/Pasto
4	22°14'37,6"	47°57'46,5"	Pasto
5	22°14'37,2"	47°57'45,1"	Pasto
6	22°12'07,9"	47°56'49,0"	Eucalipto
7	22°11'55,9"	47°57'05,6"	Eucalipto
8	22°11'12,0"	47°55'53,8"	Citros
9	22°11'23,1"	47°55'35,9"	Eucalipto
10	22°11'23,3"	47°55'36,2"	Eucalipto
11	22°10'27,3"	47°55'31,0"	Cana de açúcar
12	22°10'45,3"	47°56'10,3"	Citros
13	22°10'22,2"	47°56'20,0"	Citros
14	22°10'20,0"	47°56'17,0"	Citros
15	22°10'15,0"	47°55'56,5"	Cana de açúcar
16	22°10'30,33"	47°57'14,3"	Pasto
17	22°10'33,9"	47°57'14,0"	Pasto
18	22°10'36,8"	47°57'14,6"	Pasto
19	22°10'42,7"	47°57'15,0"	Pasto
20	22°10'17,3"	47°56'24,1"	Mata ciliar
21	22°10'14,3"	47°56'24,8"	Mata ciliar
22	22°10'08,3"	47°56'11,5"	Mata ciliar
23	22°10'08,5"	47°56'11,5"	Mata ciliar
Rio	22°10'14,3"	47°56'24,8"	Mata ciliar

Dentro da bacia encontram-se as três estações, em diferentes usos do solo (pasto, cerrado e citros). As estações climatológicas compactadas automáticas estão equipadas com dataloggers para coleta de dados de precipitação, radiação solar, velocidade e direção do vento (a 2 metros de altura), umidade relativa do ar e temperatura, para refletir com maior precisão o micro clima da bacia. As estações contam com pluviômetros de báscula (modelo PYR – Apogee, faixa de medida 300 a 1100 mm e 0 a 200 W/m²) que registra a intensidade de chuva a cada 0,2 mm, anemômetros de canecas (modelo 03001 – R. M. Young, faixas de medida 0 a 50 m/s $\pm$ 0,5 m/s, com rajadas de 60m/s), e sensores de temperatura e umidade (modelo CS215- CSL, faixa de medida de - 40°C a +70°C $\pm$ 0,9°C FSR e 0 a 100% $\pm$ 4% FSR).

As medições dos níveis freáticos foram feitas por meio de um medidor de nível manual, em frequência quinzenal. Os poços apresentam diferenças em relação aos níveis freáticos e profundidade de filtro.

Para análises meteorológicas foram utilizadas séries temporais de precipitação e evapotranspiração, sendo que para a estimação da evapotranspiração foi utilizado o método Penman- Monteith parametrizado pela FAO (ALLEN *et al.*, 1998). Este método utiliza variáveis climatológicas, tais como radiação solar, temperatura, umidade e velocidade do vento. A equação a seguir representa o método de Penman- Monteith- FAO para estimar a evapotranspiração:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \frac{\gamma 900U_2(e_s - e_a)}{T + 273}}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad [4]$$

Onde Δ é a declividade da curva de pressão de vapor em relação a temperatura (KPa.°C⁻¹), R_n é o saldo da radiação diária (MJ.m⁻².dia⁻¹), G é o fluxo total de calor no solo (MJ.m⁻².dia⁻¹), e_s é a pressão de saturação de vapor (KPa), e_a representa a pressão atual de vapor (KPa), U_2 é a velocidade do vento a 2 metros de altura (m), T é a temperatura média do ar (°C), γ é a constante psicométrica (KPa.°C⁻¹). Quando os valores de R_n , G , U_2 e T são medidos em estação meteorológica necessita-se calcular os valores de Δ , γ , e_s e e_a (CONCEIÇÃO, 2006). O valor de Δ é calculado por:

$$\Delta = \frac{4098 \left[0,6108 \exp \left(\frac{17,27T}{T + 273,3} \right) \right]}{(T + 237,3)^2} \quad [5]$$

O coeficiente γ é calculado pela seguinte equação:

$$\gamma = 0,665 \cdot 10^{-3} P_{atm} \quad [6]$$

A P_{atm} diz respeito à pressão atmosférica local, que pode ser calculada com base na altitude local em metros (z):

$$P_{atm} = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,26} \quad [7]$$

A diferença de e_s e e_a é o déficit de saturação e são calculados utilizando as seguintes expressões:

$$e_s = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27T}{T + 237,3} \right] \quad [8]$$

$$e_a = \frac{e_s UR}{100} \quad [9]$$

4. 3 Modelagem da dinâmica do aquífero

4. 3. 1 Modelagem das séries temporais de monitoramento

Utilizando-se o modelo PIRFICT que é governado por Função de Impulso Resposta, que de acordo com os estudos de Manzione (2007) a flexibilidade desta função estabelece a relação entre as variáveis climáticas e os níveis freáticos (Pearson III df) permitindo ao modelo o ajuste a diferentes sistemas hidrológicos.

Neste trabalho se para explicar a relação entre as variáveis climáticas e a dinâmica de oscilação dos níveis do aquífero foram utilizados diversos buscando melhorar sua acurácia. Dados regionalizados por tipo de uso do solo, de precipitação e evapotranspiração coletados pelas quatro estações climatológicas instaladas dentro da bacia foram adicionados aos modelos, assim

como séries de oscilação dos níveis do rio, disponíveis na estação fluviométrica próxima ao posto de monitoramento da vazão do ribeirão.

Os dados de séries temporais de precipitação, evapotranspiração e nível do rio foram inseridos como variáveis de entrada para calibração do modelo para cada poço. As séries de evapotranspiração foram ajustadas levando-se em conta o coeficiente da cultura (K_c). Foram escolhidos tais variáveis como entrada para calibração do modelo pelo fato de ser uma área de afloramento do SAG e sua recarga está intimamente relacionada ao regime de precipitação da área de estudo, já o nível do rio para verificação o quão este recurso influência nas oscilações dos níveis freáticos do aquífero.

Foram selecionados oito poços de monitoramento que estão alocados em áreas com diferentes usos e ocupação da terra e diferentes espessuras de zona não saturada. As áreas de afloramento e recarga do SAG são constantemente afetadas pelo uso agrícola, fazendo com que os riscos de contaminação por esta atividade sejam significativos neste sistema subterrâneo, devido a este fato as culturas da área de estudo representam as principais atividades agrícolas do Estado de São Paulo. A partir disto, realizou-se a estimação dos parâmetros para o modelo, verificando se o ajuste foi satisfatório.

No caso de um simples sistema linear de nível freático, influenciado pelo excesso de precipitação, pode ser utilizada a seguinte equação para modelar a dinâmica do nível freático e o excesso de infiltração (VON ASMUTH, 2012):

$$h(t) = \sum_{i=1}^N h_i^*(t) + d + r(t) \quad [10]$$

$$h_i^*(t) = \int_{-\infty}^t R_i(\tau) \theta_i(t - \tau) d\tau \quad [11]$$

$$r(t) = \int_{-\infty}^t \phi(t-\tau) \partial W(\tau) \quad [12]$$

Onde h é a profundidade do nível observado no t [T], h_i^* é a profundidade do lençol prevista no tempo t relacionado ao estresse i , relacionado a d [L], d é o nível de $h^*(t)$ sem precipitação, ou em outros casos o nível de drenagem local, relacionada a superfície do solo [L]; r são as séries de resíduo [L], R_i é o valor do estresse i no tempo t [L/T], θ é a função de Impulso Resposta [-], ϕ é o ruído da função [-], W é o ruído branco (Wiener) cujas propriedades são $E\{dW(t)\}=0$, $E[\{dW(t)\}^2]=dt$, $E[dW(t_1)dW(t_2)]=0$, $t_1 \neq t_2$ [L].

Ao usar somente a precipitação como entrada e estimar seus efeitos na oscilação do nível subterrâneo podem-se obter a resposta da combinação da zona não saturada e saturada (Figura 5), e se este sistema linear for colocado em séries, a variável saída de uma será a variável entrada de outra, o efeito desta combinação é igual (VON ASMUTH, 2012):

$$h(t) = \int_{-\infty}^t \theta_{sz}(t-t_2) \int_{-\infty}^t \theta_i(t-t_1) \rho(\tau_1) \partial \tau_1 \partial \tau_2 \quad [13]$$

Onde θ_{sz} e θ_{mz} são as funções de resposta da zona saturada e não saturada, respectivamente.

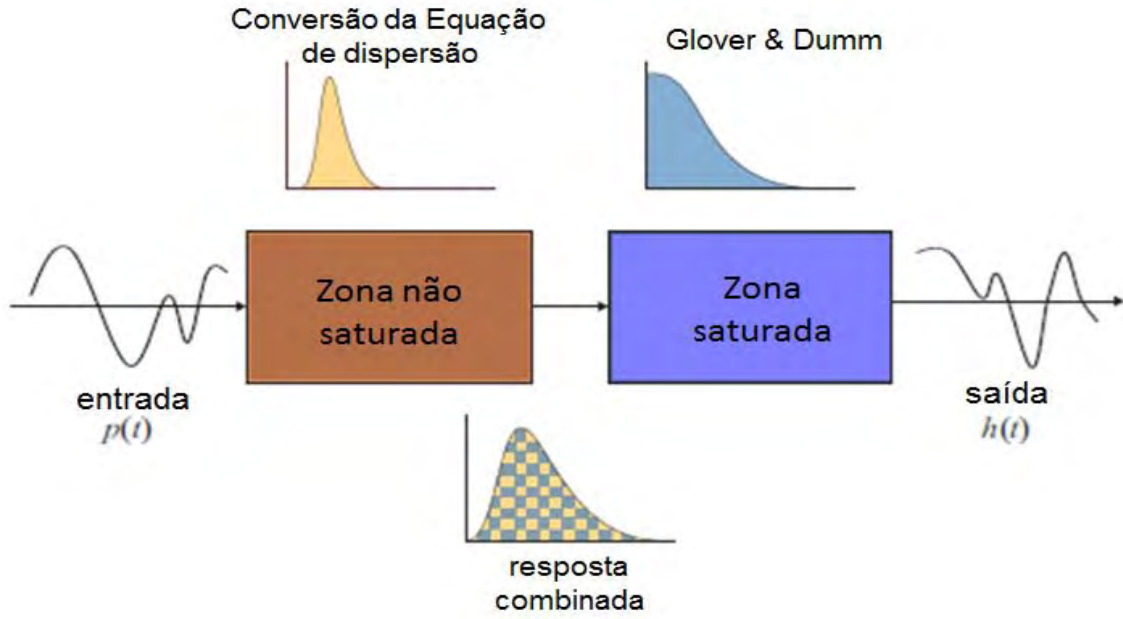


Figura 5. Combinação dos efeitos de respostas da zona não saturada e saturada

Matematicamente a equação 13 é uma convolução integral com a combinação da resposta que é encontrada através das respostas separadas (VON ASMUTH, 2012):

$$\theta_c(t) = \int_{-\infty}^t \theta_{mz}(t-\tau)\theta_{mz}(\tau)\partial\tau \quad [14]$$

Muitos tipos de estresses Ri foram descritos por Von Asmuth *et al.* (2008), $h_i^*(t)$ é associado a estresses como precipitação e evapotranspiração, modelados com a função de transferência de ruídos pelo PIRFICT. Reestruturando, $h_i^*(t)$ é definido pela soma de séries de precipitação e evapotranspiração:

$$h_p^*(t) = \int_{-\infty}^t p(\tau)\theta_p(t-\tau)\partial\tau \quad [15]$$

$$h_{et}^*(t) = \int_{-\infty}^t -et(\tau)f\theta_p(t-\tau)\partial\tau \quad [16]$$

Em geral, sistemas de água subterrânea reagem de diferentes formas quando submetidos a diferentes estresses. Mas há também casos em que diferentes estresses causam similares respostas, como por exemplo, precipitação e evapotranspiração. O efeito da evapotranspiração e_t na profundidade do nível freático h é a mesma que p , mas negativa. Quando a Equação 15 e 16 são a soma do primeiro termo $h_i^*(t)$ da Equação 14, a influência da evapotranspiração é descontada da precipitação, similar ao balanço hídrico.

4. 3. 2 Validação dos parâmetros do modelo fisicamente embasado

A forma da função IR depende muito das circunstâncias hidrologias *in situ*. $\theta(t)$ é uma função de distribuição Pearson tipo III (PIII df, ABRAMOWITZ & STEGUN, 1965). A opção por esse tipo de função se dá por sua natureza flexível, e obtenção de bons ajustes às respostas hidrológicas. Assumindo-se linearidade, a componente determinística da dinâmica do lençol freático é completamente descrita pelos momentos da função IR. Nesse caso, os parâmetros podem ser definidos segundo Von Asmuth *et al.* (2002):

$$\theta(t) = A \frac{a^n t^{n-1} e^{-at}}{\Gamma(n)} \quad [17]$$

$$\phi(t) = \sqrt{2\alpha\sigma_r^2} e^{-\alpha t} \quad [18]$$

Onde A , a , n , são os parâmetros da curva ajustada, $\Gamma(n)$ é a função gama e α controla a taxa de decaimento de $\phi(t)$ e σ_r^2 é a variância dos resíduos. Os parâmetros da função IR podem ser interpretados fisicamente (VON ASMUTH & KNOTTERS, 2004). O parâmetro A é relacionado com a resistência a drenagem (a área da função IR é igual a razão entre a altura média do lençol freático e a recarga média). O parâmetro a é determinado pelo coeficiente de armazenamento do solo (porosidade) e n pelo tempo de convecção e dispersão da precipitação pela zona não saturada. Von Asmuth & Knotters (2004) chamam

atenção para cuidados ao interpretar esses parâmetros da PIII df quanto a seu sentido físico no processo, uma vez que suas bases são empíricas.

Para flutuações de águas superficiais adota-se a chamada função polder de Buggeman como um diagrama (BRUGGEMAN, 1999 *apud* VON ASMUTH, 2012). Esta função representa uma súbita repentina do nível de água em limite de um um aquífero semi confinado, a derivada dada pela função de IR θ_s :

$$\theta_s(t) = - \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi KHt^3}{x^2 S}}} \exp\left(-\frac{x^2 S}{4KHt} - \frac{t}{eS}\right) \quad [19]$$

Onde x é a distância entre o nível de água superficial e o nível observado no poço, KH é a transmissividade e S o coeficiente de armazenamento.

4. 4 Organização e análise dos dados

As séries temporais foram analisadas utilizando o software estatístico R, no qual foi realizado a manipulação, avaliação, interpretação de procedimentos estatísticos, bem como a confecção e visualização de gráficos. A primeira etapa consistiu em verificar as características individuais de cada variável, considerando-as como conjuntos de dados independentes. A segunda etapa realizou-se a investigação inicial das características das variáveis já como séries temporais, e dos tipos de processos que regem o fenômeno de oscilação dos níveis freáticos. Na terceira etapa foram calculadas funções de autocorrelação e autocorrelação parcial, que verificam a correlação entre os instantes temporais dos dados e fornecem indícios do tipo e ordem do processo envolvido (autorregressivo e/ou média móvel).

Após as análises no software R foi utilizado o software Menyanthes (www.menyanthes.nl) para calibração dos modelos baseados nas séries temporais a partir dos dados de monitoramento, e para analisar se

ocorreram tendências. O Menyantes armazena todos os dados de nível de água subterrânea, séries explicativas e modelos de séries temporais em um arquivo de dados, e possui o modelo PIRFICT implementado (VON ASMUTH et al., 2012).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5. 1 Análise exploratória dos dados

Os cálculos referentes às análises exploratórias dos dados incluem avaliação da posição amostral: média, mediana e moda; dispersão amostral: desvio padrão, variância, dispersão interquartil, coeficiente de variação e amplitude total; e medidas de forma: assimetria e curtose. Essa análise inicial foi aplicada com intuito de entender o conjunto de dados e suas variações mais significativas. Também realizou-se a análise exploratória das séries temporais, calculando a função de autocorrelação e autocorrelação parcial para cada poço, buscando identificar as propriedades do processo temporal em análise.

Utilizando o software R também foram elaborados histogramas de distribuição de frequência dos dados e gráficos de função de autocorrelação e autocorrelação parcial, com as séries temporais de níveis freáticos. É importante salientar que as medidas de posição, dispersão e forma foram calculadas para os dados de uma maneira geral, sendo que para a precipitação e evapotranspiração os cálculos correspondem a uma frequência diária, e para os níveis freáticos as análises foram realizadas para uma frequência

quinzenal, enquanto na análise exploratória das séries temporais os dados foram alinhados na forma de uma série histórica em uma frequência mensal.

5. 1. 1 Medidas de posição

Os resultados das medidas de posição amostral podem ser visualizados na Tabela 2. A média, moda e mediana são medidas de localização central em variáveis aleatórias contínuas. A média representa o ponto médio da frequência de dados, a moda o valor que possui maior frequência entre os dados e a mediana é aquela em que a frequência relativa acumulada atinge os 50% (BUSSAB & MORETTIN, 2003). Já os quartis são qualquer um dos três valores que divide o conjunto ordenado de dados em quatro partes iguais, assim o primeiro é o valor aos 25% da amostra e o terceiro quartil equivale a 75% das observações (BUSSAB & MORETTIN, 2003).

Como pode-se observar os valores de posição amostral apresentou variabilidade devido as diferentes flutuações freáticas nos poços monitorados. Os valores dos poços 20, 21, 22 e 23 apresentaram-se menores devido à proximidade ao rio, e por isso seus níveis freáticos são mais superficiais ao se comparar aos demais poços.

Tabela 2. Medidas de posição amostral calculadas para as séries temporais de flutuação de níveis freáticos para o período de abril de 2004 a janeiro de 2013

DADOS	MÉD (m)	1ºQ (m)	MD (m)	3ºQ (m)	MOD (m)
Poço 2	-12,69	-13,74	-12,97	-11,59	-13,44
Poço 3	-15,37	-15,78	-15,49	-15,08	-15,76
Poço 4	-15,97	-16,48	-16,05	-15,08	-16,42
Poço 5	-5,71	-6,22	-5,75	-5,19	-6,02
Poço 8	-20,41	-22,38	-19,82	-19,23	-19,77
Poço 9	-19,12	-21,32	-18,60	-17,30	-17,35
Poço 10	-18,29	-19,60	-17,90	-17,23	-17,53
Poço 11	-16,41	-17,09	-16,65	-15,79	-16,65
Poço 12	-25,20	-26,41	-25,20	-24,48	-24,66
Poço 13	-8,98	-9,71	-9,32	-8,52	-9,28
Poço 14	-5,85	-6,58	-6,18	-5,39	-6,06
Poço 15	-6,87	-7,52	-7,03	-6,51	-6,51
Poço 16	-4,25	-4,74	-4,32	-3,82	-4,31
Poço 17	-10,24	-11,20	-10,34	-9,50	-7,96
Poço 18	-13,04	-14,40	-13,15	-11,84	-12,85
Poço 19	-13,46	-14,78	-13,65	-12,37	-13,46
Poço 20	-2,03	-2,39	-2,11	-1,82	-2,03
Poço 21	0,62	0,75	0,64	0,75	-0,73
Poço 22	-1,32	-1,51	-1,39	-1,23	-1,48
Poço 23	-0,51	-0,64	-0,55	-0,43	-0,56
RIO	0,62	0,75	0,64	0,75	0,73
EVAP	0,003	0,002	0,003	0,018	0,0019
PREC	0,005	0,000	0,000	0,002	0,00

m=metros; MÉD=média; MD=mediana; MOD=moda; 1ºQ=primeiro quartil; 3ºQ=terceiro quartil; EVAP= evapotranspiração; PREC= precipitação

Em relação à evapotranspiração e precipitação os valores menores da estatística exploratória de posição amostral se devem ao fato dos dias monitorados apresentarem grande quantidade de valor zero, principalmente para precipitação.

5. 1. 2 Medidas de dispersão amostral

A Tabela 3 contém os resultados das medidas de dispersão amostral calculadas (desvio padrão, variância, coeficiente de variação e amplitude dos dados).

Tabela 3. Medidas de dispersão amostral calculadas para as séries temporais de flutuação de níveis freáticos para o período de abril de 2004 a janeiro de 2013

DADOS	VAR (m)	DP (m)	CV (%)	MAX (m)	MIN (m)	AMP (m)
Poço 2	4,04	2,01	15,84	-8,12	-16,51	8,39
Poço 3	0,30	0,55	3,57	-13,41	-16,15	2,74
Poço 4	0,61	0,78	4,88	-14,11	-17,60	3,49
Poço 5	0,58	0,76	13,31	-3,77	-7,49	3,72
Poço 8	4,74	2,17	11,00	-16,16	-24,75	8,59
Poço 9	4,90	2,21	11,56	-15,43	-23,14	7,71
Poço 10	2,17	1,47	8,04	-15,44	-20,80	5,36
Poço 11	0,68	0,82	4,99	-14,63	-17,43	2,80
Poço 12	2,91	1,70	0,62	-20,77	-28,22	7,45
Poço 13	1,05	1,02	11,36	-5,00	-10,24	5,24
Poço 14	1,04	1,02	17,43	-2,29	-7,02	4,73
Poço 15	0,95	0,97	14,12	-4,17	-8,67	4,50
Poço 16	0,50	0,71	16,70	-2,36	-7,80	5,44
Poço 17	1,50	1,22	11,91	-6,53	-12,21	5,68
Poço 18	2,74	1,65	12,67	-8,45	-15,91	7,46
Poço 19	2,76	1,66	12,33	-8,49	-16,35	7,86
Poço 20	0,24	0,49	24,14	-0,45	-2,72	2,27
Poço 21	0,02	0,17	27,87	0,95	0,95	0,79
Poço 22	0,07	0,26	22,14	-0,10	-1,59	1,49
Poço 23	0,03	0,17	33,33	0,01	-0,75	1,48
RIO	0,02	0,17	27,87	0,95	0,95	0,79
EVAP	1,07e-6	0,001	33,09	0,005	0,0005	0,005
PREC	0,0001	0,011	222,07	0,05	0,00	0,05

m=metros; VAR=variância; DP=desvio padrão; CV= coeficiente de variação; MAX.= valor máximo; MIN.= valor mínimo; AMP= amplitude; EVAP= evapotranspiração; PREC= precipitação

Em relação aos valores de desvio padrão, pôde-se observar que apresentam valores pouco dispersos variando de alguns centímetros para poucos metros. O coeficiente de variação por ser um valor expresso em porcentagem auxilia a entender melhor o conjunto de dados. Para os poços 3, 4, 10, 11 e 12 o coeficiente de variação foi considerado baixo (menor que 10%), em relação os poços 2, 5, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 18 e 19 os coeficientes de variação são classificados como tendo variação média (10% a 20%), e para os poços 20, 21, 22 e rio os valores são considerados altos (20% a 30%) (GARCIA, 1989). O poço 23, evapotranspiração e precipitação apresentaram coeficiente de variação muito alto (valores acima de 30 %) (GARCIA, 1989). No caso do poço 23 isso ocorre por estar muito próximo do rio e ser muito sensível às variações de nível decorrentes do bombeamento de água do rio para irrigação à montante. Já para evapotranspiração e precipitação as variações são esperadas devido a

sazonalidade marcante na área (POMPÊO, 1990), com estações bem definidas e variações nos níveis de chuva e radiação solar que fazem os valores variarem bastante.

5. 1. 3 Medidas de forma

As medidas de forma são representadas pela assimetria e a curtose, podendo ser visualizado os seus valores na Tabela 4.

A assimetria é o grau de distorção da distribuição em relação a uma distribuição normal, e pode ser classificada como simétrica ou assimétrica, e subdividida em assimétrica negativa (forte ou moderada) e assimétrica positiva (forte ou moderada) (BUSSAB & MORETTIN, 2003). Para ser classificados como assimétricos moderados os valores de assimetria encontram-se entre 0,15 e 1,0, para assimétricos fortes os valores devem ser maior que 1,0 e para simétricos os valores são menores que 0,15 (BUSSAB & MORETTIN, 2003).

Já a curtose indica o formato que curva de distribuição terá em relação ao seu achatamento, e pode ser denominada conforme seu achatamento de leptocúrtica, mesocúrtica ou platicúrtica (BUSSAB & MORETTIN, 2003).

Os poços 2, 4, 5, 10, 11, 12, 15, 17, 18, 19, 23 e evapotranspiração são classificados como assimétricos moderados. Os poços 8, 9, 16, 21 e rio classificados como simétricos e 13, 14, 20, 22 e precipitação como assimétricos fortes. Para se ter mais clareza em relação às classificações foram confeccionados gráficos de histogramas de frequência que podem ser visualizados no APÊNDICE 1.

Embora os poços 4 e 5 pareçam ser simétrico isso não se aplica, pelo fato destes poços estarem inseridos em área de pastagem, são áreas mais degradadas, a água que infiltra é pouco interceptada pela raiz da cultura, contribuindo para que as oscilações dos níveis se tornem mais suave. Aos poços considerados assimétricos fortes, são os poços que se encontram em área de cultura de citros irrigada (13 e 14), por receberem água a todo instante devido ao excesso de irrigação há certa influência na recarga e flutuação dos níveis, e os

poços localizados próximos ao rio (20 e 22) que são mais sensíveis as variações climáticas e assim esta classificação é considerada válida.

Tabela 4. Medidas de forma calculadas para as séries temporais de flutuação de níveis freáticos para o período de abril de 2004 a janeiro de 2013

DADOS	ASSIMETRIA	CURTOSE
Poço 2	0,44	-0,36
Poço 3	1,24	-3,57
Poço 4	0,33	-0,21
Poço 5	0,17	-0,23
Poço 8	-0,26	-0,70
Poço 9	-0,24	-1,19
Poço 10	0,49	-1,09
Poço 11	0,93	-0,85
Poço 12	0,93	0,62
Poço 13	1,51	2,20
Poço 14	1,38	1,42
Poço 15	0,91	0,84
Poço 16	-0,15	2,88
Poço 17	0,72	0,15
Poço 18	0,39	-0,63
Poço 19	0,57	-0,22
Poço 20	1,01	0,75
Poço 21	-0,31	-0,62
Poço 22	1,98	4,67
Poço 23	0,12	4,46
EVAP	0,45	-0,22
PREC	4,03	22,68

EVAP= evapotranspiração; PREC= precipitação

As distribuições de frequência das oscilações dos níveis dos poços 12, 13, 14, 15, 16, 20, 22, 23 e precipitação são classificadas como planicúrtica, que se caracteriza por ser uma curva mais aberta e mais achatada na sua parte superior. As oscilações dos níveis dos poços 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10, 11, 17, 18, 19, 21 e evapotranspiração são classificadas como leptocurtica, com curva de frequência com valores menos esparsos.

5. 2 Avaliação das séries históricas

Primeiramente para análise das séries temporais dos dados foram elaborados gráficos da função de autocorrelação (ACF) e autocorrelação parcial (PACF) através da organização das séries temporais em uma frequência mensal e aplicaram-se as rotinas disponíveis na biblioteca *time series* do software R. Assim pôde-se definir o tipo de processo que caracteriza a série. Através das Figuras no APÊNDICE 2 pode-se ter a interpretação visual de como os dados de níveis freáticos.

A ACF indica o grau de correlação entre os instantes temporais, e através das análises dos gráficos verificou-se que para os poços 2, 3, 5, 17,18, 19 o comportamento foi o mesmo, isto é que o grau de dependência permanece até o instante t_4 , apresentando valores mais elevados, e depois começa a decair tendendo para zero. Para os poços 13, 14, 16, 20, 21, 22 e 23, os valores abaixo do intervalo de confiança de 95% decaem a partir do t_3 . Já para os poços 12 e 15 a autocorrelação atua até o instante t_6 e a partir de t_7 os valores são mais baixos, inferiores ao intervalo de confiança.

O poço 11 apresenta dependência até o instante t_2 , esta dependência pode ser baixa devido à ausência de uma série longa de dados, os monitoramentos dos dados correspondem aos anos de 2004 a 2009. Pode-se concluir que há correlação entre os instantes subsequentes mais que vai se perdendo com o tempo, os dados das séries temporais dos poços de monitoramento indicam que é um processo autorregressivo (AR), pois um instante de tempo é diretamente dependente de uma ou mais observações anteriores.

Deste modo é provável que a chuva que caiu a um determinado instante de tempo passado influencia a flutuação do nível freático e a partir t instante seguinte essa influência vai se perdendo, pois seu papel na resposta do nível já foi efetuado.

Para os poços de monitoramento 4, 8, 9 e 10 os valores permaneceram elevados, acima do intervalo de confiança de 95%, a todo instante. O poço 4 pode ser pelo fato de ser o poço mais profundo, inserido na Formação Pirambóia com profundidade do filtro em 161,05 metros e por isso menos sensível as oscilações meteorológicas. O poço 8 pode ser associado ao

ciclo da cana de açúcar ser curto 1 ano a 1,5 ano, o plantio, colheita e rebrota da cana possivelmente está interferindo a dinâmica da flutuação. Já os poços 9 e 10 são poços inseridos em cultura de eucalipto, apresentando correlação alta, não se caracterizam como estacionários. Portanto para estes poços não se aplica nenhuma classificação em relação à ACF e PACF, pois são considerados como anomalias, casos especiais.

Em relação às PACF's nessa avaliação aparecem como um diagnóstico complementar à ACF quanto à ordem do processo verificado, e por meio da análise dos gráficos, todos os poços apresentam valor alto para o primeiro lag, acima do limite de confiança de 95%, e abaixo para os passos (lags) seguintes. Isso indica que provavelmente a ordem do processo seja de primeira ordem AR (1), o que pode ser plausível, pois se tratar de uma área de afloramento do SAG onde a recarga depende basicamente da precipitação.

5. 3 Modelagem das séries temporais

Após análise das estatísticas exploratórias dos dados e das séries temporais, identificando o tipo de processo e ordem, realizou-se a calibração do modelo PIRFICT para todos os poços. Uma vez que o modelo PIRFICT permite a análise das séries temporais sob influência de diferentes variáveis, sozinhas ou em conjunto, procurou-se ajustar os modelos utilizando diferentes parâmetros de entrada no modelo para posterior análise. Séries de precipitação, evapotranspiração e de oscilação do nível do rio foram utilizadas como variáveis de entrada no modelo, com algumas peculiaridades em alguns poços. Para a avaliação do comportamento dos dados quanto a calibração do modelo e a influência quanto ao uso da terra pela agricultura e práticas de manejo, foram selecionados 8 poços alocados em diferentes condições de uso do solo, tais como cana-de-açúcar (poços 8 e 12), pastagem (poços 16 e 19), eucalipto (poços 9 e 10) e citros irrigado (poços 13 e 14).

5. 3. 1 Modelagem das séries de monitoramento sob diferentes influências integradas

Para as análises das influencias integradas foram utilizada as séries de precipitação, evapotranspiração, e nível do rio, e quando necessário foram inseridas tendências lineares. Nas Figuras 6 a 13 pode-se o modelo PIRFICT calibrado para cada poço.

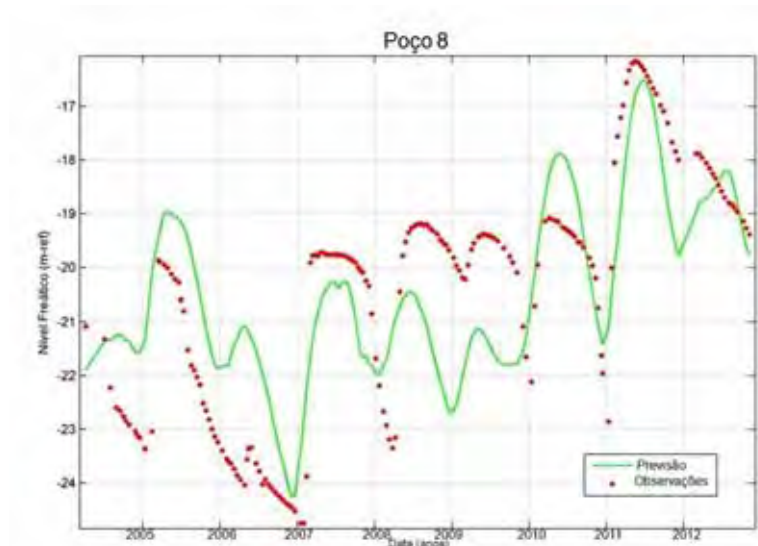


Figura 6. Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observações de alturas de lençol freático (pontos) no poço de monitoramento 8

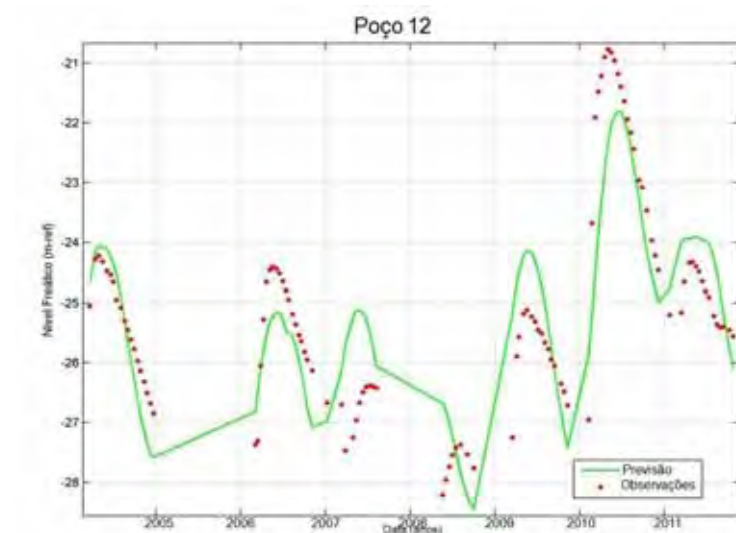


Figura 7. Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observações de alturas de lençol freático (pontos) no poço de monitoramento 12

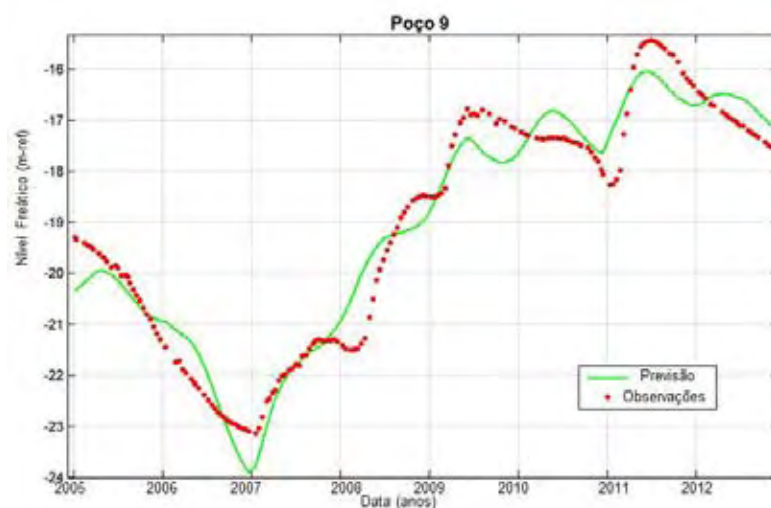


Figura 8. Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observações de alturas de lençol freático (pontos) no poço de monitoramento 9

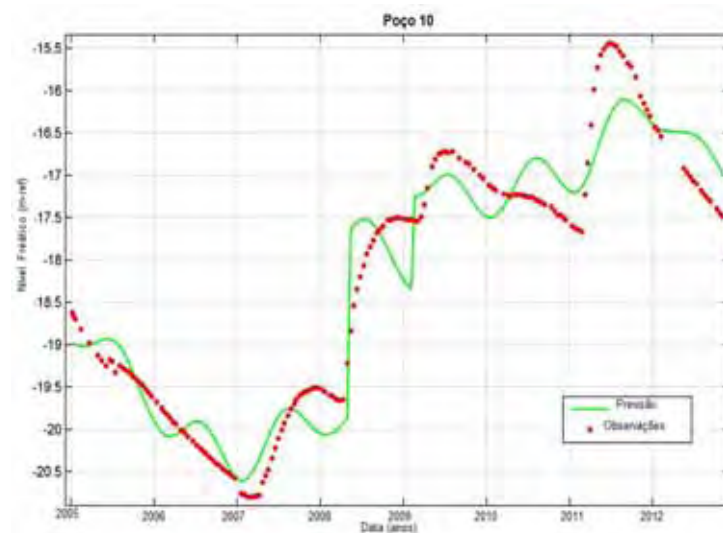


Figura 9. Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observações de alturas de lençol freático (pontos) no poço de monitoramento 10

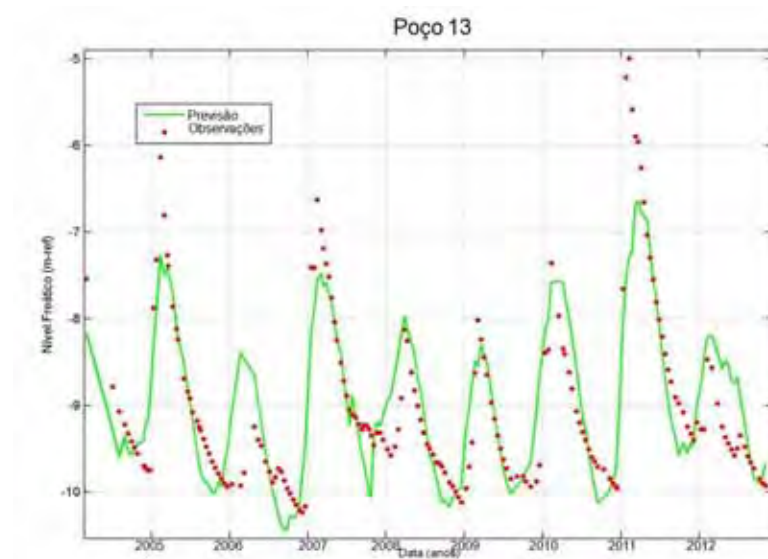


Figura 10. Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observações de alturas de lençol freático (pontos) no poço de monitoramento 13

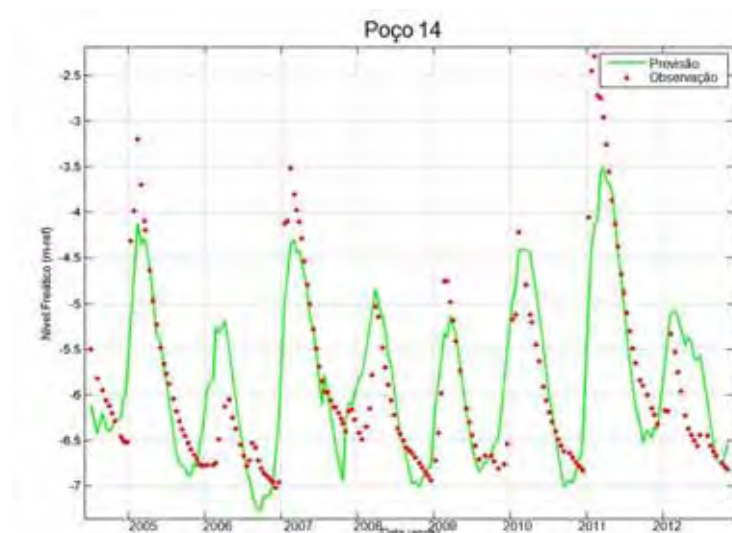


Figura 11. Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observações de alturas de lençol freático (pontos) no poço de monitoramento 14

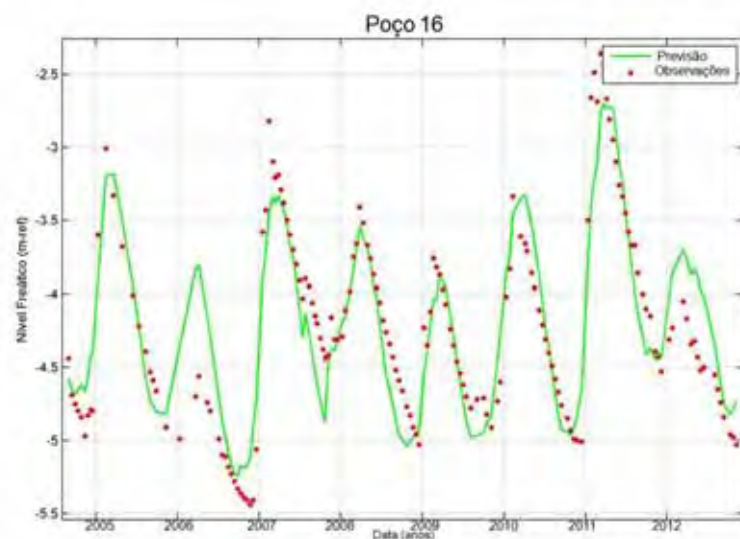


Figura 12. Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observações de alturas de lençol freático (pontos) no poço de monitoramento 16

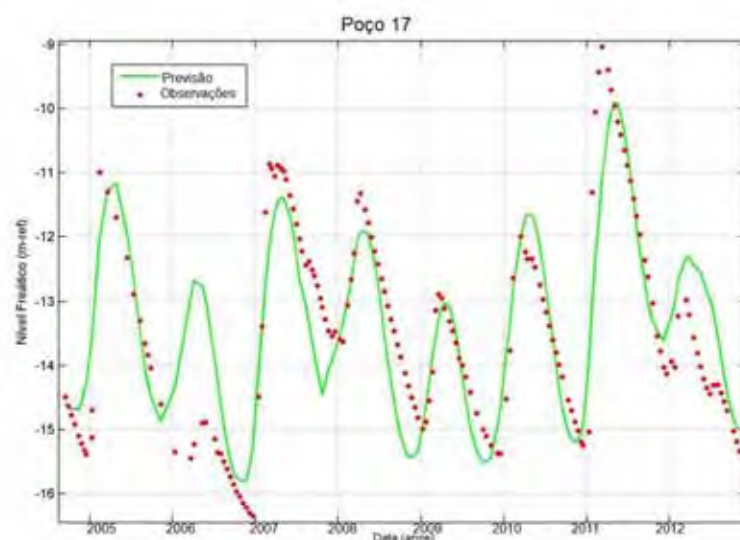


Figura 13. Modelo PIRFICT ajustado (linha) aos dados de observações de alturas de lençol freático (pontos) no poço de monitoramento 19

A área onde o poço de monitoramento 8 está instalado, havia o cultivo de citros nos anos 2004 e 2005 com citros. Nesse período houve uma elevação dos níveis do lençol, chegando a um aumento de aproximadamente 3 metros no início de 2005. A elevação acompanhou a precipitação que foi maior para o mesmo período, por a área ser local de afloramento do SAG a precipitação acarreta respostas rápidas e diretas no aquífero. Entre os anos 2005 e 2006 houve o corte do citros e a partir do final de 2006 iniciou-se o plantio de cana-de-açúcar, os

níveis se mostraram mais altos devido à precipitação e a cultura (SOLDERA *et al.*, 2013). As diferenças nas práticas de manejo entre a cultura do citros e da cana-de-açúcar resultaram em mudanças na área de absorção de água, associada a horizontes mais superficiais.

O poço 12 apresenta a mesma dinâmica do poço 8, estando localizado entre uma área cultivada com a cultura de cana-de-açúcar e uma gleba cultivada com citros. Na área verificam-se oscilações que além de serem influenciadas pela precipitação, há interferência da vegetação e, no caso pelo ciclo da cana-de-açúcar.

Nos poços 9 e 10 percebe-se que as oscilações dos níveis são mais bruscas, com rebaixamentos sistemáticos nos níveis em função de um maior consumo de água, característica da cultura de eucalipto.

Os poços 13 e 14 são poços que se encontram em locais de cultivo de citros, o sistema radicular formado no pomar cítrico contribui para diminuir a taxa de recarga, interceptando grande parte da água que infiltra e se movimenta pela zona vadosa, e por ser uma área irrigada as flutuações tem picos mais acentuados. Os poços 16 e 19 estão localizados em áreas de pastagens, estes locais encontram-se mais degradados e a interceptação de água que infiltra pela cultura é relativamente baixa, e assim os níveis estão mais superficiais se comparados com os demais poços de monitoramento. Modificações no uso e manejo da terra geram perturbações inevitáveis no ciclo hidrológico local e nos recursos hídricos disponíveis. A Tabela 5 contém os resultados das estatísticas das calibrações do modelo.

Tabela 5. Estatísticas da calibração do modelo PIRFICT às séries temporais de alturas de lençol freático observadas no período de abril de 2004 a janeiro de 2013

POÇOS	USO DO SOLO	EVP (%)	RMSE (m)	RMSI (m)	LDB
08	Cana de açúcar	75,27	1,09	0,47	-28,57
09	Eucalipto	94,89	0,52	0,16	-27,30
10	Eucalipto	92,86	0,41	0,19	-27,05
12	Cana de açúcar	83,85	0,69	0,39	-30,10
13	Citros	75,23	0,51	0,29	-13,50
14	Citros	75,71	0,51	0,28	-9,86
16	Pastagem	83,16	0,27	0,14	-8,74
17	Pastagem	71,30	0,64	0,33	-16,84

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

De acordo com Jiménez- Martínez *et al.* (2009), quantificar o efeito das incertezas dos parâmetros requer conhecimentos de suas variáveis estatísticas e estruturas de correlação. Observando os resultados pode-se inferir que para a porcentagem da variância explicada pelo modelo (EVP) os resultados foram considerados altos, ou seja, acima de 70%, isto representa que o modelo PIRFICT teve bom ajuste para as séries temporais observadas. O erro médio quadrado (Root Mean Square Error - RMSE) e o erro médio quadrado da inovação (Root Mean Square Innovations - RMSI) foram considerados baixos, sendo que para RMSE os valores variaram de 0,27 a 1,09 metros e para os RMSI os valores foram 0,14 e 0,47 metros.

Os poços 8, 9, 10 e 12 apresentaram níveis freáticos mais profundos, e coincidentemente, as culturas de cana de açúcar e eucalipto são as culturas que apresentam maior demanda de água. Na floresta de eucalipto, o processo de recarga e conseqüentemente de flutuação dos níveis freáticos são influenciados pela arquitetura da vegetação, contribuindo para a interceptação da precipitação e o desenvolvimento radicular, explorando maior quantidade de água na zona subsuperficial do solo.

As plantas de cana-de-açúcar apresentam raízes mais superficiais, cuja exploração limita-se aos primeiros dois metros abaixo da superfície do solo. Esta cultura apresenta fisionomia completamente diferente quando comparada a cultura de eucalipto, mas ambos os cultivos têm altas taxas de evapotranspiração (FAO, 1998). Uma diferença importante entre estas duas

culturas é o ciclo de cultivo. Eucaliptos permanecem nos campos por 6-7 anos e canaviais são colhidas com 1-1,5 ano.

Os poços 13, 14, 16 e 17 possuem níveis freáticos mais rasos, ao se comparar com os poços descritos anteriormente. No entanto, os poços 13 e 17 têm níveis mais profundos que os poços 14 e 16. Os poços de monitoramento 13 e 14 estão localizados em uma área irrigada de citros, sendo que as plantas não apresentam déficit de água por períodos relativamente longos, uma vez que o sistema de bombeamento de água provém de um corpo hídrico perene, o Ribeirão da Onça. Em geral, uma planta de citros tem 90% de suas raízes entre 0 e 0,40 metros abaixo da superfície, quando cultivadas com irrigação (SOUZA *et al.*, 2007).

De acordo com Gartuza-Payán *et al.* (1998) em regiões irrigadas, deve-se ter o conhecimento exato da recarga ou condição do nível freático, e por isso conhecer as taxas de evaporação e evapotranspiração é essencial para a gestão dos recursos hídricos. Para Jiménez-Martínez *et al.* (2009) a estimativa da recarga é complicada em algumas bacias devido as práticas de irrigação, que pode simultaneamente remover água de recarga e criar fontes de recarga difusa, além disso o manancial hídrico subterrâneo corre risco de contaminação.

Em área de pastagem têm-se os poços de monitoramento 16 e 17. Estão localizados na parte inferior e na parte central de uma topossequência como referenciado por Manzione & Wendland (2012), e apresentam grandes diferenças na base de drenagem local, -8,74 metros para o poço 16 e -16,84 metros para o poço 17. Na área de pastagem o estágio de degradação é mais avançado, com raízes que não exploraram mais de 0,5 metros de solo, como verificado em campo.

Em relação as análises de base de drenagem local (LDB) pode-se inferir que os poços 08 e 12 estão localizados em uma área de cultivo de cana de açúcar e tem uma base de drenagem do local de -28,77 e -30,1 metros, respectivamente. Os poços 9 e 10, localizados em local de reflorestamento de eucalipto, também apresentam níveis freáticos profundos, com base de drenagem local de -27,30 e -27,05 metros. Em uma lavoura irrigada cultivada com citros

temos o poço 13 com uma base de drenagem local de -13,5 metros e o poço 14 com uma base de drenagem local de -9,86 metros. A prática de irrigação pode ser uma das variáveis explicativas dos resultados serem menores para estes poços.

De acordo com Obergfell *et al.* (2013) todos os parâmetros são transformados durante a sua calibração para garantir que os valores permaneçam positivos, com exceção da drenagem local, que pode ser valores negativos. Através das séries de precipitação utilizada para calibração do modelo pode-se verificar que há um padrão de sazonalidade do regime pluviométrico para região estudada (Figura 14), e conforme Gouvêa (2009) a região é marcada por períodos distintos de alta e baixa pluviosidade, sendo que no mês de outubro se inicia o período chuvoso e se estende até março, com os picos ocorrendo nos meses de novembro, dezembro e janeiro. Os níveis freáticos dos poços acompanham o regime de precipitação, há o aumento dos níveis nos meses mais chuvosos.

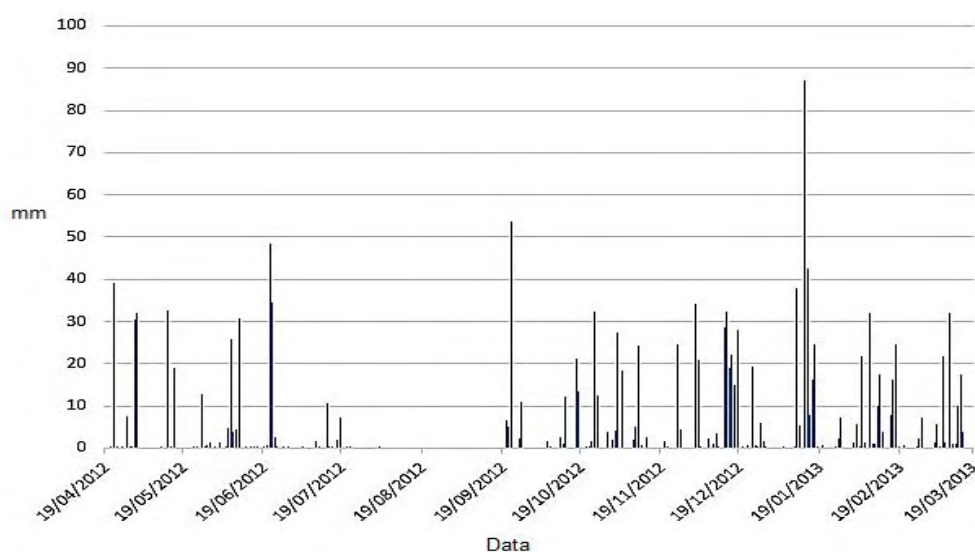


Figura 14. Variação da precipitação entre 19 de abril de 2012 e 19 de março de 2013

As oscilações dos níveis freáticos acompanham a precipitação, quando há maior índice pluviométrico os níveis aumentam e a evapotranspiração decresce, e quando o índice pluviométrico registra menores valores o nível decresce e a evapotranspiração aumenta. Através da Figura 16 pode-se observar a dinâmica de flutuação de nível para o poço 12, cuja cultura

presente na área em que o poço está inserido é a cana de açúcar, e sua relação com a precipitação (PREC), evapotranspiração (EVAP) e nível do rio. Além disso, a Figura 15 apresenta algumas tendências lineares (T_L) de elevação e rebaixamento dos níveis freáticos.

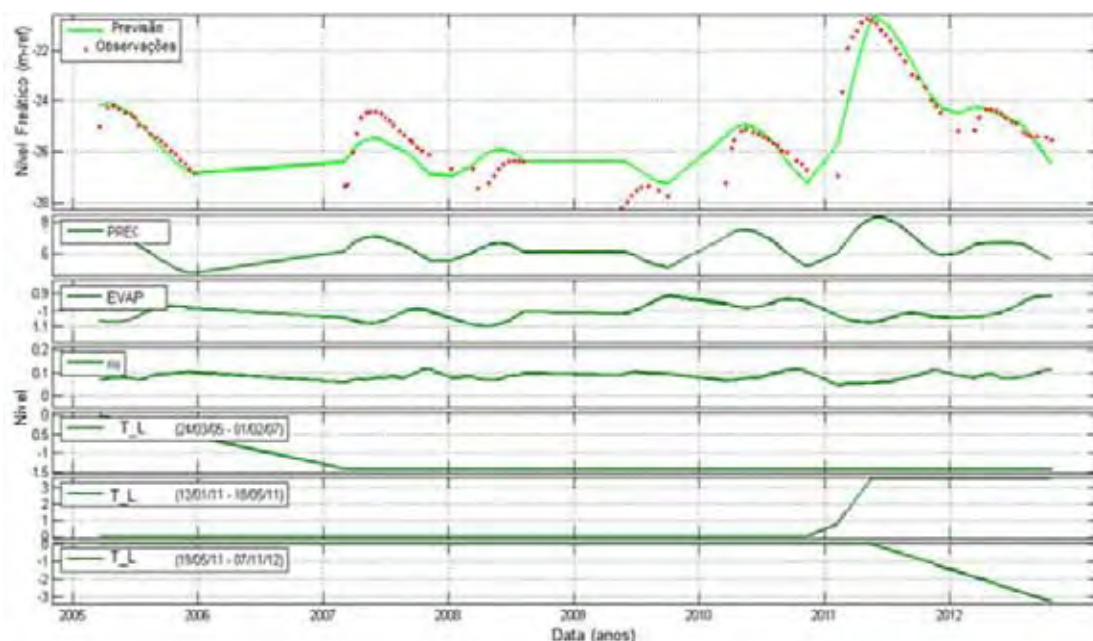


Figura 15. Flutuação dos níveis freáticos e a relação com as variáveis de entrada: precipitação, evapotranspiração, nível do rio e tendências lineares, para calibração do modelo para o Poço 12

A espessura da zona não saturada, a sazonalidade climática e o padrão da vegetação são fatores que estão influenciando a flutuação dos níveis nos poços de monitoramento, a precipitação atua diretamente na recarga do aquífero e os locais onde a zona não saturada é menor são mais sensíveis às variações da precipitação e também evapotranspiração.

De acordo com Soldera *et al.* (2012) quando inclui-se mais variáveis de entrada para calibração do modelo há melhora do ajuste, isto se evidencia ao se observar que quando o nível do rio faz parte da calibração os ajustes são melhores e os erros são menores. A inclusão de múltiplas séries que perturbam o sistema aquífero deve levar em conta as condições hidrológicas locais para que ocorram melhoras no desempenho do modelo e diminuição das incertezas associadas a modelagem (SOLDERA *et al.*, 2012).

5. 3. 2 Calibração dos parâmetros do modelo e sua interpretação física

A Tabela 6 contém os resultados dos parâmetros calibrados pelo modelo PIRFICT.

Tabela 6. Parâmetros calibrados pelo modelo PIRFICT

POÇOS	USO DO SOLO	A	a	n	f	α
08	Cana de açúcar	1400	0,007	2,13	0,20	120,87
09	Eucalipto	1120	0,007	1,78	-0,57	132,31
10	Eucalipto	559	0,009	3,41	-3,23	105,66
12	Cana de açúcar	1479	0,008	2,08	0,21	88,68
13	Citros	845	0,006	1,13	-0,49	77,17
14	Citros	801	0,007	1,14	-0,37	80,03
16	Pastagem	730	0,005	1,18	-0,75	107,36
17	Pastagem	849	0,008	1,42	-1,18	96,88

A=resistência a drenagem (metros); a=coeficiente de armazenamento no solo (1/dias); n=tempo de convecção/dispersão (dias); f=fator de correção da evapotranspiração (-); α =ruído branco.

Parâmetros que representem o comportamento dos aquíferos são necessários para compreender o fluxo da água subterrânea, a capacidade do poço e facilita a quantificação da água subterrânea, ajudando a compreender a dinâmica do manancial hídrico (FERRIS *et al.*, 1962 *apud* OBERGFELL *et al.*, 2013).

Obergfell *et al.* (2013) utilizam em seus estudos diferentes parâmetros para calibração do modelo de funções IR utilizando séries temporais para a análise. Os mesmos autores salientam que este método que utiliza a função de IR, como por exemplo, modelo PIRFICT, depende de poucos parâmetros para identificação de cada estresse sobre a dinâmica da água subterrânea, e são otimizados para obter o melhor ajuste a partir das flutuações observadas. Referenciando os autores as funções de IR são definidas para cada estudo para simular a específica influência no poço.

Os parâmetros do modelo PIRFICT revelam informações importantes sobre a dinâmica dos poços de observação, contribuindo para a identificação das características do sistema. O parâmetro A é um indicativo da resistência a drenagem (ou condutividade hidráulica) que o meio poroso exerce sobre a frente de molhamento da zona vadosa e da zona saturada até a resposta do aquífero, este parâmetro é mais elevado para os poços mais profundos. Para os poços 8, 9 e 12 a precipitação como variável de entrada demora um tempo

maior para causar mudança no nível freático, estes poços são menos susceptíveis as variações climáticas por serem mais profundos.

A interpretação dos parâmetros P_{III} d_f ou qualquer outro modelo de séries temporais deve ser um processo cuidadoso, devido a natureza empírica do processo (VON ASMUTH & KNOTTERS, 2004). O julgamento da plausibilidade física dos resultados de um modelo de função de transferência de ruído é checada através das funções IR, que são equivalentes à função de correlação cruzada das séries temporais. A resposta hidrológica do sistema pode ser indicada pelo período de tempo em que a função IR se aproxima de zero, que em geral deve abranger o período monitorado (DE GRUIJTER *et al.*, 2006). Além disso, o parâmetro estocástico do modelo permite contabilizar as incertezas associadas, que quanto maiores os valores menor é o sucesso do modelo em explicar o fenômeno a partir dessas variáveis.

O poço 10 apresentou níveis profundos, porém o parâmetro A não exibiu valor elevado como os outros poços. Isto pode indicar que existem outras variáveis, além da precipitação e evapotranspiração, interferindo na oscilação dos níveis freáticos. Nos poços localizados em áreas de pastagem e citros as respostas da flutuação do nível subterrâneo às variáveis de entrada foram mais curtas, principalmente devido a menor espessura da zona não saturada, e no caso do citros por ser uma cultura irrigada que recebe constante fornecimento de água.

Através das Figuras 16 e 17 pode-se visualizar a calibração do modelo para cada poço, associados aos diferentes usos de solo e flutuação dos níveis freáticos. Cada gráfico contém a oscilação de quatro poços com os diferentes usos da terra, cana-de-açúcar, eucalipto, citros e pastagem.

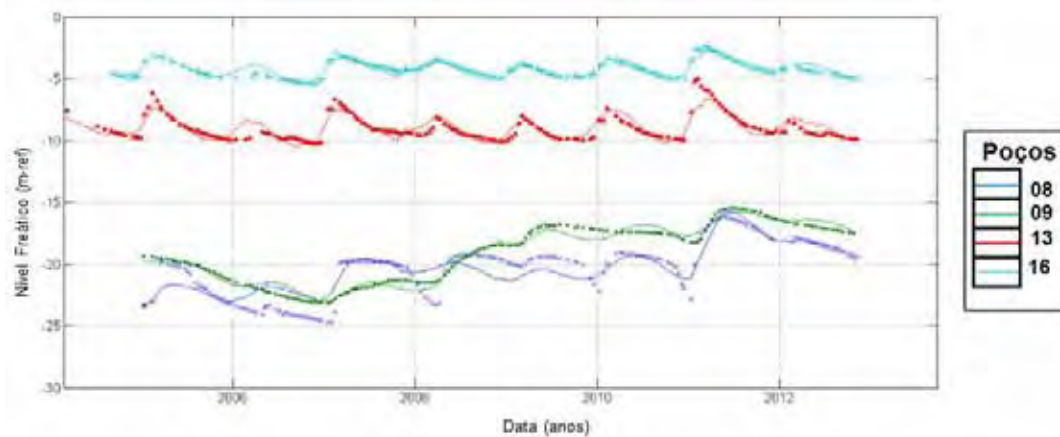


Figura 16. Calibração do modelo das séries temporais de níveis freáticos para os diferentes usos do solo: cana de açúcar (P08); eucalipto (P09); citros (P13); pastagem (P16) – linha sólida previsão do nível do lençol freático e símbolos dados observados

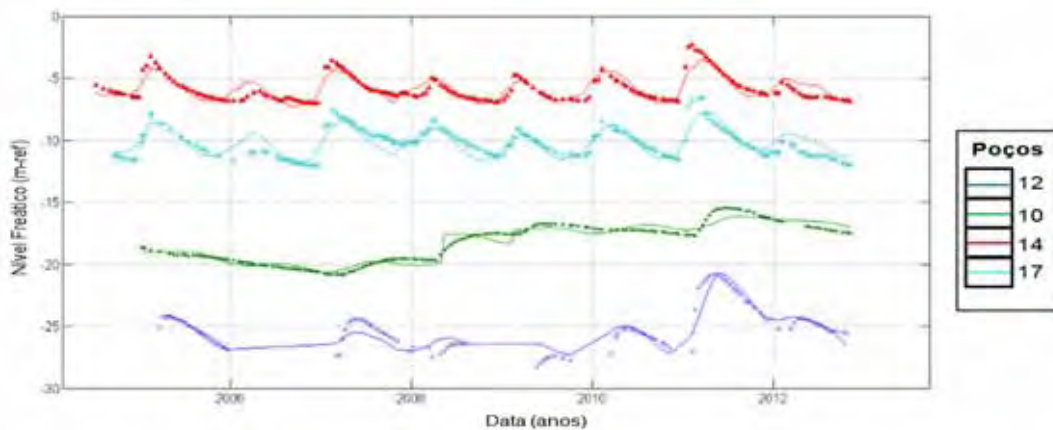


Figura 17. Calibração do modelo das séries temporais de níveis freáticos para os diferentes usos do solo: eucalipto (P10); cana de açúcar (P12); citros (14); pastagem (17) – linha sólida previsão do nível do lençol freático e símbolos dados observados

Como pode-se perceber, o modelo (linha sólida) se ajustou bem aos dados observados, caracterizando o processo de oscilação dos níveis freáticos sobre diferentes circunstâncias. Na Tabela 7 podem-se visualizar os desvios padrões dos parâmetros calibrados pelo modelo PIRFICT.

Tabela 7. Desvios padrões dos parâmetros calibrados pelo modelo PIRFICT

POÇOS	USO DO SOLO	DP (A)	DP (a)	DP (n)	DP (f)	DP (α)
08	Cana de açúcar	1,5e-8	1,5-e8	0,45	1,5e-8	18,32
09	Eucalipto	620	0,002	0,30	0,69	14,32
10	Eucalipto	210	0,002	0,47	1,70	18,23
12	Cana de açúcar	480	0,002	0,30	0,41	21,19
13	Citros	120	0,001	0,08	0,33	15,58
14	Citros	110	0,002	0,09	0,32	15,78
16	Pastagem	90	0,001	0,06	0,25	18,66
17	Pastagem	140	0,002	0,14	0,39	18,05

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

Os desvios padrão foram considerados baixos, indicando um bom desempenho e ajuste do modelo. Para o poço 8 o desvio padrão apresentou valor abaixo de zero, porque os parâmetros A, a e f foram inseridos em função da resposta do poço 12 para obtenção de um ajuste razoável neste local, uma vez que estavam sob influência do mesmo cultivo, a cana-de-açúcar. Sem esse procedimento os parâmetros a calibração não se mostrou satisfatória.

5. 3. 3 Identificação das respostas do sistema em função dos cultivos e manejos

A análise das funções de impulso e resposta perfaz não só a interpretação numérica dos parâmetros calibrados do modelo PIRFICT (que são oriundos da forma da função IR) mais também uma verificação gráfica dessas funções que refletem características visuais do processo modelado. A ideia foi verificar as diferentes respostas do lençol freático e sua relação com as influências locais de solo e vegetação. As Figuras 18 e 19 apresentam as funções de IR das respostas do nível freático à entrada de precipitação diária para as culturas de cana-de-açúcar, eucalipto, citros e pastagem. Von Asmut & Kotters (2004) compararam estas funções com hidrógrafas, associando funções de IR de precipitação e disponibilidade de água.

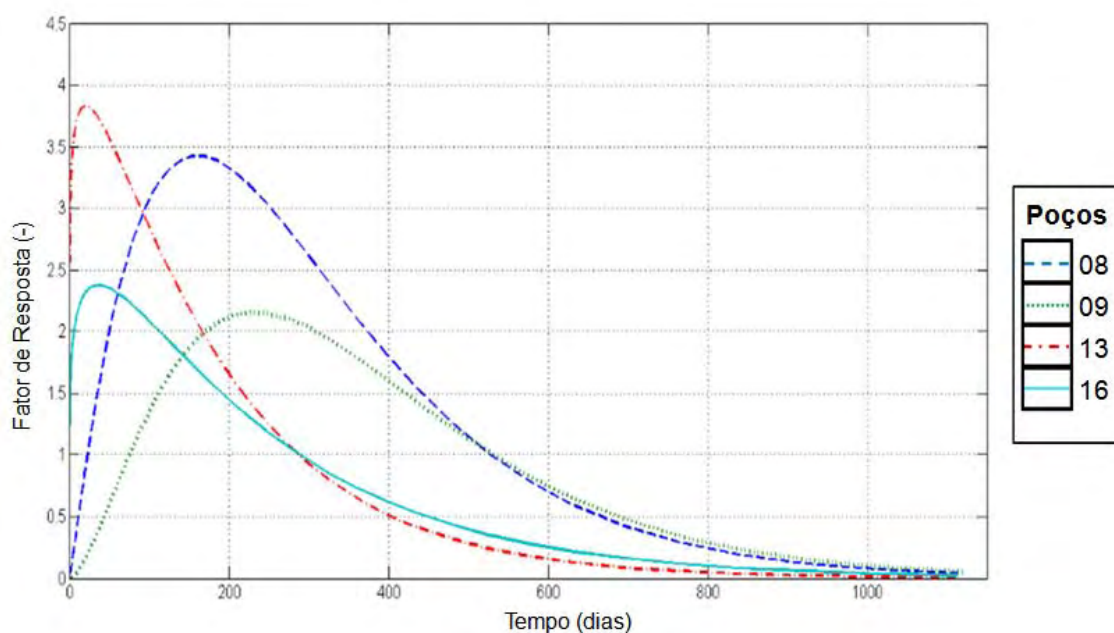


Figura 18. Funções de IR para precipitação nos poços: 08 (cana de açúcar), 09 (eucalipto), W13 (citros) e 16 (pastagem)

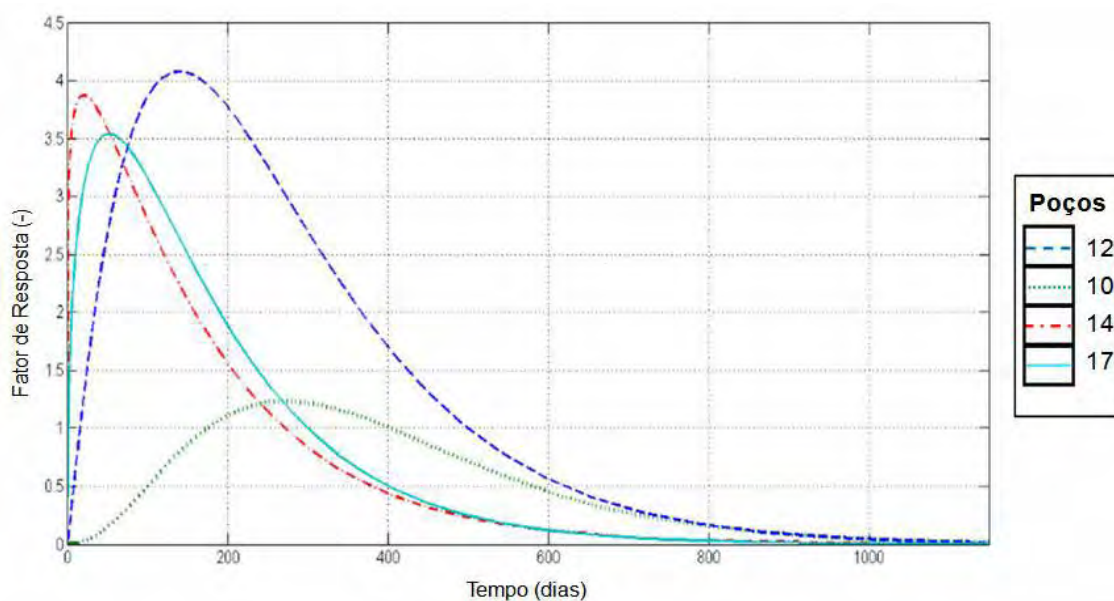


Figura 19. Funções de IR para precipitação nos poços: 12 (cana de açúcar), 10 (eucalipto), 14 (citros) e 17 (pastagem)

Os maiores picos representados na figura foram dos poços 13 e 14, isto devido à rápida percolação da água no solo e a manutenção da umidade deste solo por conta da prática da irrigação na área. Por serem níveis mais superficiais a resposta é mais rápida. A área de pastagem também obteve picos elevados em relação à função IR, pois a área encontra-se mais degradada,

não utilizando a água disponível e também não há significativa interceptação da água pela raiz da planta. A resposta à entrada da precipitação para o poço 17 foi maior que para o poço 16, embora estejam em área de mesmo cultivo há diferenças em relação às profundidades dos níveis freáticos. Deste modo para estes dois poços ficam evidentes a influência da espessura da zona não saturada ao comportamento do lençol freático quando inserida séries temporais de precipitação e evapotranspiração como variáveis de entrada.

As funções de IR em área de cultivo de cana-de-açúcar e eucalipto foram maiores quando comparados a outros poços de monitoramento. Os dosséis da cana-de-açúcar e do eucalipto interceptam a maior parte da água da chuva e água da zona vadosa, não permitindo a recarga do lençol freático e impondo níveis mais profundos do lençol. Assim o consumo de água pela cultura de eucalipto contribuiu para este comportamento nos poços. O efeito topográfico também é considerado, já que esses poços encontram-se próximos ao divisor de águas da bacia.

Nas Figuras 20 e 21 estão representadas as funções de IR da evapotranspiração para cada poço. A função de IR utilizando evapotranspiração em área de eucalipto foram maiores que as funções de IR que utilizaram precipitação, indicando o alto consumo de água pela cultura.

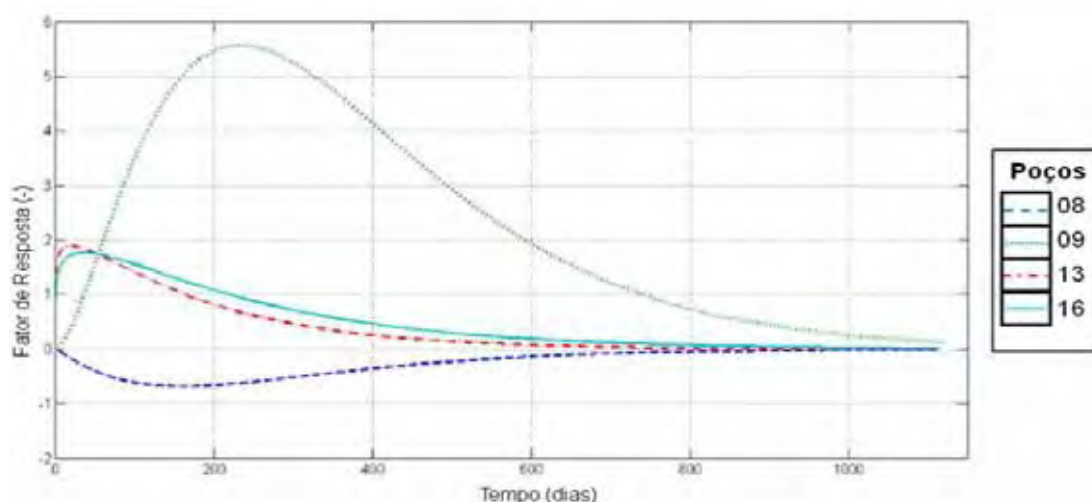


Figura 20. Funções de IR para evapotranspiração nos poços: 08 (cana de açúcar), 09 (eucalipto), W13 (citros) e 16 (pastagem)

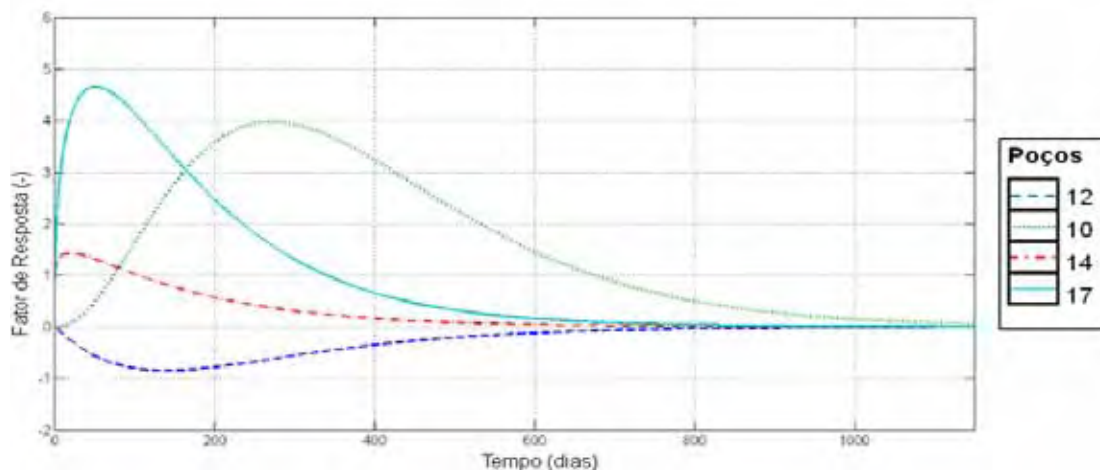


Figura 21. Funções de IR para evapotranspiração nos poços: 12 (cana de açúcar), 10 (eucalipto), W14 (citros) e 17 (pastagem)

Somente para a cana que a função de IR de evapotranspiração apresentou o comportamento como descrito em Von Asmuth (2012), semelhante a um balanço hídrico onde a função IR da evapotranspiração seria descontada da função IR da precipitação. Isto se deve ao fato de a cana ser uma cultura anual, sendo cultivada e colhida a cada 1 ano ou 1,5 ano, seguindo os mesmos padrões sazonais das séries históricas climatológicas. O modelo foi capaz de relacionar o ciclo anual das culturas de cana com os padrões sazonais de variações climatológicas.

Já as culturas de eucalipto, citros e pastagem permanecem em campo por muitos anos, até décadas, e pode muitas vezes, aumentar a influência da vegetação no processo de recarga do aquífero. A influência da floresta de eucalipto nos níveis freáticos foi evidente. Pode-se observar o poço 10, cujas taxas de evapotranspiração da vegetação são consideradas elevadas. A influência da vegetação foi alta até o corte das árvores e colheita de madeira no final de 2006. Verificou-se uma tendência linear de -1,08 metros a partir do início do monitoramento, em 2004, até 07/01/2007. A partir deste momento, com as chuvas de verão e as árvores brotando novamente, os níveis aumentaram 3,2 metros de 27/03/2008 até 05/12/2008. Após este período, os níveis se estabilizaram, e começaram a cair novamente com o estabelecimento das novas árvores. No poço 09 o comportamento foi semelhante, só que com uma resposta mais lenta as variações climatológicas.

6. CONCLUSÕES

Compreender os processos hidrológicos em uma bacia monitorada em escala detalhada fornece base metodológica para estudos em outras áreas de recarga direta do SAG, permitindo avançar no conhecimento do sistema água-solo-plantas-atmosfera e contribuindo para uma gestão sustentável das águas subterrâneas, combinando consumo humano, produção agrícola e proteção ambiental. Nesse trabalho procurou-se destacar a utilização de dados de monitoramento freático sob uma abordagem de identificação de sistemas hidrogeológicos a partir da análise de séries temporais, relacionando os parâmetros dos modelos com as características presentes em cada ponto de monitoramento.

O modelo PIRFICT foi capaz de caracterizar as diferentes respostas do nível de água e sua relação com influências locais de uso do solo. O tipo de vegetação, a interação com a precipitação, consumo de água e de práticas agrícolas, como irrigação, influenciaram a flutuação dos níveis sob diferentes maneiras. A espessura da zona não saturada influenciou o tempo de resposta do lençol freático a entradas de precipitação, evapotranspiração e nível do rio.

As diferentes culturas influenciaram a recarga e flutuação dos níveis freáticos de modo particular. A cultura de eucalipto pode-se notar que teve grande influência nas oscilações, esta influencia está relacionada a arquitetura da vegetação. A planta de eucalipto por apresentar raízes mais profundas, contribui para que o sistema radicular intercepte a precipitação e com isso o consumo de água na zona mais superficial do solo é maior.

A cultura da cana de açúcar também apresentou consumo de água mais elevado em relação às demais culturas analisadas, devido ao ciclo da cultura de 1 ano e 1,5 ano, quando ocorre o corte da cultura há grande influência na oscilações dos níveis freáticos.

A cultura de citros por ter a irrigação como um contribuinte, apresentou oscilações freáticas mais suaves e menos profundas, enquanto em áreas de pastagem houve pouca interceptação da água que infiltra pelo sistema radicular por ser uma cultura que encontra-se degradada, contribuindo para que os níveis sejam superficiais e mais elevados que as outras culturas.

O monitoramento dos poços foi importante para que tais análises fossem efetuadas, uma vez que séries temporais longas refletem menores erros e diminuem as incertezas em relação a dinâmica dos sistemas. Dados de monitoramento fornecem importantes informações para o planejamento do uso da água e capacidade suporte em bacia hidrográficas.

7. REFERÊNCIAS

ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I. A. **Handbook of mathematical functions**. New York: Dover Publications Inc, 1965. 1046p.

ALFARO, J.F.; MARIN, V. **Uso d'água y energia para riego en America Latina**. 1991. Disponível em: < [http://unesco.org.uy/phi/libros/usoeficie nte/alfaro.html](http://unesco.org.uy/phi/libros/usoeficie%20nte/alfaro.html)>. Acesso em: 10 de mai. De 2013.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/XO49OE/XO49OE00.htm>>. Acesso em: 17 out. 2012.

ASSINE M.L., PIRANHA J.M., CARNEIRO C.D.R. Os paleodesertos Pirambóia e Botucatu. In: MANTESSO NETO V., BARTORELLI A., CARNEIRO C. D. R., BRITO NEVES B.B. **Geologia do continente sul-americano**: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo, Beca, 2004. p. 77-92.

BERNARDO, S. Impacto ambiental da irrigação no Brasil. In: SILVA, D. D. da.; PRUSKI, F.F. Recursos **hídricos e desenvolvimento sustentável da agricultura**. Viçosa: MMA, SRH, ABEAS, UFV, 1997. 252p.

BETIOLLO, L. M. **Caracterização estrutural, hidrogeológica e hidroquímica dos Sistemas Aquíferos Guarani e Serra Geral no nordeste do Rio Grande do Sul, Brasil**. 266. 117p. Dissertação (Mestrado em Geociências). Universidade Federal do Rio grande do sul, Porto Alegre, 2006.

BEZERRA, M. I. S. **Apostila de análise de séries temporais**. Apostila para o curso de Estatística, DMEC/ FCT / UNESP, Presidente Prudente, 2006. 84p.

BORGHETTI, N.; BORGHETTI, J. R.; ROSA, E. F. F. **Aquífero Guarani- A verdadeira integração dos países do Mercosul**. Curitiba: Imprensa Oficial, 2004.
BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M. **Time series analysis: forecasting and control**. 2.ed. San Francisco: Holden-Day, 1976. 575 p.

BRASIL. Agência Nacional de Águas (ANA). 2005a. **Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil**. Brasília. Disponível em: <
<http://www.ana.gov.br/sprtew/recursoshidricos.asp> >. Acesso em: 10 de mai. 2013.

BRASIL. Agência Nacional de Águas (ANA). 2005b. **Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil**. Brasília. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/sprtew/recursoshidricos.asp>>. Acesso em: 21 de mai. 2013.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil**. (Caderno de Recursos Hídricos, 5) Brasília: ANA, 2007.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**. Brasília: ANA, 2009.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**. Brasília: ANA, 2011.

BRASIL. Associação Brasileira de Água Subterrânea (ABAS). **Águas subterrâneas**: Uso das Águas Subterrâneas na Indústria muito mais do que uma opção econômica. Disponível em: <<http://www.abas.org/imagens/revista3.pdf>>. Acesso em: 28 mai. 2012.

BRASIL. Serviço Geológico do Brasil (CPRM). **Rede integrada de monitoramento de águas subterrâneas (RIMAS)**. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/Texto_Explicativo.pdf>. Acesso em : 08 de jun. de 2013.

BUSSAB, W. O. MORETTIN, P. A. **Estatística Básica**. 5. ed. São Paulo: Saraiva. 2003.

CAMPOS, N; STUDART, T. **Gestão das águas**: princípios e práticas. 2. ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2003. 242 p.

CARDOSO, H. E. A.; MANTOVANI, E. C.; COSTA, L. C. As águas da agricultura. **Agroanalysis**. Instituto Brasileiro de Economia/Centro de Estudos Agrícolas. Rio de Janeiro. 1998. p.27-28.

CASTRO JÚNIOR, P. R. **Mapeamento morfoopedológico aplicado a Bacia Piloto do ribeirão da Onça (SP) e a Bacia Escola do Rio Cachoeirinha (MT) em área de recarga do Aquífero Guarani**. Relatório de Pós Graduação, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Mato Grosso.

CEY, E. E.; RUDOLPH, D. L.; PARKIN, G. W.; ARAVENA, R. Quantifying groundwater discharge to a small perennial stream in southern Ontario, Canada. **Journal of Hydrology**, v. 210, 1998. p. 21-37.

CHANG, H. K. **Uso atual e potencial do Sistema Aquífero Guarani**. Atividade 3. Aquífero Guarani. Brasil: Agência Nacional de Águas, 2001. Disponível em: <http://www.ana.gov.br/guarani/gestao/gest_cbasico.htm>. Acessado em: 13 set 2010.

CHRISTOFIDIS, D. **Água na produção de alimentos**: o papel da irrigação no alcance do desenvolvimento sustentável. Brasília, 2005. Disponível em: <http://www.irrigacao.org.br/artigos/Christofidis_Agua%20na%20Producao%20de%20Alimentos.pdf>. Acesso em: 14 de abr. de 2012.

CONCEIÇÃO, M. A. F. Modelos de estimativa do saldo de radiação na região noroeste do Estado de São Paulo. In: **CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM**, 16., 2006, Goiânia. Anais do Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem . Juazeiro: ABID, 2006. CD-ROM.

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. **Hidrología Subterránea**. Barcelona: Ediciones Omega. 1976. 1157p.

DE GRUIJTER, J. J., BRUS, D. J., BIERKENS, M. F. P., KNOTTERS, M. **Sampling for natural resources monitoring**. Springer, Berlin, 2006. 332p.

ELRICK, D. E.; REYNOLDS, W. D.; TAN, K. A. Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analyses. **Ground Water Monitoring Review**. v. 9, 1989. p.184-193.

ELRICK, D. E.; REYNOLDS, W. D. Methods for analyzing constant-head well permeameter data. **Soil Science Society of American Journal**, v.56, 1992. p.320-323.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). **Crop evapotranspiration** - Guidelines for computing crop water requirements.FAO

Irrigation and drainage paper 56, Rome, 1998. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/XO49OE/XO49OEOO.htm>>. Acesso em: 17 out. 2012.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Proteção da qualidade da água subterrânea**: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Banco Mundial: Washington, 2002. 104p.

GARCIA, C. H. **Tabelas para classificação do coeficiente de variação**. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF), 1989. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr171.pdf>>. Acesso em: 13 de fev. de 2013.

GARTUZA-PAYÁN, J.; SHUTTLEWORTH, W. J.; ENCINAS, D.; MCNEIL, D. D.; STEWART, J. B.; DEBRUIN, H.; WATTS, C. Measurement and modelling evaporation for irrigated crops in northwest Mexico. **Hydrological Process**. v.12, 1998. p. 1397–1418.

GOMES, L. H. **Determinação da recarga profunda na Bacia- Piloto do Ribeirão da Onça em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir de balanço hídrico em zona saturada**. 2008. 167 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2008.

GÓMEZ, A. A.; RODRÍGUEZ, L. B.; VIVES, L. F. The Guarani Aquifer System: estimation of recharge along the Uruguay–Brazil border. **Hydrology Journal**. v18, 2010. p. 1667–1684.

GOOVAERTS, P. Geostatistical modelling of spatial uncertainty using p-field simulation with conditional probability fields. **International Journal of Geographical Information Science**, v.16, 2002. p.167-178.

GOUVÊA, T. H. **Análise estatística da influência da precipitação e de características do solo na variação do nível d'água em área de recarga do Aquífero Guarani**. 2009. 147 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2009.

GUNAWARDHANA L.N.; KAZAMA S. Snow and glacier contribution from Italian Alps for seasonal river discharge in Tagliamento River. **Annual Journal of Hydraulic Engineering**. v. 55, 2011. p. 67-72.

GUNAWARDHANA, L. N.; KAZAMA S. Hydrological responses to future climate change in the in the Tagliamento River in Italian Alps. **Annual Journal of Hydraulic Engineering**. v. 56, 2012. p. 241-246.

HEALY, R. W. **Estimating Groundwater Recharge**. Cambridge, University Press, 2010. 551 p.

HEALY R. W.; COOK P. G. Using ground-water levels to estimate recharge. **Hydrogeol Journal**. 2002.

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

HIPEL, K. W.; McLEOD, A. I. **Time series modelling of water resources and environmental systems**. Amsterdam, Elsevier, 1994. 1013p.

HIRATA, R.; ZOBBI, J.; FERNANDES, A.; BERTOLO, R. Hidrogeología del Brasil: una breve crónica de las potencialidades, problemática y perspectivas. **Boletín Geológico y Minero**. v 217, n.1, 2006. p. 25-36.

HIRATA, R.; ZOBY, J. E. G.; OLIVEIRA, F. R. Águas subterrâneas: reserva estratégica ou emergencial. In: Bicudo, C. E.; Tundisi, J. G.; Scheuenstuhl, M.

Águas do Brasil: análises estratégicas. 1ed. São Paulo: Instituto de Botânica, v. 1, 2010. p. 149-164.

HOFFMANN, W. A.; JACKSON, R. B. Vegetation-climate feedbacks in the conversion of tropical savanna to grassland. **Journal of Climate**. v13, 2000. p. 1593-1602.

IRITANI, M. A.; EZAKI, S. **As águas subterrâneas do Estado de São Paulo**. São Paulo: Secretaria do Estado do Meio Ambiente- SMA, 2008. 103p.

IVKOVIC, K. M. **Modelling groundwater–river interactions for assessing water allocation options**. 2006. 229p. Tese (Doutorado em Filosofia) - The Australian National University, Canberra, 2006.

JIMENEZ-MARTINEZ, J.; SKAGGS, T. H.; VAN GENUTCHTEN, M. TH.; CANDELA, L.A. Root zone modelling approach to estimating groundwater recharge from irrigated areas. **Journal of Hydrology**. v. 367, 2009. p. 138–149.

KNOTTERS, M. **Regionalised time series models for water table depths**. 2001. 152p. Tese (Doutorado em Hidrologia) - Wageningen University (WUR), Wageningen, 2001.

LATORRE, M. R. D. O.; CARDOSO, M. R. A. Analise de séries temporais em epidemiologia: uma introdução sobre aspectos metodológicos. **Revista Brasileira de Epidemiologia**. São Paulo. v. 4, n.3 , 2001. p. 145-152. Disponível em: <<http://www.scielo.org/pdf/rbepid/v4n3/02.pdf>>. Acesso em: 10 de jan. de 2013.

LEAL, A. S. As águas subterrâneas no Brasil: ocorrências, disponibilidades e usos. **O Estado das Águas no Brasil**. Brasília: ANEEL, 1999. CD-ROM. (Série Estudos e Informações Hidrológicas e Energéticas. ÁGUA).

LUCAS, M. C. **Influência da precipitação e do uso do solo sobre a taxa de recarga em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani**. 2012, 155p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2012.

MAJOROWICZ, J.; GRASBY, S.E.; FERGUSON, G.; SAFANDA, J.; SKINNER, D. W. Paleoclimatic reconstructions in western Canada from borehole temperature logs: surface air temperature forcing and groundwater flow. **Climate of the Past**. v. 2, 2006. p. 1-10. Disponível em:<: www.climate-of-the-past.net/cp/2/1/>. Acesso em: 21 de abr. 2013.

MANOEL FILHO, J. Contaminação das águas subterrâneas. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. 3.ed. Rio de Janeiro: CPRM/LABHID, 2008, Capítulo 5.3, p. 381-404.

MANTESSO NETO V., BARTORELLI A., CARNEIRO C. D. R., BRITO NEVES B.B. **Geologia do continente sul-americano**: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo, Beca, 2004. 673 p.

MANZIONE, R. L. **Regionalized spatio- temporal modeling of water table depths in the Brazilian Cerrado**. 2007. 141 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2007.

MANZIONE, R. L.; KNOTTERS, M.; HEUVELINK, G. B. M.; VON ASMUTH, J. R.; CAMARA, G. Transfer function-noise modeling and spatial interpolation to evaluate the risk of extreme (shallow) water-table levels in the Brazilian Cerrados. **Hydrogeology Journal**, v.18, 2010. p. 1927-1938.

MANZIONE, R. L.; TANIKAWA, D. H.; WENDLAND, E. Análise de tendências nos níveis freáticos de uma bacia hidrográfica em área de recarga do Sistema

Aquífero Guarani (SAG) auxiliado por imagens de sensoriamento remoto. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 15, 2011, Curitiba. Anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. São José dos Campos - SP: INPE, v. 1, p. 5380-5385, 2011.

MANZIONE, R.L.; MARCUZZO, F.F.N.; WENDLAND, E.C. Integração de modelos espaciais e temporais para predições de níveis freáticos extremos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, 2012. p.1368-1375.

MANZIONE, R.L. WENDLAND, E. Water table response at a toposequence located in a Guarani Aquifer System (GAS) outcrop area in Brotas (SP) – Brazil. **International Association of Hydrogeologists**, Niagara Falls, Canada, v. 1, 2012. p. 233-234.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, 2004. p. 963–969.

MESTRINHO, S. S. P. Monitoramento em água subterrânea. In: FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia: Conceitos e aplicações**. CPRM/LABHID, Rio de Janeiro, 2008. p. 673-686.

MOON, S.; WOO, N. C.; LEE, K. S. Statistical analysis of hydrographs and water table fluctuation to estimate groundwater recharge. **Journal of Hydrology**, v. 292, 2004. p. 1998-209.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. de C. **Previsão de séries temporais**. São Paulo: Atual, 1987. 438 p.

NEVES, M. **Estudo da permeabilidade do solo colapsível da região de São Carlos**. 1987. 138 f. Dissertação (Mestrado)- Universidade de São Paulo, São Carlos, 1987.

OBERGFELL, C.; BAKKER, M.; ZAADNOORDIJK, W. J.; MASS, K. Deriving hydrogeological parameters through time series analysis of groundwater head fluctuations around well fields. **Hydrology Journal**. v. 21, 2013. p. 1-10.

ORGANIZAÇÃO DOS ESTADOS AMERICANOS (OEA). **Aquífero Guaraní: programa estratégico de ação**. 2009. Disponível em: <
http://www.ana.gov.br/bibliotecavirtual/arquivos/20100223172711_PEA_GUARANI_Port_Esp.pdf>. Acesso em: 12 de mai. De 2013.

ORGANIZATION OF AMERICAN STATES / GLOBAL ENVIRONMENT FACILITY (OAS/GEF). **Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible Integrado del SAG**. Montevideo, 2001. 133p.

OLIVERA, M. A.; FAVERO, L.P.L. **Uma breve descrição de algumas técnicas para análise de séries temporais**: Séries de Fourier, Wavelets, Arima, Modelos Estruturais para séries de tempos e redes neurais. São Paulo. EdUSP, 2002.

PAZ, V. P. DA S.; TEODORO, R. E. F.; MENDONÇA, F. C. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n.3, 2000. p.465-473.

PINDYCK, R. S.; RUBINFELD, D.L. **Econometria**: modelos e previsões. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.

POMPÊO, A. G. **Balanço hídrico da zona não saturada na bacia do Ribeirão da Onça (SP)**. Tese (Doutorado em Engenharia)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 1990.

RABELO, J. L.; WENDLAND, E. Assessment of groundwater recharge and water fluxes of Guaraní Aquifer System, Brazil. **Hydrogeology Journal**, v. 17, n.7, 2009. p. 1733-1748.

RANJAN, P., KAZAMA, S., MASAKI S. Effects of climate change on coastal fresh groundwater resources. **Global Environmental Change**. v. 16, 2006. p. 388-399.

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

ROCHA, G. A. O grande Manancial do Cone Sul. **Estudos Avançados**. São Paulo, v.11, n.30, 1997. p. 191 – 212.

SANTOS, M. M. **Gerenciamento de Recursos Hídricos Subterrâneos**: uso atual e potencial do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo (SP). 2009. 224 f. Tese (Doutorado em Geociências)- Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro. 2009.

SÃO PAULO. Governo do Estado de São Paulo; Secretaria de Estado do Meio Ambiente; Coordenadoria de Recursos Hídricos. **Projeto Aquíferos**: ação programada de desenvolvimento e proteção de águas subterrâneas no Estado de SÃO PAULO. 2007. Disponível em: < http://www.ambiente.sp.gov.br/aquiferos/files/2011/11/projeto_aquiferos.pdf>. Acesso em: 12 de jun. 2012.

SÃO PAULO. Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo (SIGRH). **Mapas**. 2008. Disponível em: < <http://mapas.sigrh.sp.gov.br:8888/sigrh.php>>. Acesso em: 12 de fev. de 2013.

SÃO PAULO. Instituto Geológico. **Projeto ambiental estratégico aquíferos**: síntese das atividades período 2007 – 2010. São Paulo: Instituto Geológico, 2011. 144 p.

SÃO PAULO. Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo (SIGRH). **Cobrança pelo uso dos Recursos Hídricos**. Disponível em: < <http://sigrh.sp.gov.br/sigrh/cobranca/legislacao.html> >. Acesso em: 9 de jun. 2013.

SCANLON, B. R.; REEDY, R. C.; STONESTROM, D. A.; PRUDIC, D. E.; DENNEHY, K. F. Impact of land use and land cover change on groundwater recharge and quality in the southwestern US. **Global Change Biology**, v. 11, 2005, p. 1577-1593. Disponível em: < http://www.beg.utexas.edu/staffinfo/Scanlon_pdf/Scanlon_GCB05.pdf >. Acesso em: 07 de nov. de 2012.

SHIKLOMANOV, I. **World Water Resources**: a new appraisal and assessment for 21st century. Paris: International Hydrological Programme/UNESCO, 1998. 37p.

SILVA, M.F.B.; NICOLETTI, A.; ROCCA, A.C.C.; CASARINI, D.C.P. Uso e qualidade das águas subterrâneas para abastecimento público no Estado de São Paulo. In: **10 CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**. São Paulo, 1998. São Paulo: ABAS, 1998. CD-ROM.

SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. **Gestão de Recursos Hídricos-aspectos legais, econômicos, administrativos e sociais**. Brasília, DF: Secretaria de Recursos Hídricos; Viçosa, MG. Universidade Federal de Viçosa, 2000.

SILVA, L. L.; DONICCI, C. L.; AYALA, J. D. Traçadores: o uso de agentes Químicos para estudos hidrológicos, ambientais, petroquímicos e biológicos. **Química Nova**, v.32, nº6, 2009. p. 1576-1585.

SOPHOCLEOUS, M. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. **Journal Hydrogeology**. v. 10, 2002. p. 52-67.

SOLDERA, B. C. **Monitoramento dos níveis freáticos do aquífero Bauru (Formação Adamantina) no município de Assis – SP**. 2011.

89p. Trabalho de conclusão de curso. Bacharelado – Geografia. Universidade Estadual Paulista, Campus Experimental de Ourinhos, Ourinhos/SP, 2011.

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

SOLDERA, B. C.; MANZIONE, R. L.; WENDLAND, E. Avaliação do desempenho do modelo PIRFICT utilizando diferentes séries temporais de entrada. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**, 17, 2012. Anais do XVII Congresso Brasileiro De Águas Subterrâneas, 2012, CD-ROM.

SOLDERA, B. C.; PAULA, S. O. MANZIONE, R. L. Modificações no uso e cobertura do solo e seus efeitos na oscilação do nível freático em uma área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG) analisadas a partir de dados de precipitação e séries EVI (Índice de Vegetação Melhorada). In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 16, 2012. Anais do XVI Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto, 2013, CD-ROM.

SOUZA L. V. **Programação Genética e Combinação de Preditores para Previsão de Séries Temporais**. 2006. 137 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2006.

SOUZA, L. C. **Águas subterrâneas e a Legislação brasileira no Juruá**. Curitiba, 2009. 235 p.

SRACEK, O.; HIRATA, R. Geochemical and stable isotopic evolution of the Guarani Aquifer System in the State of São Paulo, Brazil. **Hydrogeology Journal**, v.10, n.6, 2002. p. 643-655.

STEPHENS, D. B. **Vadose Zone Hydrology**. Lewis Publishers, 1996. 347 p.

TANKERSLEY, C. D.; GRAHAM, W. D. Development of an optimal control system for maintaining minimum groundwater levels. **Water Resources Research**, v. 30, 1994. p. 3171-3181.

TOTH, J. A conceptual model of the groundwater regime and the hydrogeologic environment. **Journal of Hydrology**. v.10, 1970. p. 164–176.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2 ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos / Editora da UFRGS, 2005. 678p.

VAERET, L.; KELBE, B.; HALDORSEN, S.; TAYLOR, R. H. A modeling study of the effects of land management and climatic variations on groundwater inflow to Lake St Lucia, South Africa. **Hydrogeology Journal**, v. 17, p. 1949-1967, 2009.

VAN GEER, F. C.; ZUUR, A. F. An extension of Box-Jenkins transfer/noise models for spatial interpolation of groundwater head series. **Journal of Hydrology**, v. 192, 1997. p. 65-80.

VON ASMUTH, J. R.; BIERKENS, M. F. P.; MAAS, C. Transfer function noise modelling in continuous time using predefined impulse response functions. **Water Resources Research**, v. 38 , 2002. p. 23.1-23.12.

VON ASMUTH, J. R.; KNOTTERS, M. Characterising groundwater dynamics based on a system identification approach. **Journal of Hydrology**, v. 296, 2004. p. 34-118.

VON ASMUTH J. R.; MAAS, K.; BAKKER, M.; PETERSEN, J. Modeling time series of groundwater head fluctuations subjected to multiple stresses. **Ground Water**, v.46, 2008. p. 30-40.

VON ASMUTH, J. R. **Groundwater System Identification through Time Series Analysis**. 2012. 221 p. Tese (Doutorado em) - Technische Universiteit Delft, Delft- Holanda, 2012.

WENDLAND, E, BARRETO, C. E. A. G., GOMES, L. H. Water balance in the Guarani Aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring. **Journal of Hydrology**, v.342, 2007. p. 261-269.

WINTER, T.C., JUDSON, W.H., FRANKE, O.L., ALLEY, W.M. **Ground water and surface water a single resource**. US Geological Survey, Denver, 1998.

YI, M.; LEE, K. (2003). Transfer function-noise modelling of irregularly observed groundwater heads using precipitation data. **Journal of Hydrology**, v. 288, 2003. p. 272-287.

YU, Z. Modeling and Prediction. **Hydrology**, v13, n.5, 2003. 980 – 987 p.

ZOBY, J. L. G. Panorama da Qualidade das Águas Subterrâneas no Brasil. **Caderno de Recursos Hídricos**. v. 5, 2007. p. 61-113.

APÊNDICE 1- Histogramas das distribuições de frequência das variáveis observadas

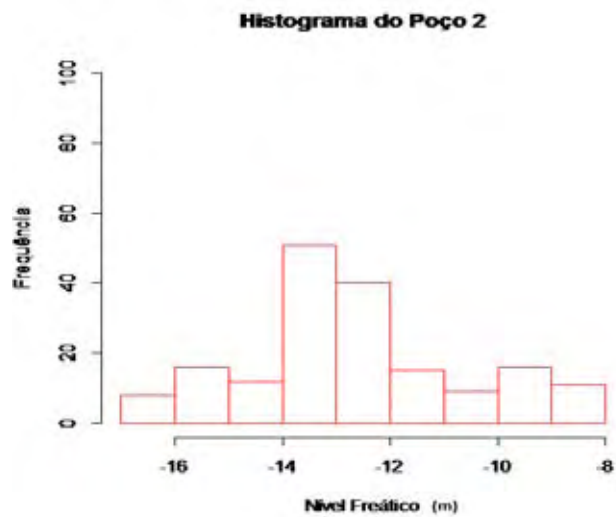


Figura A1-1: Histograma do Poço 2

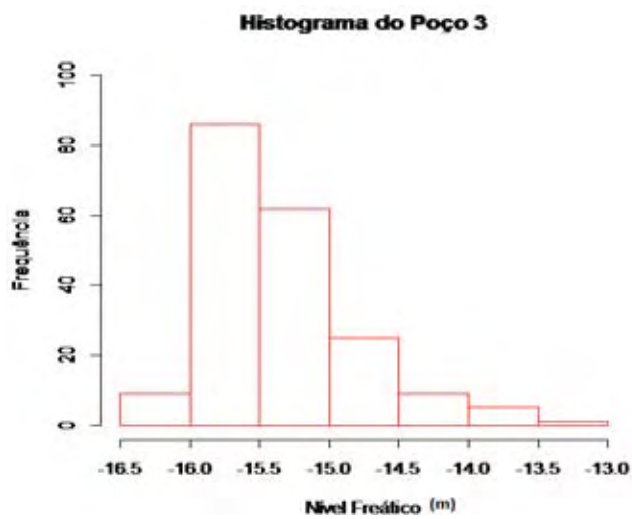


Figura A1-2: Histograma do Poço 3

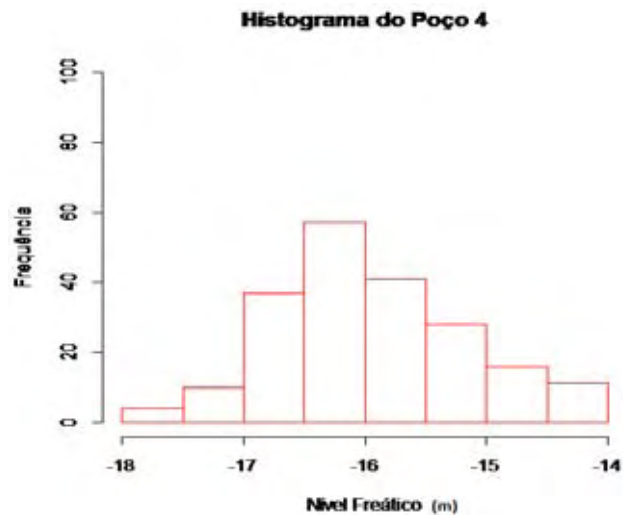


Figura A1-3: Histograma do Poço 4



Figura A1-4: Histograma do Poço 5

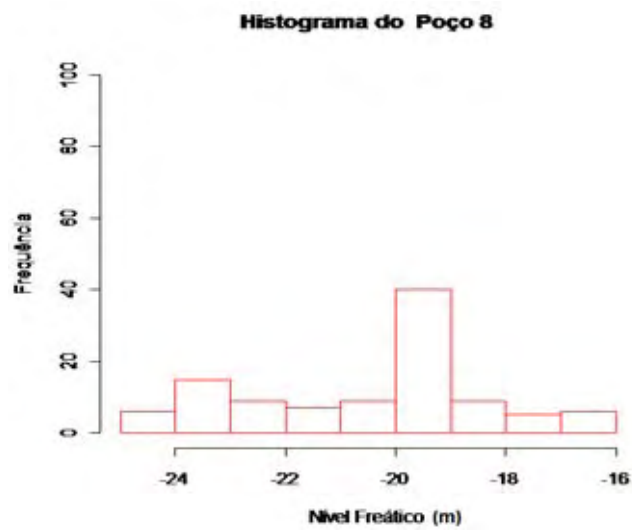


Figura A1-5: Histograma do Poço 8



Figura A1-6: Histograma do Poço 9



Figura A1-7: Histograma do Poço 10

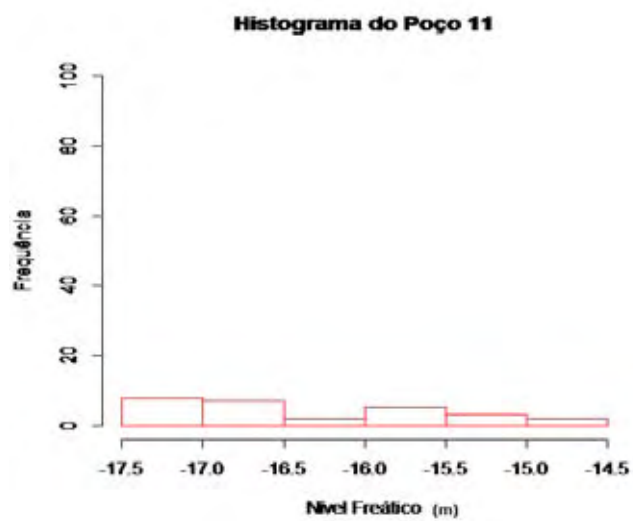


Figura A1-8: Histograma do Poço 11

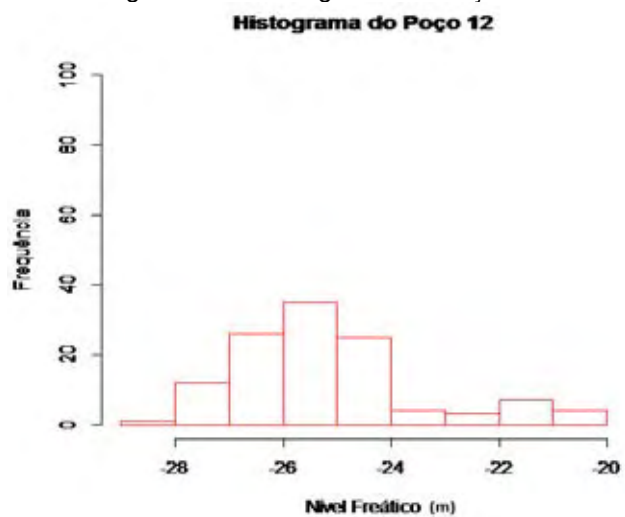


Figura A1-9: Histograma do Poço 12

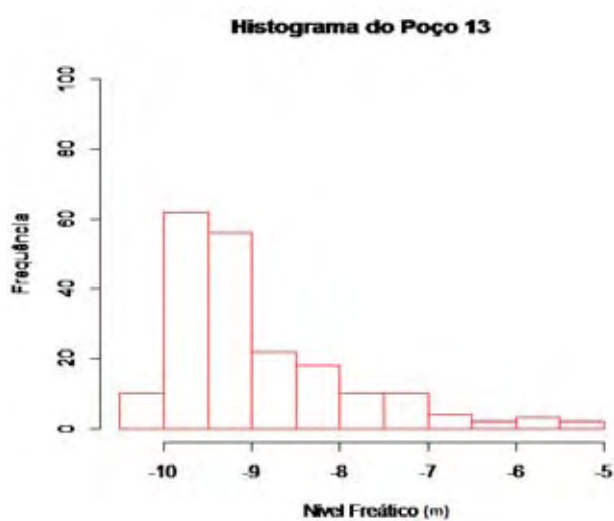


Figura A1-10: Histograma do Poço 13



Figura A1-11: Histograma do Poço 14

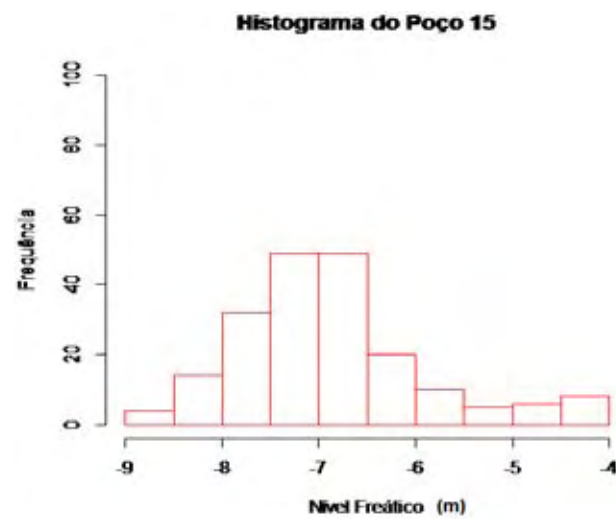


Figura A1-12: Histograma do Poço 15



Figura A1-13: Histograma do Poço 16

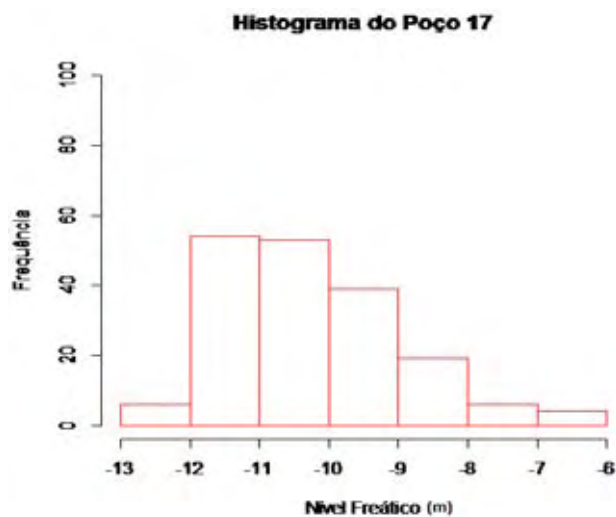


Figura A1-14: Histograma do Poço 17

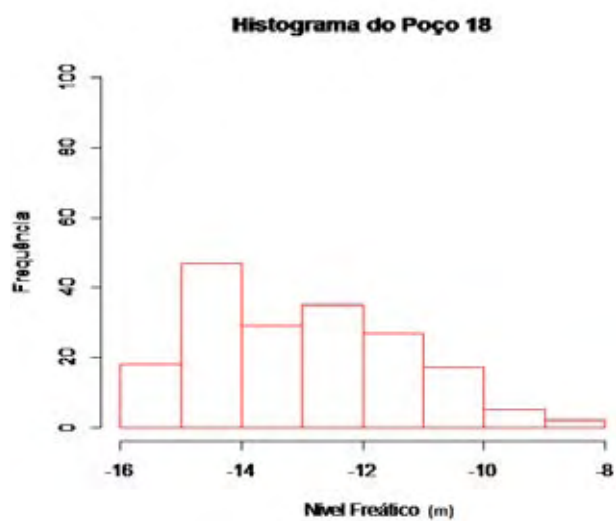


Figura A1-15: Histograma do Poço 18

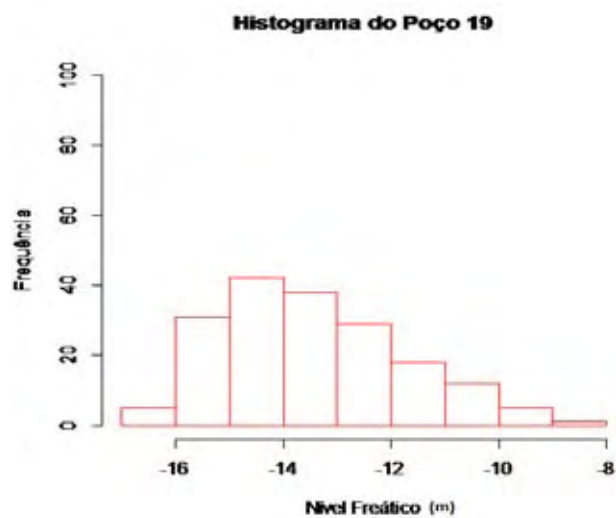


Figura A1-16: Histograma do Poço 19

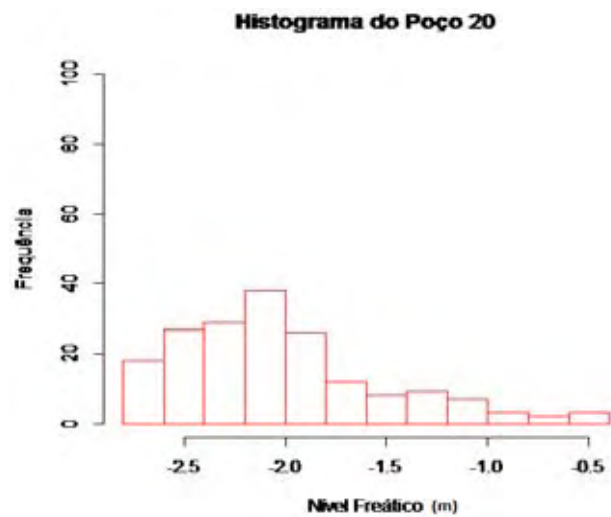


Figura A1-17: Histograma do Poço 20

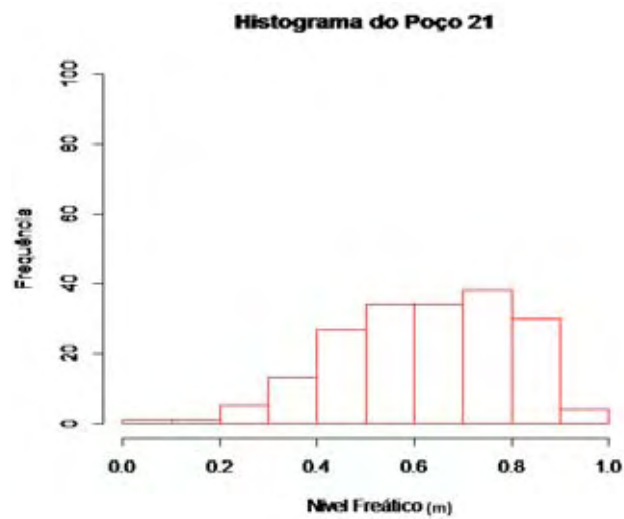


Figura A1-18: Histograma do Poço 21

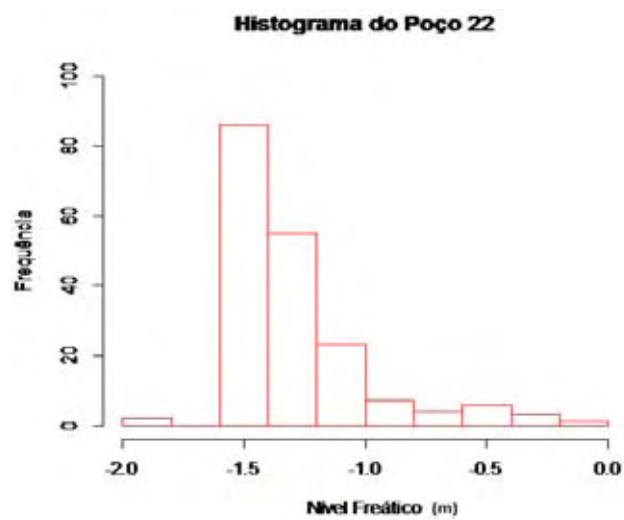


Figura A1-19: Histograma do Poço 22



Figura A1-20: Histograma do Poço 23



Figura A1-21: Histograma da Precipitação

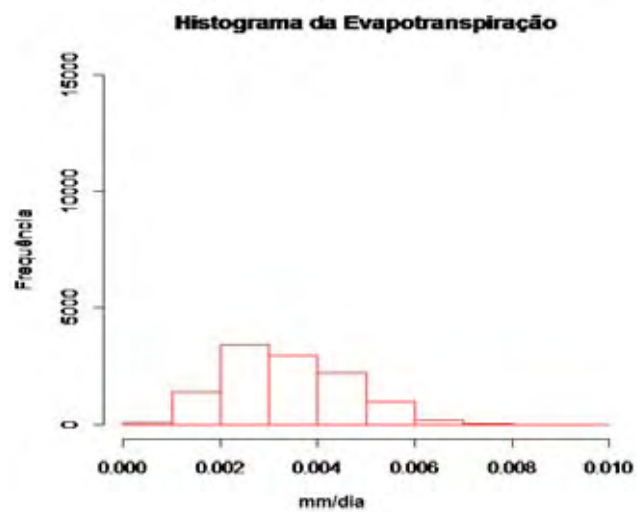


Figura A1-22: Histograma da Evapotranspiração

APÊNDICE 2- Gráficos de Função de Autocorrelação (ACF) e Função de Autocorrelação Parcial (PACF)

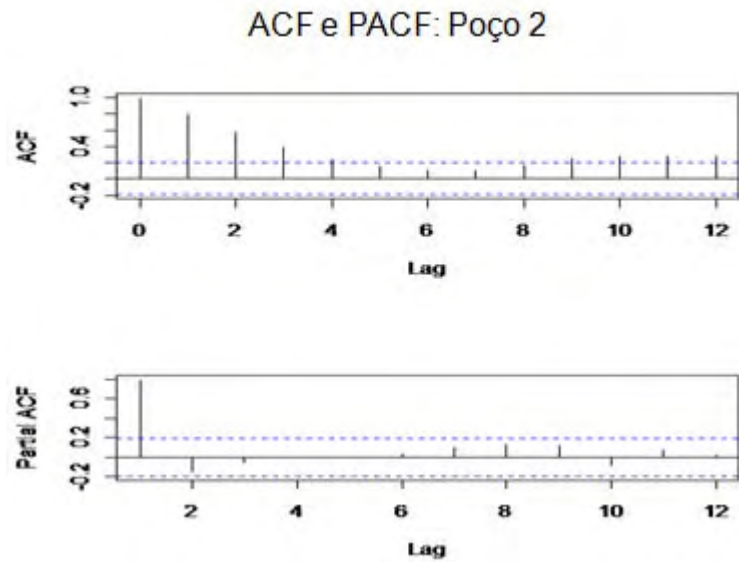


Figura A2-1: Função de Autocorrelação (ACF) e Função de Autocorrelação Parcial (PACF) para o poço de monitoramento 2

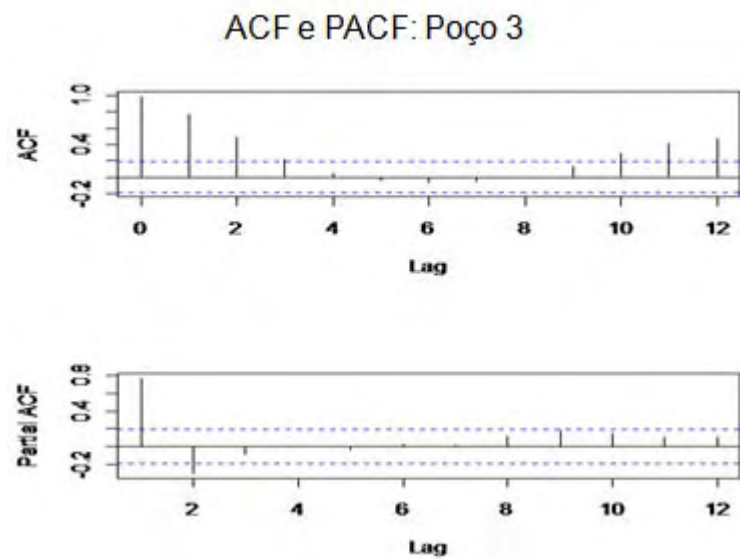


Figura A2-2: Função de Autocorrelação (ACF) e Função de Autocorrelação Parcial (PACF) para o poço de monitoramento 3

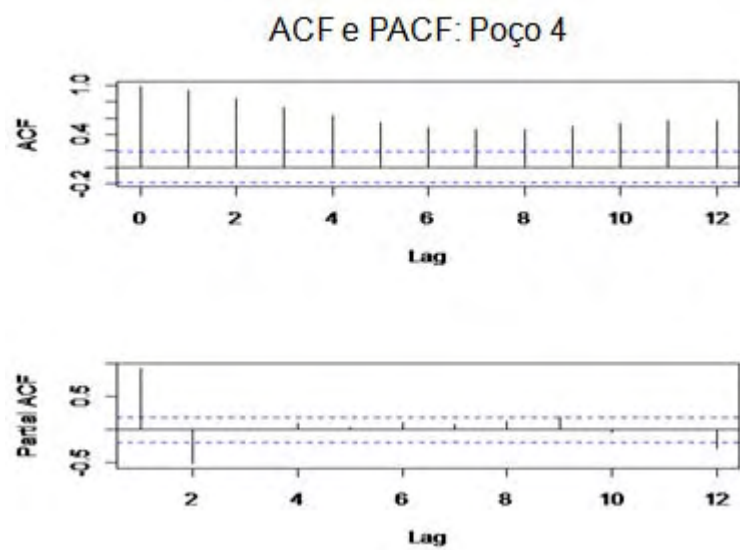


Figura A2-3: Função de Autocorrelação (ACF) e Função de Autocorrelação Parcial (PACF) para o poço de monitoramento 4

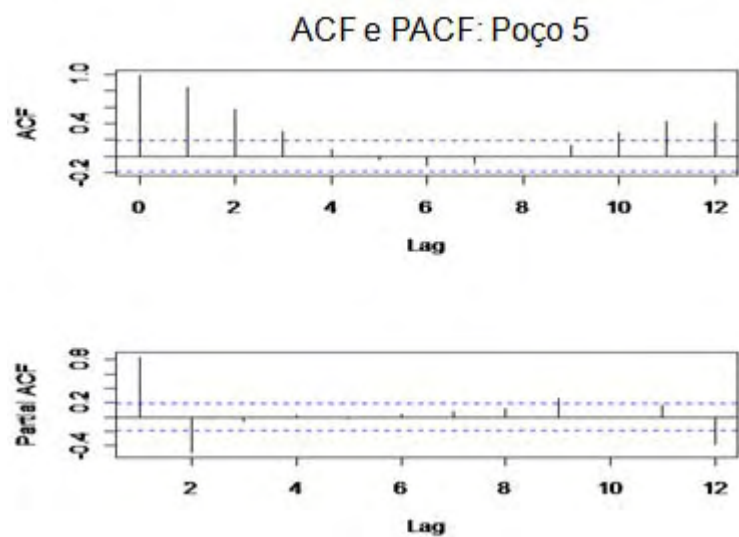


Figura A2-4: Função de Autocorrelação (ACF) e Função de Autocorrelação Parcial (PACF) para o poço de monitoramento 5

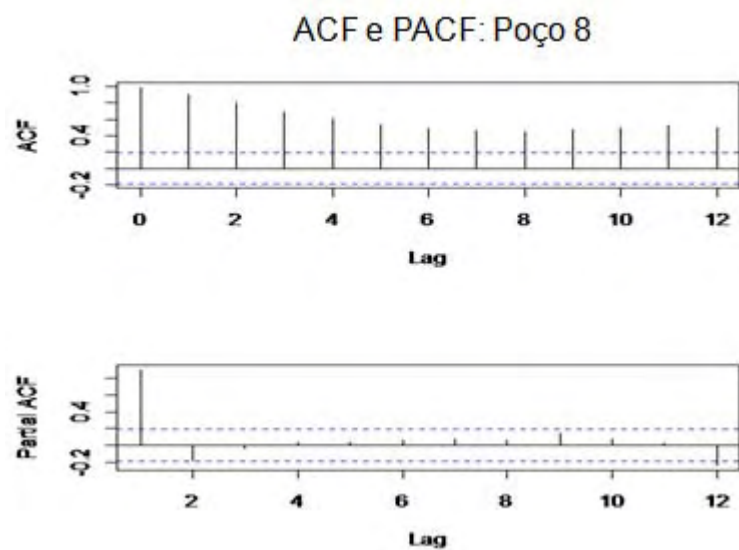


Figura A2-5: Função de Autocorrelação (ACF) e Função de Autocorrelação Parcial (PACF) para o poço de monitoramento 8

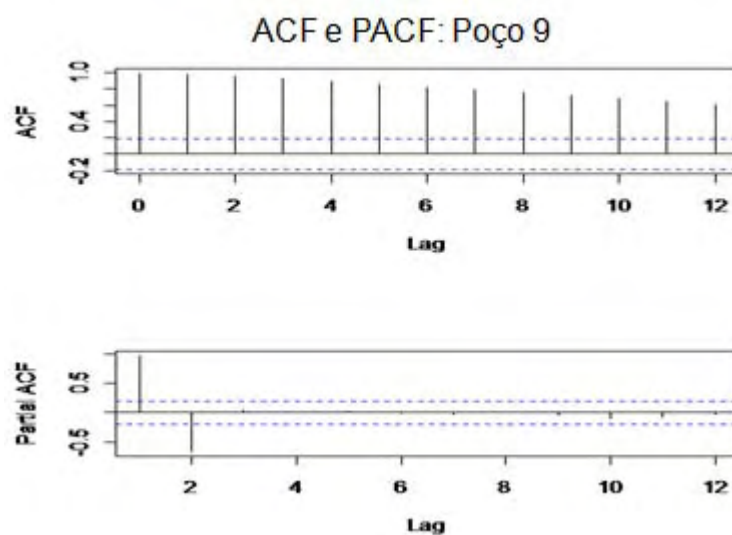


Figura A2-6: Função de Autocorrelação (ACF) e Função de Autocorrelação Parcial (PACF) para o poço de monitoramento 9

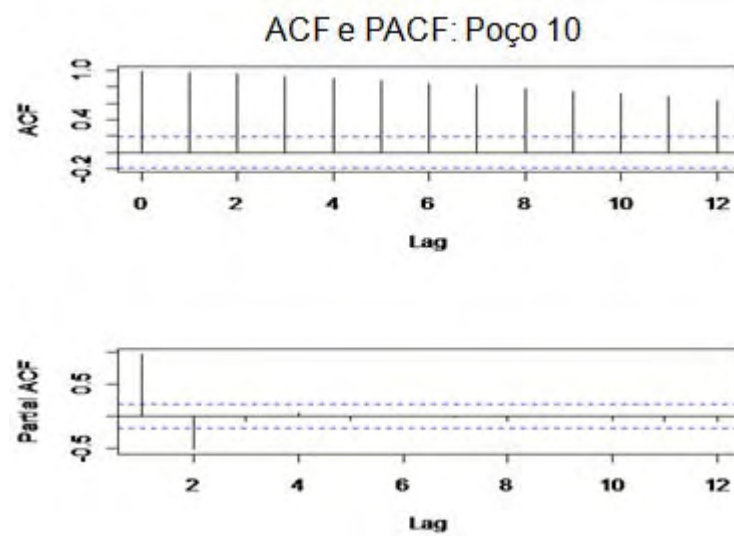


Figura A2-7: Função de Autocorrelação (ACF) e Função de Autocorrelação Parcial (PACF) para o poço de monitoramento 10

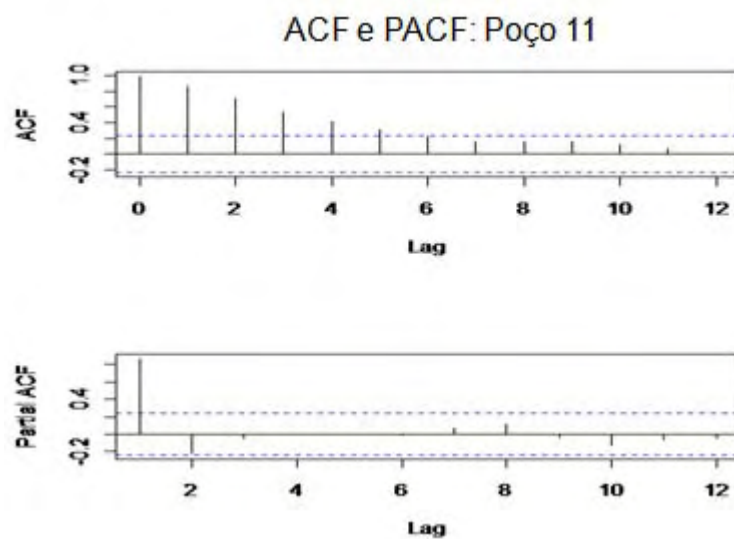


Figura A2-8: Função de Autocorrelação (ACF) e Função de Autocorrelação Parcial (PACF) para o poço de monitoramento 11

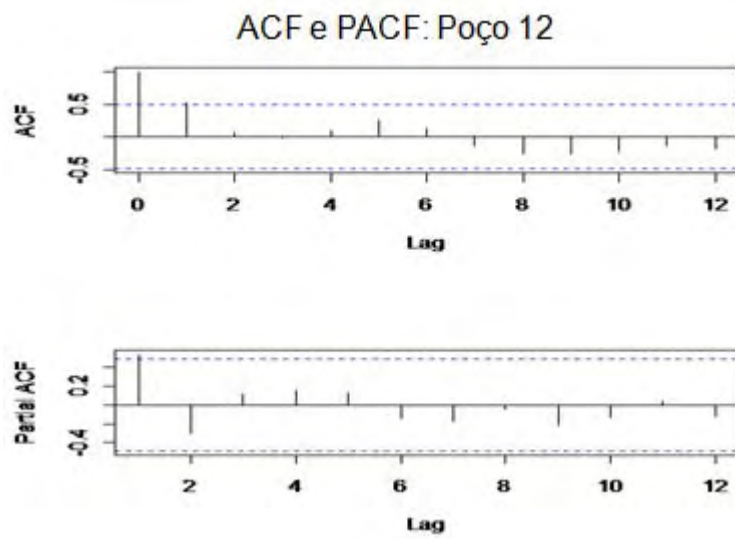


Figura A2-9: Função de Autocorrelação (ACF) e Função de Autocorrelação Parcial (PACF) para o poço de monitoramento 12

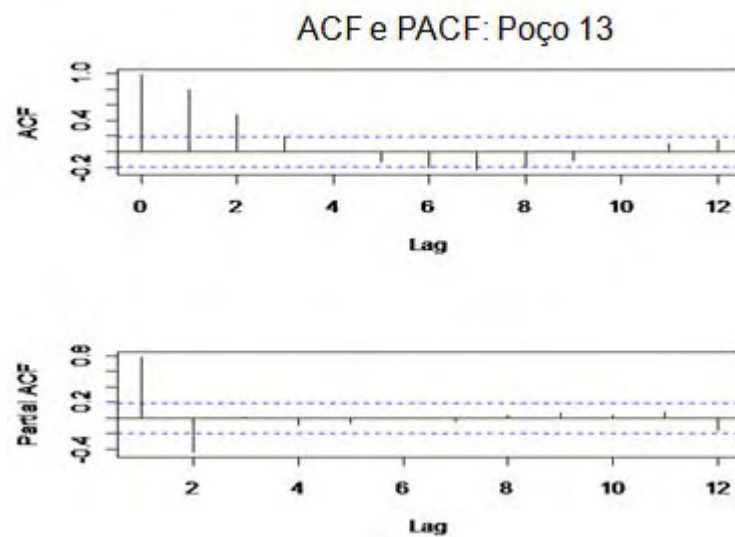


Figura A2-10: Função de Autocorrelação (ACF) e Função de Autocorrelação Parcial (PACF) para o poço de monitoramento 13

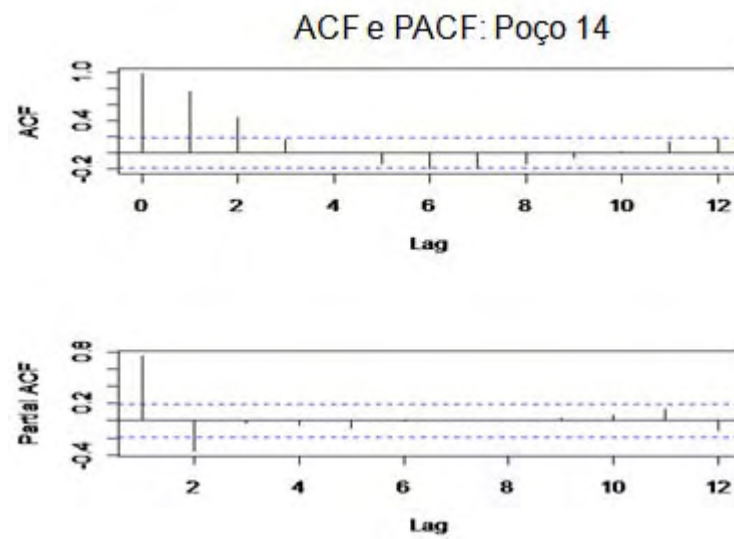


Figura A2-11: Função de Autocorrelação (ACF) e Função de Autocorrelação Parcial (PACF) para o poço de monitoramento 14

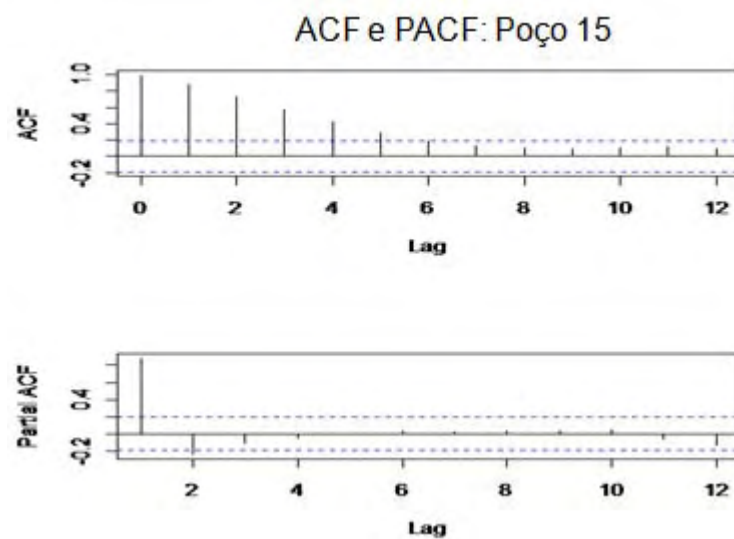


Figura A2-12: Função de Autocorrelação (ACF) e Função de Autocorrelação Parcial (PACF) para o poço de monitoramento 15

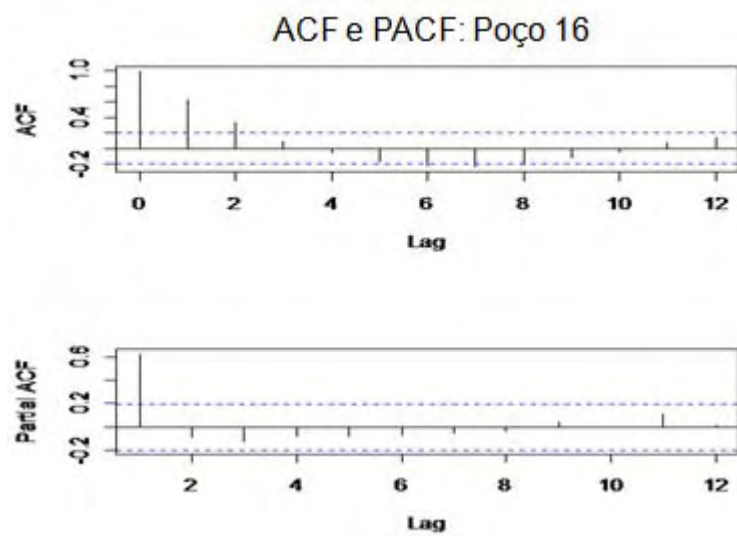


Figura A2-13: Função de Autocorrelação (ACF) e Função de Autocorrelação Parcial (PACF) para o poço de monitoramento 16

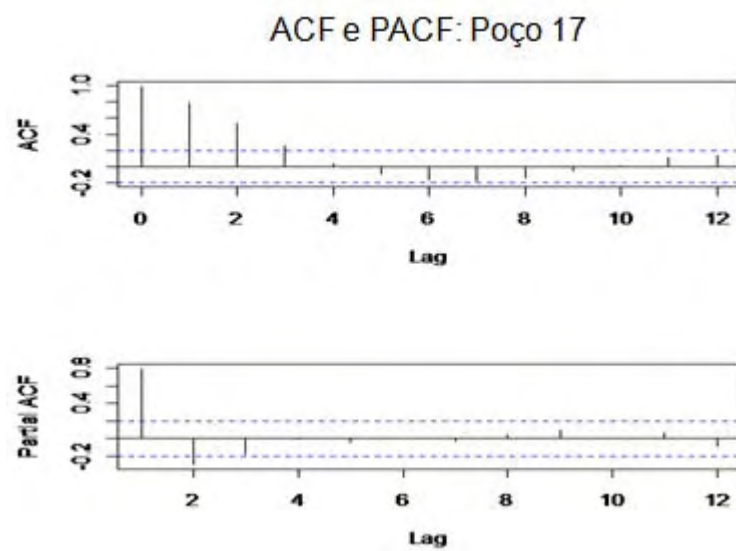


Figura A2-14: Função de Autocorrelação (ACF) e Função de Autocorrelação Parcial (PACF) para o poço de monitoramento 17

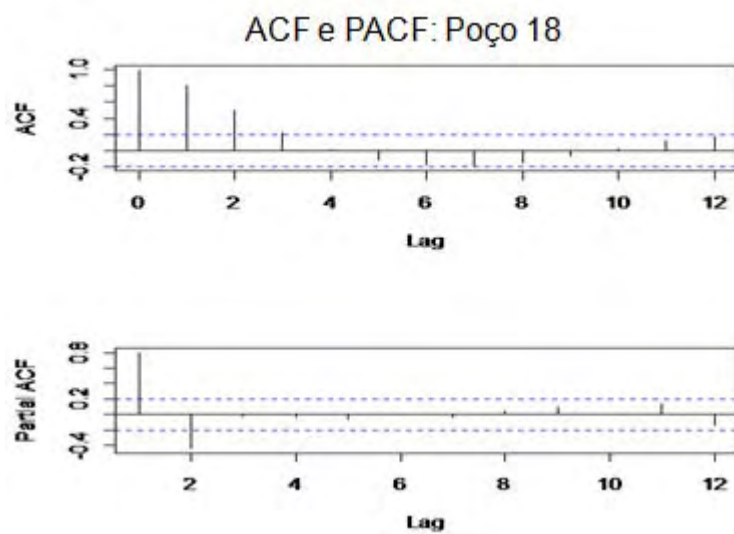


Figura A2-15: Função de Autocorrelação (ACF) e Função de Autocorrelação Parcial (PACF) para o poço de monitoramento 18

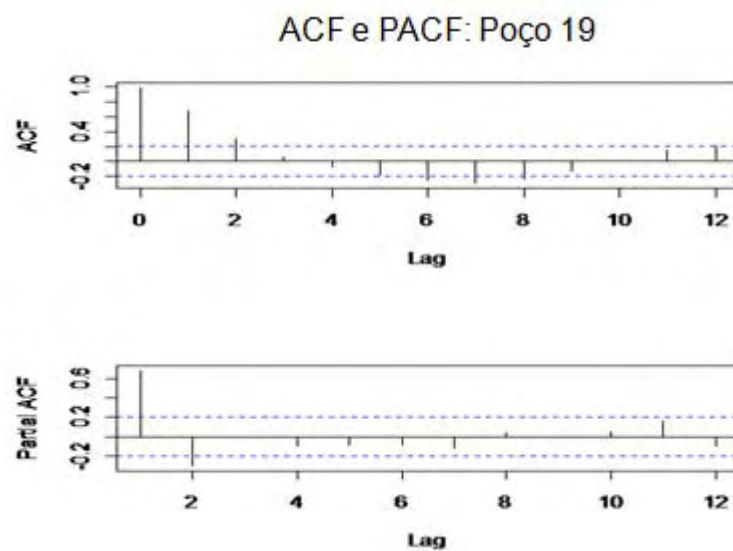


Figura A2-16: Função de Autocorrelação (ACF) e Função de Autocorrelação Parcial (PACF) para o poço de monitoramento 19

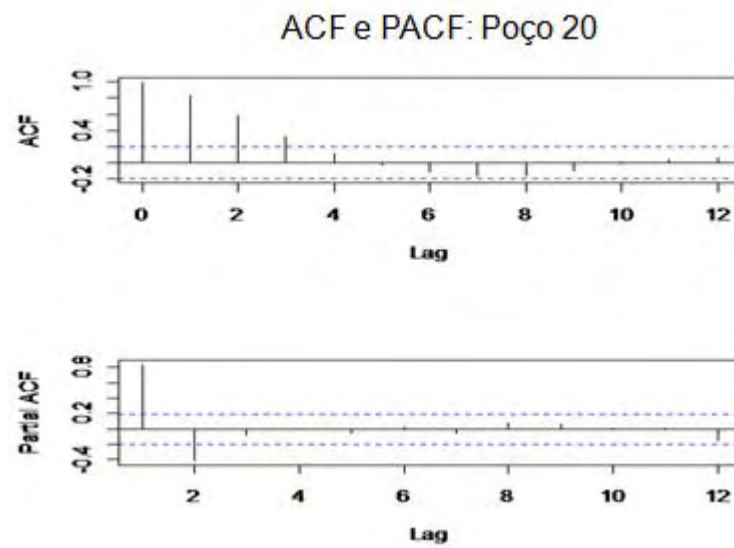


Figura A2-17: Função de Autocorrelação (ACF) e Função de Autocorrelação Parcial (PACF) para o poço de monitoramento 20

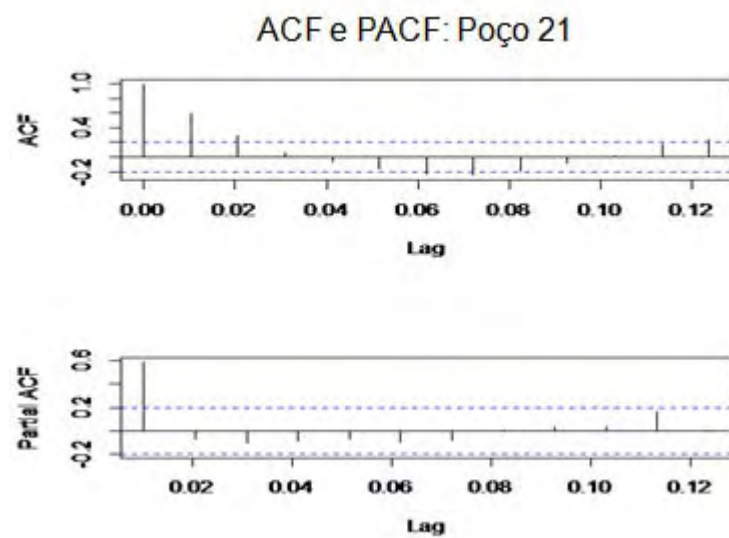


Figura A2-18: Função de Autocorrelação (ACF) e Função de Autocorrelação Parcial (PACF) para o poço de monitoramento 21

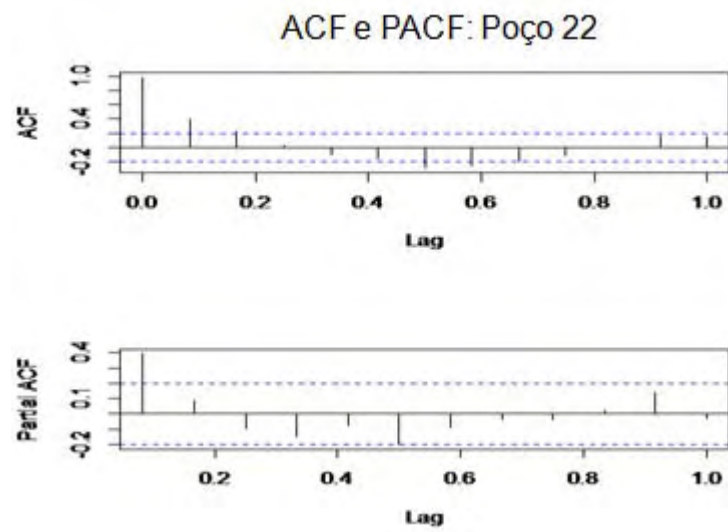


Figura A2-19: Função de Autocorrelação (ACF) e Função de Autocorrelação Parcial (PACF) para o poço de monitoramento 22

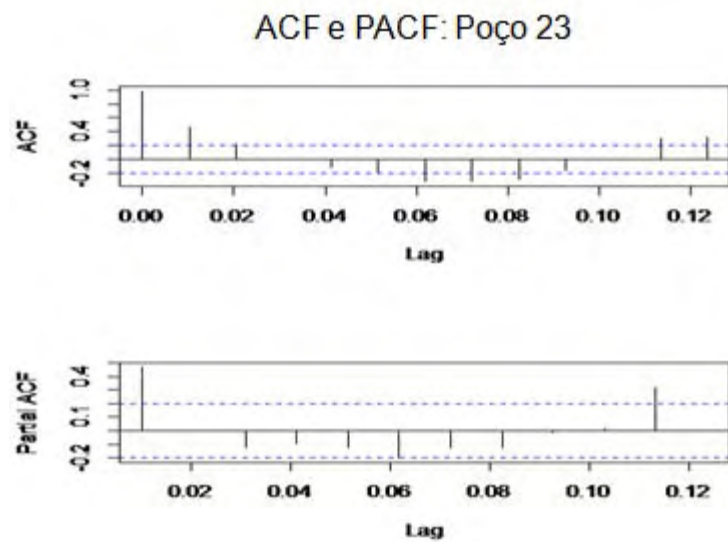


Figura A2-20: Função de Autocorrelação (ACF) e Função de Autocorrelação Parcial (PACF) para o poço de monitoramento 23