
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE
ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

FLORA WÜRTH SIMON

**ESTIMATIVA DE RECARGA DO AQUÍFERO GUARANI NA BACIA DO RIO IBICUI
(RS), COM BASE NA APLICAÇÃO DO MÉTODO DE VARIAÇÃO DOS NÍVEIS DE
ÁGUA.**

Porto Alegre

Julho 2014

FLORA WÜRTH SIMON

ESTIMATIVA DE RECARGA DO AQUÍFERO GUARANI NA BACIA DO RIO IBICUÍ
(RS), COM BASE NA APLICAÇÃO DO MÉTODO DE VARIAÇÃO DOS NÍVEIS DE
ÁGUA.

TRABALHO DE CONCLUSÃO
APRESENTADO AO CURSO DE
ENGENHARIA AMBIENTAL DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO
GRANDE DO SUL COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE ENGENHEIRO AMBIENTAL.

Orientador: Pedro Antonio Roehe Reginato

Coorientador: Roberto Eduardo Kirchheim

Porto Alegre

Julho 2014

FLORA WÜRTH SIMON

ESTIMATIVA DE RECARGA DO AQUÍFERO GUARANI NA BACIA DO RIO IBICUÍ
(RS), COM BASE NA APLICAÇÃO DO MÉTODO DE VARIAÇÃO DOS NÍVEIS DE
ÁGUA.

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em **11/07/2014** pela Comissão avaliadora constituída pelos professores:

Banca Examinadora:

Marcos Alexandre de Freitas – Gerente de Hidrologia e Gestão Territorial/CPRM/
PORTO ALEGRE

Prof. Dr. Marcos Imério Leão – Departamento de Hidromecânica e Hidrologia/
Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS

Prof. Dr. Walter Collischonn – Departamento de Hidromecânica e Hidrologia/
Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS

Conceito: A

Dedico este trabalho a meu pai, Zeno Simon, que me ensinou o valor indispensável da água em nossas vidas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente ao Prof. Pedro Antonio Roehé Reginato, orientador deste trabalho, pelo apoio constante e pelas respostas coerentes a todos os meus questionamentos.

Agradeço a minha mãe Ligia, ao meu irmão Guilherme e ao meu namorado Juliano Guimarães, que sempre me apoiaram e foram compreensivos, especialmente nos momentos da minha ausência para me dedicar a faculdade. Agradeço também a toda minha família, pela compreensão nos momentos de ausência.

Agradeço ao coorientador Roberto Kirchheim, que sempre me incentivou com ótimas idéias, além de me proporcionar a oportunidade de elaborar este trabalho.

Agradeço a Karine Pickbrenner, Amanda Martins, Camila Mattiuzi e Guilherme Troian, que me auxiliaram na elucidação de dúvidas relacionadas a este trabalho.

Agradeço as amigas Marina, Bruna, Denise e Andréia, pelo apoio e amizade, que já vem de muitos anos.

Agradeço a todos os colegas da Engenharia Ambiental, que compartilharam comigo muitos momentos de alegria. Obrigada por todas as horas de estudo, as rodadas de truço nos intervalos das aulas e as festas e viagens de turma.

Agradeço aos meus grandes amigos que fiz no curso de Engenharia Ambiental. Aline, Elizabeth e Cássio, obrigada pela companhia e suporte ao longo desses anos, principalmente no último semestre do nosso curso.

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas pelo ensino de qualidade.

Agradeço à Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais pela oportunidade de estágio e de realização deste trabalho.

O futuro tem muitos nomes.
Para os fracos é o inalcançável.
Para os temerosos, o desconhecido.
Para os valentes é a oportunidade.

Victor Hugo

RESUMO

SIMON, F. W. **Estimativa de recarga do Aquífero Guarani na bacia do rio Ibicuí (RS), com base na aplicação do método de variação dos níveis de água**, 2014. 68 p. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Ambiental – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

A estimativa de recargas aquíferas é um fator determinante para a gestão sustentável das águas subterrâneas, uma vez que permite, a longo prazo, a manutenção da quantidade e qualidade da água dos aquíferos. Para a estimativa de recargas aquíferas existem diversos métodos que podem ser empregados e que variam de acordo com as características da área estudada e as escalas a serem trabalhadas. Este trabalho busca estimar a recarga do Sistema Aquífero Guarani na bacia do rio Ibicuí, com base na aplicação do método Variação dos Níveis d'Água (VNA). Os dados de nível d'água foram obtidos de oito poços de monitoramento pertencentes a rede RIMAS (CPRM), instalados na bacia do rio Ibicuí. O método foi aplicado para a média mensal dos níveis de água em cada poço de monitoramento, em períodos que variaram entre 24 e 39 meses. Os valores de recarga obtidos foram avaliados com a precipitação mensal, para o mesmo período, e então obteve-se a quantidade de precipitação que corresponde ou que pode ser considerada como recarga. Estes resultados variaram entre 11 % e 30 %, com média de 16,54 %. O método, de maneira geral, se mostrou de fácil aplicabilidade, ocorrendo boas correspondências entre a precipitação e as elevações dos níveis d'água. Fez-se também a comparação dos resultados na aplicação do método VNA com a aplicação do método do escoamento de base, também na bacia do Ibicuí, em trabalho realizado no ano de 2013.

Palavras-chave: recarga subterrânea; sistema aquífero guarani; VNA; bacia do Ibicuí

ABSTRACT

SIMON, F. W. Estimation of recharge of the Guarani Aquifer System in the Ibicuí river basin (RS), based on the application of the water-table fluctuation method, 2014. 68 p. Environmental Engineering Graduation Work – Hydraulics Research Institute. Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

The estimation of groundwater recharge is a determining factor to the sustainable management of the groundwater, once that allows, at a long term, the maintenance of the quantity and quality of the water in aquifers. To the estimation of aquifer recharges there are different methods that can be used and which change according to the characteristics of the area in study and the scales to be worked. This work seeks to estimate the recharge of the Guarani Aquifer System in the Ibicuí River basin, based on the application of the Water-Table Fluctuation (WTF) method. The water level data were obtained from eight monitoring wells that belong to RIMAS (CPRM) and that are installed in the Ibicuí River basin. The method was applied to the monthly average of the water level to each monitoring well, in periods between 24 and 29 months. The values of recharge obtained were compared with the monthly precipitation, to the same period, and then it was obtained the amount of precipitation that is or can be considered as recharge. These results vary between 11 % and 30 %, with average of 16,54 %. The method, generally speaking, was easy to apply, with great corresponding between precipitation and the water level elevations. A parallel was made between the results at the application of WTF method with the application of base flow separation method, applied also in the Ibicuí River basin, in a study made at the year of 2013.

Keywords: groundwater recharge; guarani aquifer system; WTF, Ibicuí basin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Elevação hipotética no nível de água do poço em resposta a precipitação.....	20
Figura 2: Sistema Aquífero Guarani no estado do Rio Grande do Sul.....	25
Figura 3: Microfotografias dos arenitos nas unidades Botucatu e Sanga do Cabral.....	26
Figura 4: Aplicação do método VNA.....	33
Figura 5: Mapa de localização das bacias.....	35
Figura 6: Distribuição dos PM's e hidrogeologia da bacia do Ibicuí.....	36
Figura 7: Perfis geológicos dos poços de monitoramento.....	38
Figura 8: Distribuição da precipitação na bacia do Ibicuí.....	42
Figura 9: Gráfico do PM Puitã x precipitação da estação Cachoeira Santa Cecília.....	43
Figura 10: Gráfico do PM ETA Centro x precipitação da estação Rosário do Sul.....	45
Figura 11: Localização do PM ETA Centro em relação a estação fluviométrica Ponte Ibicuí da Armada.....	46
Figura 12: Gráfico do PM ETA Centro x vazão da estação Ponte Ibicuí da Armada.....	46
Figura 13: Gráfico do PM São Carlos x precipitação da estação São Carlos.....	48
Figura 14: Gráfico do PM Escola Agrícola x precipitação da estação São João.....	49
Figura 15: Gráfico do PM Estância Santa Rita x precipitação da estação Santa Rita.....	51
Figura 16: Gráfico do PM Torrão x precipitação da estação BR-293.....	52
Figura 17: Gráfico do PM Miracatu x precipitação da estação Ponte do Miracatu.....	53
Figura 18: Gráfico do PM Reservatório da Corsan x precipitação da estação Jacaqua....	53
Figura 19: Distribuição dos valores de recarga em relação à precipitação na bacia do Ibicuí.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de rendimento específico para diversos autores.....	31
Tabela 2: Características dos PM's.....	36
Tabela 3: Caracterização hidráulica das classes dos aquíferos.....	40
Tabela 4: Estações pluviométricas utilizadas na avaliação.....	41
Tabela 5: Resultados do cálculo da recarga para o PM Puitã.....	43
Tabela 6: Resultados do cálculo da recarga para o PM ETA Centro.....	44
Tabela 7: Resultados do cálculo da recarga para o PM São Carlos.....	47
Tabela 8: Resultados do cálculo da recarga para o PM Escola Agrícola.....	49
Tabela 9: Resultados do cálculo da recarga para o PM Estância Santa Rita.....	50
Tabela 10: Resultados do cálculo da recarga para o PM Torrão.....	52
Tabela 11: Valores de recarga encontrados para cada PM.....	54
Tabela 12: Comparação entre dois métodos de estimativa de recarga.....	56

LISTA DE SIGLAS

ANA: Agência Nacional das Águas

CPRM: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

CNRH: Conselho Nacional de Recursos Hídricos

DRH: Departamento de Recursos Hídricos

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPT: Instituto de Pesquisas Tecnológicas

OAS/GEF: Organisation of American States/Global Environment Facility

OEA: Organização dos Estados Americanos

PNRH: Plano Nacional dos Recursos Hídricos

RHU: Região Hidrográfica do Uruguai

RIMAS: Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas

RS: Rio Grande do Sul

SAG: Sistema Aquífero Guarani

SIAGAS: Sistema de Informações de Águas Subterrâneas

UNESCO: Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

VNA: Variação do Nível de Água

WTF: Water Table Fluctuation

WWAP: World Water Assessment Programme

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1	Descrição do Problema e Justificativa.....	13
1.2	Objetivos.....	14
1.2.1	Objetivos Gerais	14
1.2.2	Objetivos Específicos.....	14
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1	Demanda e uso de água subterrânea.....	15
2.2	Gestão e monitoramento das águas subterrâneas	16
2.3	Recarga aquífera e reservas reguladoras	16
2.4	Métodos de estimativa de recarga	18
2.5	Caracterização do Sistema Aquífero Guarani (SAG).....	24
2.5.1	Localização e Extensão	24
2.5.2	Estimativa de recarga	26
3.	METODOLOGIA	29
3.1	Escolha da área de estudo.....	29
3.2	Levantamento dos dados e mapas gerados.....	29
3.3	Caracterização do Sistema Aquífero Guarani na área de estudo.....	29
3.4	Caracterização pluviométrica da área.....	30
3.5	Uso do método VNA para obtenção de estimativas de recarga	30
3.5.1	Determinação do rendimento específico	30
3.5.2	Avaliação da variação do nível d'água e estimativa da recarga	32
4.	RESULTADOS	35
4.1	Localização da área de estudo	35
4.2	Caracterização hidrogeológica da área	36
4.3	Caracterização da precipitação	41
4.4	Avaliação da recarga aquífera	42

5.	CONCLUSÕES.....	58
6.	RECOMENDAÇÕES	60
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

1. INTRODUÇÃO

1.1 Descrição do Problema e Justificativa

O desenvolvimento econômico e social das distintas sociedades sempre teve como base o uso dos recursos hídricos, sendo limitado, ao mesmo tempo, pela disponibilidade dos mesmos. O intenso aumento populacional e a crescente demanda por estes recursos, resultaram em inúmeros problemas, ora globais, ora locais, e dentre os mais graves destaca-se a falta de água disponível para o abastecimento humano, irrigação, dessedentação animal e outras atividades.

As águas subterrâneas, neste contexto, historicamente vem sendo utilizadas como fonte alternativa e suprem de forma complementar estas múltiplas demandas. Atualmente, a partir de fontes subterrâneas se provê quase a metade de toda a água potável do mundo. Em uma escala global, a taxa de uso de água subterrânea triplicou nos últimos 50 anos. (UNESCO - WWAP, 2012).

Entretanto, este uso intenso e descontrolado das águas subterrâneas pode ocasionar, entre outras externalidades, a diminuição das reservas dos aquíferos e a contaminação dos mesmos. Para assegurar a manutenção destas reservas e a qualidade dos respectivos recursos subterrâneos, o manejo sustentável da água subterrânea é de vital importância para a sociedade e o meio ambiente (GUN, 2012).

No Brasil, a Lei nº 9.443, de 8 de janeiro de 1997, instituiu a política nacional de recursos hídricos (criando o sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos e o conselho nacional de recursos hídricos), a qual destaca, entre outros quesitos, a importância da gestão dos recursos hídricos de maneira a proporcionar o uso múltiplo das águas. A Lei apresenta a criação dos planos de recursos hídricos, verdadeiros planos diretores que devem conter o diagnóstico da situação dos recursos hídricos. Além disso, os planos devem estabelecer prioridades, metas, medidas e propostas visando o gerenciamento integrado em bacias, estados e no próprio país, vide o Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), confeccionado com ampla participação da sociedade e aprovado em 2006.

No âmbito do estado do Rio Grande do Sul, dentro do marco da referida política nacional de recursos hídricos, foi elaborado em 2006 o Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH-RS). Um dos objetivos deste documento foi o de estimar as

disponibilidades e demandas hídricas no estado e nas distintas bacias hidrográficas que o compõem. No PERH-RS as águas subterrâneas receberam devido destaque e, ao contrário da visão generalista e qualitativa de planos anteriores, tiveram suas reservas reguladoras mensuradas, em escala de bacia, com base em estimativas de recarga.

Neste contexto, a estimativa da recarga aquífera é um fator determinante em planos regionais e estudos hidrogeológicos e no gerenciamento do uso de água subterrânea, tendo em vista a sustentabilidade, a longo prazo, da quantidade e da qualidade da água dos aquíferos (BERTOL, 2007).

Sendo assim, reconhecendo a importância da recarga, este trabalho consiste na aplicação de um método específico de estimativa das mesmas a partir de medidas de nível de água subterrânea em poços de monitoramento na bacia do Ibicuí, no RS. Esta bacia caracteriza-se por possuir extensas manchas com arcabouço geológico formado por rochas pertencentes ao Sistema Aquífero Guarani (SAG). A presença do SAG aflorante, semi-confinado e confinado na bacia estabelece esta região como sendo de expressiva disponibilidade hídrica subterrânea.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Gerais

O objetivo geral deste trabalho é realizar estimativas da recarga subterrânea do SAG na região da bacia do rio Ibicuí.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Discutir e avaliar a utilização da metodologia variação dos níveis d'água (VNA) para estimar recargas subterrâneas;
- Caracterizar o SAG do ponto de vista hidrogeológico na bacia do Ibicuí, analisando-se o comportamento dos seus níveis freáticos (piezogramas);
- Comparar e discutir os resultados de recarga obtidos a partir do método VNA com o regime pluviométrico na região da bacia do Ibicuí;
- Realizar comparações e discussões dos resultados de recarga obtidos a partir do método utilizado à luz de resultados de outro método, aplicado na mesma região.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Demanda e uso de água subterrânea

Os recursos hídricos, que compreendem águas superficiais e subterrâneas, são essenciais para a vida. Do total de água doce presente no planeta, cerca de 30,2 % corresponde a águas subterrâneas e águas de rios e lagos (SHIKLOMANOV, 1998). As águas subterrâneas englobam 96,3 % do total dos recursos hídricos, enquanto que 2,7 % correspondem às águas presente em lagos, 0,8% corresponde à umidade do solo e apenas 0,01% correspondem à águas doces superficiais (SEILER; GAT, 2007).

Ao longo do século 20, a demanda de água aumentou significativamente devido ao crescimento da população, gerando inúmeros problemas sociais, ambientais e econômicos. Estima-se que aproximadamente 40% da população mundial utiliza a água subterrânea para abastecimento humano, e que cerca de 50% da produção de alimentos mundial depende da água subterrânea para irrigação (SEILER; GAT, 2007).

O crescente aumento do uso da água subterrânea se deve em parte ao melhoramento das técnicas de construção de poços e da evolução dos métodos de bombeamento. Desta maneira, tornou-se possível a extração de água em volumes e profundidades cada vez maiores, possibilitando o suprimento de água a cidades, indústrias, projetos de irrigação, entre outros (BORGHETTI et al., 2004).

No Brasil, segundo o Censo de 2000 (IBGE, 2000), aproximadamente 61% da população brasileira é abastecida, para fins domésticos, com água subterrânea. Elas suprem as mais variadas necessidades de água em diversas cidades e comunidades, bem como em sistemas autônomos residenciais, industriais, serviços, irrigação agrícola e lazer, além de ter um papel ecológico fundamental (HIRATA et al., 2010). Apesar desta ampla utilização, o uso deste recurso não é eficiente, o consumo excessivo e o alto grau de desperdício colocam em risco a disponibilidade de água doce em várias regiões do país.

No estado do Rio Grande do Sul o uso dos mananciais subterrâneos para abastecimento público é superior ao uso de mananciais superficiais, sendo 59% dos municípios abastecidos exclusivamente por águas subterrâneas, além de outros 13% que são abastecidos de forma mista, ou seja, por mananciais superficiais e subterrâneos (ANA, 2010).

2.2 Gestão e monitoramento das águas subterrâneas

O aumento considerável das demandas de água e as desarticulações do serviço básico de saneamento levam a buscas desenfreadas por alternativas de água subterrânea, gerando problemas como superexploração de aquíferos e contaminação. No Brasil, são inúmeras as ameaças impostas aos aquíferos, muitas delas decorrentes da falta de uma política ambiental efetiva e/ou de uma articulação setorial desta com as demais. A realização de estudos e planejamentos baseados em um sistema de gestão efetivo é essencial para evitar danos às águas subterrâneas.

Na Resolução nº 22/2002 do CNRH consta, dentre outros aspectos, a necessidade da estimativa das recargas e descargas de aquíferos e das reservas permanentes exploráveis. Estabelece ainda que os planos de recursos hídricos devem abranger o monitoramento da quantidade e qualidade dos aquíferos. A avaliação do comportamento do aquífero através de seu monitoramento, principalmente nas áreas de afloramento, fornece dados importantes para sua conservação e subsídios aos projetos de proteção ambiental e desenvolvimento sustentável, assegurando a qualidade e a quantidade de seu manancial para as futuras gerações (OAS/GEF, 2001).

Dentre as redes de monitoramento de águas subterrâneas no Brasil destaca-se a RIMAS (rede integrada de monitoramento das águas subterrâneas), operada e mantida pela CPRM. A RIMAS é uma rede de monitoramento quantitativa, baseada na construção de poços de monitoramento equipados, que tem o propósito de registrar as variações horárias do nível de água subterrânea. A partir destas medidas, torna-se possível identificar impactos nas águas subterrâneas em decorrência do uso ou das formas de uso e ocupação do solo, além da disponibilidade do recurso hídrico subterrâneo.

No PERH-RS (2006), as disponibilidades hídricas subterrâneas foram representadas, em escala de bacias hidrográficas, através de suas respectivas reservas reguladoras, as quais foram consideradas como o somatório das recargas. A estimativa das recargas aquíferas, portanto, cada vez mais vem se tornando indispensável para uma gestão eficiente e sustentável dos recursos hídricos.

2.3 Recarga aquífera e reservas reguladoras

A exploração da água subterrânea está condicionada a fatores econômicos, qualitativos e quantitativos. Os fatores quantitativos estão relacionadas a condutividade

hidráulica e ao coeficiente de armazenamento dos aquíferos, e conseqüentemente, às diferentes taxas de recarga dos aquíferos (LEAL, 1999).

A recarga, de forma geral, consiste na quantidade de água que contribui para aumentar a reserva subterrânea permanente ou temporária do aquífero. O processo de recarga subterrânea ocorre pelo movimento da água que atinge a zona não saturada do aquífero sob forças gravitacionais, ou em direção específica por condicionamento hidráulico (VASCONCELOS, 2005). Alguns fatores que interferem nesse processo são: (i) a condutividade hidráulica vertical do meio, (ii) a transmissividade do aquífero e (iii) a capacidade de infiltração de água no solo (POEHLS; SMITH, 2009).

A recarga de aquíferos pode ocorrer naturalmente pela precipitação, infiltração de rios, canais e lagos, fluxos inter-aquíferos e via fenômenos induzidos por atividades humanas, como a irrigação e a urbanização (LERNER, 1990, apud MARTELLI, 2012), sendo que a precipitação é a mais importante fonte de recarga. Lerner et al. (1999 apud GOMES, 2008) apresentam diversos estudos, nos quais verificou-se estimativas de recarga natural compreendidas na faixa entre 5% a 25% da precipitação. Moon et al. (2004 apud Gomes, 2008) afirmam que, geralmente, o nível d'água subterrânea flutua de acordo com as características dos eventos de precipitação (quantidade, duração e intensidade) e de outras variáveis hidrogeológicas (topografia, espessura da zona não saturada e composição dos materiais da formação). Healy e Cook (2002) citam que as taxas de recarga variam dentro de uma bacia devido a diferenças nestas variáveis hidrogeológicas.

A infiltração de água no solo refere-se a passagem de água através de sua superfície. Segundo Feitosa e Filho (2000), a água infiltrada no solo pode ser dividida em três partes: (i) água retida na zona não saturada; (ii) água na zona de interfluxo (escoamento superficial); e (iii) água que percola até o nível freático, constituindo a recarga ou recursos renováveis dos aquíferos. Assim sendo, o termo denominado de infiltração equivale a uma recarga dita como potencial, a qual, mantido o deslocamento vertical até a interceptação com a zona freática, pode se tornar recarga aquífera de fato (HEALY, 2010).

Segundo Paralta et al. (2003), os estudos de recarga aquífera são fundamentais para a determinação do volume de recursos hídricos subterrâneos anualmente renováveis e têm implicações diretas no planejamento e gestão integrada dos recursos hídricos regionais. A partir da estimativa de recarga aquífera e do volume de água infiltrada em um aquífero pode-se estimar a reserva reguladora. A reserva reguladora (ou renovável) é definida como o volume de água da zona de flutuação (anual ou sazonal) no nível de saturação, e

corresponde ao volume de água que adentra por recarga a partir da superfície ou drenagem a partir de outro corpo d'água (ANA, 2010).

Sob condições naturais, entende-se que apenas uma parcela dessas reservas reguladoras é passível de exploração, constituindo o potencial ou reserva explotável. Esse volume de exploração pode aumentar em função das condições de ocorrência de recarga, bem como dos meios técnicos e financeiros disponíveis, considerando que a soma das extrações com as descargas naturais do aquífero para rios e oceano, não pode ser superior à recarga natural do aquífero (FEITOSA; FILHO, 2000). Em certos casos, é possível decidir-se pela opção de extrair uma maior proporção das reservas reguladoras, entretanto, esta decisão gera impactos, dos quais é preciso que se esteja ciente.

Os métodos utilizados para a avaliação da recarga produzem estimativas em várias escalas de tempo e espaço e englobam uma larga faixa de complexidade e extensão (PINTO et al., 2010).

A seguir serão descritos diferentes métodos de estimativa de recarga aquífera.

2.4 Métodos de estimativa de recarga

Existem diversos métodos para estimativa de recarga, e a escolha do melhor método deve-se basear não apenas nos dados disponíveis e nas características da área, mas também nas escalas temporais e espaciais. Scanlon et al. (2002) organizam as técnicas de estimativa de recarga com base em três diferentes zonas do solo, de acordo com a fonte em que os dados são obtidos: zonas superficial, insaturada e saturada. Para cada zona as técnicas são classificadas em físicas, químicas ou modelos numéricos.

Diversos destes métodos são baseados na relação de balanço hídrico, que consiste na aplicação do princípio da conservação de massa. Durante o período de tempo analisado, a diferença entre o total de entradas e saídas deve ser igual à mudança da quantidade de água armazenada, sendo, portanto, necessário conhecer cada um dos fatores para a determinação da recarga (WAHNFRIED; HIRATA, 2005). Estas variáveis são baseadas em processos físicos que controlam o conteúdo volumétrico de um dado volume de solo durante um dado período de tempo (EILERS, 2004).

A técnica de traçadores tem uma larga variedade de usos nos estudos hidrológicos, entre eles estimativa de recarga quantitativa ou qualitativa. O uso de traçadores permite as estimativas de recarga ao longo de maiores intervalos de tempo, contudo, apresentam a desvantagem de não permitir a obtenção de informações sobre a variação da recarga ao longo do processo (RABELO, 2006). Os traçadores são geralmente íons, isótopos, ou gases

que se movem para o interior da água e podem ser detectados na atmosfera, em águas superficiais ou na sub-superfície (HEALY, 2010). Scanlon et al. (2002) agruparam os traçadores em três categorias, que são: (i) traçadores ambientais, que são transportados ou criados na atmosfera através de processos naturais, estando entre os mais usados o Cloro (Cl); (ii) traçadores históricos, que são elementos que foram largamente introduzidos na atmosfera pela atividade humana, entre eles gases elementos advindos de processos nucleares e outros advindos de atividades industriais (CFCs, SF₆); e (iii) traçadores artificiais, que são aplicados diretamente na superfície como resultado de uma atividade humana.

Dentre os métodos numéricos encontram-se aqueles baseados na Lei de Darcy. A Lei de Darcy é usada para calcular o fluxo de água através de uma seção do aquífero livre ou confinado. O método assume fluxo constante e ausência de extração de água. O fluxo na zona saturada é calculado multiplicando-se a condutividade hidráulica pelo gradiente hidráulico. A vazão através de uma seção do aquífero é igual à taxa de recarga multiplicada pela área da superfície que contribui para o fluxo (WAHNFRIED; HIRATA, 2005). O método é fácil de usar quando existem dados sobre o gradiente hidráulico e condutividade hidráulica, porém tem um alto grau de incerteza devido à grande variabilidade desta última (SCANLON et al., 2002).

Metódos baseados na separação do escoamento de base utilizam dados de séries históricas de vazão para determinar as parcelas direta e indireta do escoamento, a partir da análise do hidrograma e da aplicação de filtros numéricos. Estes filtros são algoritmos que calculam a separação do escoamento a partir de dados de vazão. Mattiuzi (2013) estimou as taxas de recarga aquífera na bacia hidrográfica do rio Ibicui (RS) pelo método de separação de escoamento de base, utilizando a metodologia aplicada em Collischonn e Fan (2012).

As técnicas baseadas na leitura de níveis d'água em poços estão entre os métodos mais aplicados na determinação da recarga. Isto ocorre devido a facilidade em se estimar a recarga através das variações temporais ou padrões espaciais de leituras dos níveis freáticos (HEALY; COOK, 2002).

Dentre os métodos físicos da zona saturada insere-se o método da variação do nível de água (VNA) ou, em inglês, water-table-fluctuation (WTF), que utiliza flutuações de níveis de água subterrânea ao longo do tempo para estimar recarga em aquíferos livres (HEALY, 2010). Este método é baseado na premissa que as elevações nos níveis de água

subterrânea em aquíferos livres ocorrem devido a recarga aquífera que chega na superfície piezométrica. Healy e Cook apresentam a Equação (1):

$$R = S_y \cdot \frac{dh}{dt} = S_y \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (1)$$

Em que:

R = recarga;

Sy = rendimento específico;

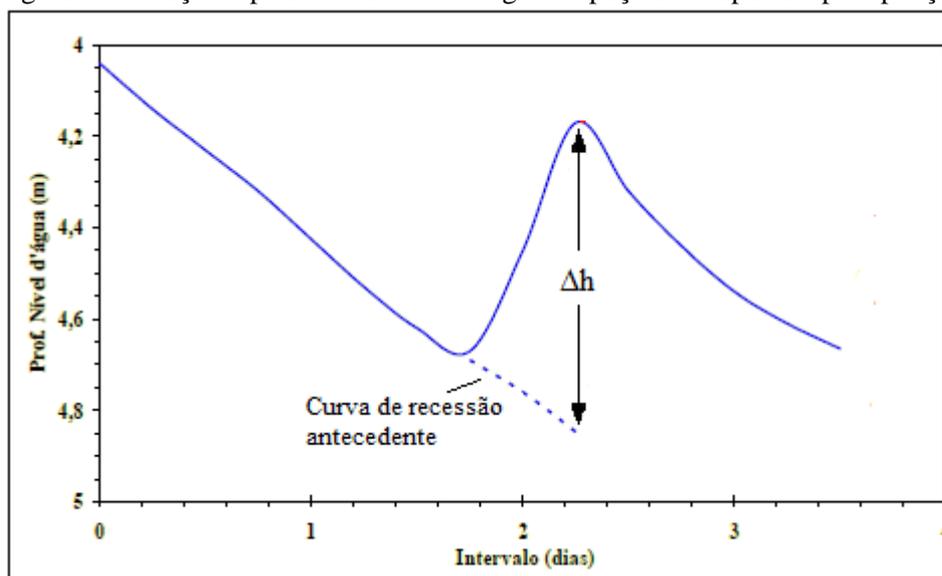
h = altura do nível d'água;

t = tempo.

A Equação (1) assume que a água que atinge o nível freático entra imediatamente em armazenamento e que todos os outros componentes do balanço hídrico subterrâneo (evapotranspiração subterrânea, fluxo de base, entrada e saída de fluxo sub-superficial) são nulos durante o período de recarga.

Conforme Healy (2010), com a aplicação da Equação (1) teremos que para cada elevação individual de nível será gerada uma estimativa de recarga. Para determinar a recarga total, Δh é considerado igual à diferença entre o pico de subida e ponto mais baixo da curva de recessão antecedente extrapolada até o instante do pico (Figura 1). A curva de recessão antecedente é o traço que o hidrograma do poço teria seguido na ausência de elevação do nível d'água (HEALY, 2002, 2010).

Figura 1: Elevação hipotética no nível de água do poço em resposta à precipitação



Fonte: Adaptado de Maziero e Wendland (2005)

Um parâmetro necessário para estimativa da recarga pelo método VNA e que deve ser estimado é o rendimento específico Sy. O rendimento específico de um solo (ou rocha)

pode ser definido como a proporção do volume d'água que, depois de saturado, é drenado por gravidade com relação ao seu próprio volume (MAZIERO; WENDLAND, 2005). Healy e Cook (2002, 2010), assim como outros autores, apresentam a seguinte fórmula (Equação 2):

$$S_y = n - S_r \quad (2)$$

Em que:

S_y = rendimento específico;

n = porosidade total;

S_r = retenção específica.

O Glossário de Termos Hidrológicos (ANA) considera sinônimos os termos porosidade efetiva (n_e) e rendimento específico (S_y). Feitosa e Filho (2000), assim como outros autores, também citam o rendimento específico como sendo a razão entre o volume de água efetivamente liberado de uma amostra de rocha porosa saturada e seu volume total (Equação 3) e utilizam os termos porosidade efetiva ou porosidade específica.

$$n_e = \frac{V_d}{V} \quad (3)$$

Em que:

n_e = porosidade efetiva;

V_d = volume de água drenado por gravidade;

V = volume total.

Para os fins deste trabalho, será utilizada a expressão de rendimento específico, pois está já é atualmente associada a métodos de estimativa de recarga. Gomes (2008) afirma que este parâmetro possui grande relevância na variação do nível d'água e nos modelos matemáticos de águas subterrâneas, sendo a precisão de seu cálculo refletida nas incertezas dos resultados obtidos.

Existem várias maneiras de se determinar o rendimento específico, sendo que algumas delas são citadas em Healy e Cook (2002). Pode-se determinar em laboratórios, a partir de ensaios de drenagem de coluna de solo, coletado em amostras de campo. Outra maneira é através da perfilagem geofísica de poços que, através da aplicação de diferentes sondas (Gama e Sônica), permitem avaliar a quantidade de argila e a porosidade das diferentes formações geológicas. Outra forma de determinação, bastante utilizada, é baseada na interpretação de ensaios de bombeamento (teste de aquífero ou *Aquifer Test*) realizados em poços de bombeamento e de monitoramento. Os dados dos testes

(rebaixamento pelo tempo) podem ser utilizados para elaboração de gráficos de rebaixamento e para o cálculo do parâmetro denominado de coeficiente de armazenamento, que, para aquíferos livres, pode ser considerado como igual ao rendimento específico.

Métodos para estimar recarga são associados com escalas temporais assim como também escalas espaciais. Alguns métodos, como o VNA, podem prover estimativas de recarga pra cada evento individual de precipitação (HEALY, 2010), sendo esta considerada a recarga total ou "bruta". A Equação (1) também pode ser aplicada em intervalos de tempo maiores, que podem variar de dias a anos, sendo então referida como recarga "líquida" (HEALY; COOK, 2002, citado em WAHNFRIED; HIRATA, 2005 e PINTO et al., 2010). A diferença entre a recarga total e a líquida é citada por Healy e Cook (2002) como sendo a soma da evapotranspiração, escoamento de base, e fluxo sub-superficial.

A maior vantagem da avaliação da recarga por VNA é sua simplicidade. Não é necessário levar em conta os mecanismos de transporte que regem a passagem de água na zona não saturada, o que permite desconsiderar, por exemplo, a existência de caminhos preferenciais de fluxo (HEALY; COOK, 2002, citado em PINTO et al., 2010).

O nível medido em um poço é representativo para uma área de pelo menos algumas dezenas de metros quadrados à sua volta (HEALY; COOK, 2002). O método VNA pode ser utilizado para estimar a taxa de recarga em grandes áreas, desde que os níveis freáticos apresentem súbitas elevações e declínios de níveis d'água, o que é mais comum em aquíferos rasos e regiões com elevados índices de precipitação (COELHO et al., 2012). A seguir serão abordados alguns estudos que aplicaram o método VNA.

Wahnfried e Hirata (2005) aplicaram os métodos variação do nível d'água (VNA), balanço hídrico e estimativa darcyniana em uma planície aluvionar da Bacia do Alto Tietê em São Paulo, utilizando seis poços (multi-níveis e simples) no campus da Universidade de São Paulo, e dados de nível de água entre setembro de 2003 e janeiro de 2004. Neste estudo, concluiu-se que o método VNA é o mais sensível dos três métodos analisados para registrar recarga, quando há a possibilidade de implantação de uma boa rede de monitoramento em locais com nível de água (NA) representativo da área. Também é citado que, em um período de um ano, as variações de nível de água podem ocorrer devido a sazonalidade da evapotranspiração e precipitação. O cálculo do método VNA foi realizado de duas formas: (i) levando-se em conta as variações do NA para cada evento forte de precipitação, e (ii) variações mensais, sendo encontrados valores de 282 mm para a recarga episódica e 187 mm para a recarga mensal, no período entre setembro de 2003 e janeiro de 2004.

Maziero e Wendland (2005) estimaram a recarga utilizando medidas em intervalos semanais, entre fevereiro de 2004 e janeiro de 2005, nas sub-bacias Gregório e do Tijucu Preto (São Carlos, SP). Foi encontrado um valor médio de recarga total de 261,7 mm/ano, representando 16,39 % do total registrado de chuvas no ano hidrológico.

Delin et al. (2006) aplicaram quatro métodos de estimativa de recarga para calibrar o modelo RRR (*Recharge Regression Regional*) em uma região semiúmida do estado de Minnesota, nos Estados Unidos, que representaram diferentes escalas espaciais e temporais. Comparando-se os métodos, o VNA foi considerado por eles como o método mais simples e fácil de ser aplicado, desde que os dados das flutuações estejam disponíveis. Os valores encontrados a partir deste método apresentaram boa convergência quando comparados com os outros métodos utilizados.

Gomes (2008) diferenciou em seu estudo a recarga direta e indireta, apresentando a recarga direta como sendo a parcela da precipitação que atravessa a zona não saturada e soma-se a reserva subterrânea (Citado em Lerner et al., 1990). Nesse trabalho foi efetuado o cálculo da recarga direta em 9 poços de monitoramento aplicando o método VNA em dados mensais de flutuação, para 3 anos de monitoramento, na bacia do Ribeirão da Onça (São Paulo), encontrando-se valores entre 14 % e 38 % das respectivas precipitações.

Pinto et al. (2010) aplicaram o método VNA em uma sub-bacia na bacia representativa de Juatuba (Belo Horizonte), utilizando dados de medição diária de nível d'água, advindos do monitoramento da sub-bacia entre outubro de 2008 e setembro de 2009. Neste trabalho foi encontrado um valor de recarga total ou "bruta" de 35,2 % da precipitação sobre a bacia, similar ao resultado obtido por Mourão (2007) para bacias com características semelhantes.

Coelho et al. (2012) realizaram o monitoramento do nível estático de 23 poços na região do aquífero livre da bacia representativa do rio Gramame, situada no litoral do estado da Paraíba, para o ano hidrológico de novembro de 2009 a outubro de 2010. Os autores encontraram três tipos de flutuações dos níveis nos poços, cuja influência devia-se principalmente à espessura da camada não saturada do solo, topografia e precipitação. Aplicando-se o método VNA para estimativa da recarga direta neste aquífero, encontrou-se um valor baixo para a recarga e um valor de armazenamento subterrâneo negativo, fato decorrente do baixo índice pluviométrico anual na região para o período estudado. A recarga direta calculada para a bacia durante o ano hidrológico do monitoramento (2009/2010) foi de 73,8 mm, o que representou 7,2% da precipitação média (1026 mm) da região para este ano hidrológico.

Neste trabalho decidiu-se pela utilização do método VNA devido principalmente à disponibilidade de dados de variações de níveis de água em poços de monitoramento, mas também em função da sua simplicidade analítica. A descrição detalhada da aplicação deste método no Sistema Aquífero Guarani (SAG), em parte da bacia do rio Ibicuí (RS), será apresentada no capítulo 3 (Metodologia).

2.5 Caracterização do Sistema Aquífero Guarani (SAG)

Este capítulo abordará a caracterização do Sistema Aquífero Guarani (SAG) no estado do Rio Grande do Sul. Ressalta-se que a sigla SAG será utilizada daqui em diante para referir-se ao sistema aquífero.

2.5.1 Localização e Extensão

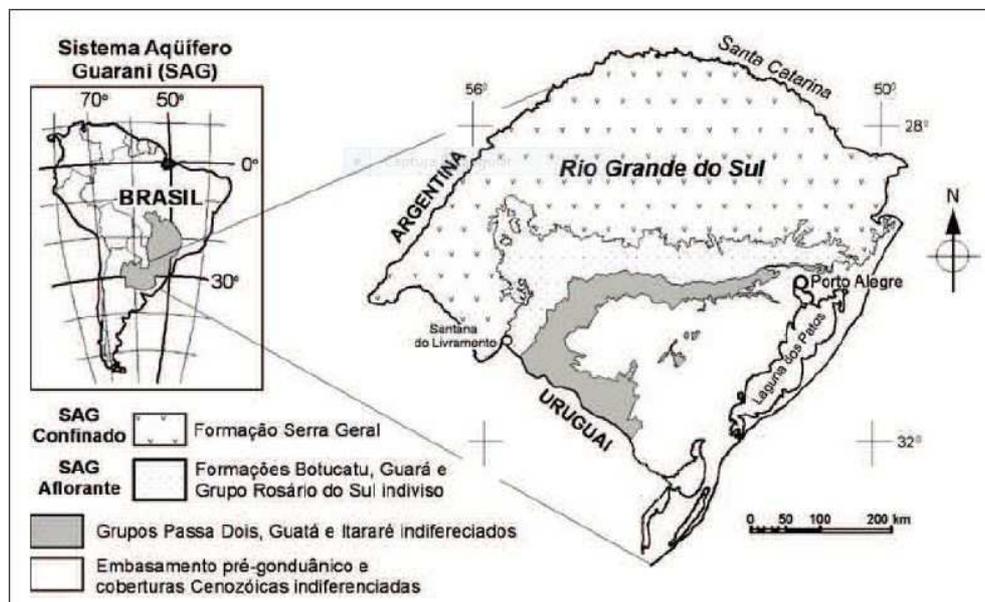
O SAG possui uma área de aproximadamente 1,2 milhões de km² e está inserido na Bacia Sedimentar do Paraná, abrangendo parte do Brasil, Paraguai, Uruguai e Argentina (OEA, 2001). Segundo a OEA (2009), o Brasil tem cerca de 8,7 % (839.800 km²) da superfície total do seu território ocupada pelas rochas sedimentares pertencentes ao SAG. As zonas de afloramento constituem cerca de 10,4 % da superfície total do aquífero, ou seja, 124.650 km², sendo que 64 % representam áreas de recarga (OEA, 2009).

No Rio Grande do Sul o SAG ocupa uma área de 157.600 km², sendo a área de recarga correspondente a 13,6% desta área total, ou seja, 21.649 km² (ANA, 2005). A zona de afloramento do SAG no estado encontra-se distribuída ao longo de uma faixa delgada de leste a oeste, com inflexão para o sul até a divisa com o Uruguai. Essa faixa encontra-se inserida nas coordenadas 28°30' e 30°30' de Latitude Sul e 50°20' e 55°40' de Longitude Oeste (EMBRAPA, 2006).

O SAG é caracterizado por aquíferos que estão associados a diferentes rochas sedimentares (unidades hidroestratigráficas) e que podem ser classificados em livres, semi-confinados e confinados. Segundo a OEA (2009), o SAG está associado ao conjunto de rochas formadas por sedimentos originados da acumulação mecânica de partículas detríticas (partículas produzidas pela decomposição de rochas e denominadas de “siliclastos” – cascalho, areia, silte e argila) da Bacia do Paraná (Brasil e Paraguai), Bacia Chacoparanaense (Argentina) e Bacia Norte (Uruguai). No estado do Rio Grande do Sul, o SAG está associado as rochas sedimentares das Formações Botucatu, Guará e Formações do Grupo Rosário do Sul (Figura 2). Na área de afloramento destas rochas, correspondentes a 10% da área total, o aquífero é do tipo livre e, nas áreas onde essas

rochas são recobertas pelas rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, esse aquífero pode ser caracterizado como semi-confinado a confinado.

Figura 2: Sistema Aquífero Guarani no estado do Rio Grande do Sul



Fonte: Machado, 2005

O SAG aflora na região correspondente à depressão central do Rio Grande do Sul, entre os municípios de Santana do Livramento à oeste e Santo Antônio da Patrulha à leste. Ele é constituído por nove unidades hidroestratigráficas: Botucatu, Guará, Arenito Mata, Caturrita, Alemoa, Passo das Tropas 1 e 2, Sanga do Cabral e Piramboia (CPRM, 2005). As principais unidades hidroestratigráficas que ocorrem na região da bacia do rio Ibicuí são Sanga do Cabral, Piramboia e Guará.

A Unidade Hidroestratigráfica Botucatu compreende todos os afloramentos contínuos de Arenito Botucatu ao longo do contato com o Grupo Rosário do Sul, estendendo-se abaixo dos derrames da Formação Serra Geral. É constituída basicamente por arenitos finos a médios, quartzosos e localmente feldspáticos, bem selecionados com cores em tons avermelhados, subordinadamente amarelados (MACHADO, 2005).

A Unidade Hidroestratigráfica Sanga do Cabral (anteriormente denominada de formação Rosário do Sul) é constituída por uma sequência composta predominantemente de arenitos finos a muito finos de origem fluvial, e ocorre nos compartimentos Central-Missões e Oeste. A água é adequada ao abastecimento público e uso geral (MACHADO, 2005).

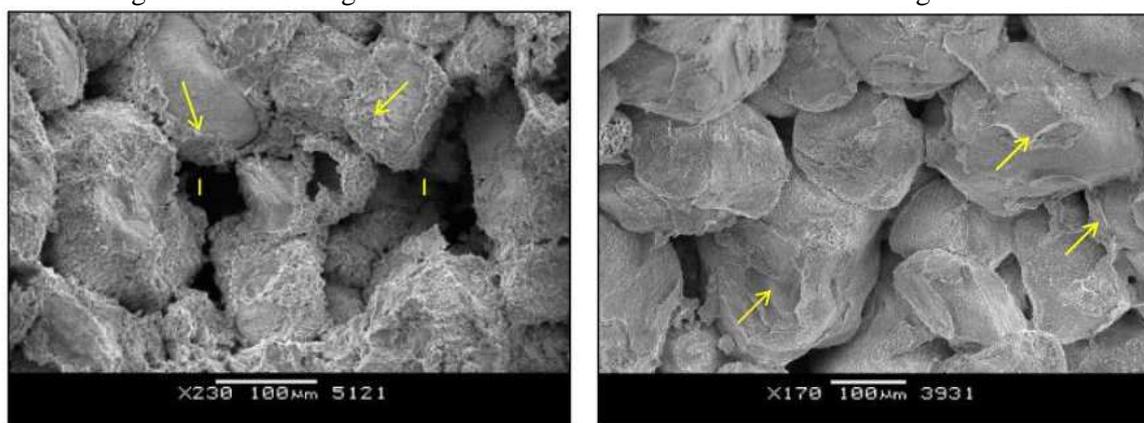
A Unidade Hidroestratigráfica Piramboia possui uma ampla distribuição nas áreas onde o SAG aflora, apresentando variadas produtividades nos aquíferos. O tipo

geoquímico predominante para as águas de baixa salinidade é o bicarbonatado cálcico ou misto. As águas bicarbonatadas geralmente não possuem problemas de potabilidade, podendo ser empregadas também na indústria e na irrigação (MACHADO, 2005).

A Unidade Hidroestratigráfica Guará localiza-se na região da fronteira oeste do RS, e trata-se de um espesso pacote sedimentar fluvio-eólico que ocorre na base dos arenitos eólicos da Unidade Hidroestratigráfica Botucatu (MACHADO, 2005).

Na Figura 3 tem-se duas microfotografias, correspondentes as unidades hidroestratigráficas Botucatu e Sanga do Cabral, e que representam bem a porosidade destas unidades.

Figura 3: Microfotografias dos arenitos nas unidades Botucatu e Sanga do Cabral



Fonte: Aguirre et al., 2008 - Síntesis Sistema Acuífero Guarani.

Na imagem referente a Botucatu, percebe-se o domínio de poros intergranulares. Na flecha estão indicados recobrimentos de esmectita, que cobrem os poros indicando baixa interconexão entre os mesmos, resultando em uma baixa permeabilidade. A porosidade varia entre 15,2 % a 34,7 % para as Formações Botucatu e Piramboia, no Brasil. Na imagem referente a Sanga do Cabral, pode-se observar os arenitos com porosidade excelente, dominada por poros intergranulares. Os recobrimentos argilosos são indicados pela flecha. A porosidade, para o estado do Rio Grande do Sul, apresenta valores entre 16 % e 32,9 %. (Síntesis Sistema Acuífero Guarani, 2008).

2.5.2 Estimativa de recarga

No estado do Rio Grande do Sul, a determinação da estimativa da recarga ainda é considerado um assunto recente, embora trabalhos relacionados a este tema estejam em voga. Gómez et al (2010) construíram um modelo de fluxo subterrâneo para estimar a recarga nos basaltos e arenitos aflorantes do SAG, na fronteira Brasil - Uruguai, e acharam valores consistentes com determinações prévias de outros autores.

Dambrós (2011) buscou estimar a recarga subterrânea e analisar a flutuação de nível da água em relação a eventos de precipitação, em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani, no município de Rosário do Sul (RS), utilizando o método VNA. Concluiu-se que o método demonstra fácil aplicabilidade, e que foram alcançados resultados satisfatórios. O método foi aplicado em duas sub-bacias hidrográficas, sendo uma de campo nativo e outra com florestamento de eucaliptos, e instalou-se cinco poços de monitoramento, com período de monitoramento de dois anos hidrológicos. Os resultados encontrados de recarga subterrânea estimada pelo total da precipitação no período foram de 3,5 % para a sub-bacia hidrográfica de campo e 4,2 % para sub-bacia hidrográfica florestada.

Martelli (2012) estimou a recarga efetiva das águas subterrâneas em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani em Cacequi (RS) utilizando o método VNA e encontrou resultados considerados satisfatórios. A recarga efetiva estimada na área com exploração superficial representou entre 11,5 % e 13,9 % da precipitação (1572 mm) ocorrida durante o período hidrológico de 386 dias, enquanto que a recarga efetiva estimada na área com exploração subterrânea representou cerca de 25% da precipitação (778,1 mm) ocorrida durante em um período hidrológico de 243 dias.

Silva e Farias (2013) realizaram uma estimativa de recarga subterrânea na microbacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim, no município de Itaara (RS), localizada na zona de afloramento do SAG, utilizando o método VNA. Neste trabalho identificou-se um balanço hídrico positivo, indicativo da existência de fluxo vertical em aquífero poroso intergranular a partir de precipitações atmosféricas. Foram utilizados os dados de um poço de monitoramento e encontrou-se recarga subterrânea de 833 mm para um período de 431 dias (período de 27/03/2010 a 31/05/2011).

Mattiuzi (2013) estimou taxas de recarga aquífera para a bacia hidrográfica do rio Ibicuí (RS) utilizando o método de separação do escoamento de base. Foram calculados, entre outros parâmetros, as porcentagens de recarga com relação à precipitação total (TR/P) e as porcentagens de recarga com relação à precipitação efetiva, sendo esta a precipitação total subtraída a evaporação (TR/Pefe). Sendo assim, foram encontrados valores de TR/P entre 13 % e 47 %, com média de 27 %, e valores de TR/Pefe entre 5 % e 21 %, com média de 11,6 %.

Os estudos de recarga aquífera nas áreas de afloramento são prioritárias para a correta gestão do SAG, porque são áreas onde a água da chuva atinge a superfície do solo, se infiltra, atravessa a zona não saturada e recarrega diretamente o aquífero (IPT, 2011).

Além disto, as áreas onde o aquífero se apresenta livre são mais vulneráveis a contaminação. Sendo assim, estudos que buscam estimar a recarga nestas áreas de afloramento são importantes para o manejo sustentável do SAG, fato que, por exemplo, levou a Agência Nacional de Águas a desenvolver estudo específico nas faixas de afloramento do SAG em território nacional. Os resultados deste estudo estarão disponíveis a partir do segundo semestre de 2014, motivo pelo qual não serão abordados neste trabalho.

3. METODOLOGIA

3.1 Escolha da área de estudo

A área de estudo corresponde à bacia do rio Ibicuí no RS. As motivações desta escolha dizem respeito à disponibilidade de dados de níveis de água subterrânea registrados a partir de poços de monitoramento pertencentes ao Projeto Rimas (CPRM). A bacia do Ibicuí trata-se de uma região de grande importância hidrogeológica para o RS pois alberga expressiva disponibilidade hídrica subterrânea devido à existência de SAG aflorante, semi-confinado e confinado. Além disto, esta mesma região possui bons e relevantes estudos dos quais se pode extrair informações hidrogeológicas, enriquecendo as discussões e comparações. A localização exata da área e sua descrição detalhada serão apresentadas nos Resultados.

3.2 Levantamento dos dados e mapas gerados

As caracterizações hidrogeológicas e geológicas basearam-se em trabalhos e estudos existentes realizados na região, basicamente gerados pelos projetos institucionais da CPRM (como por exemplo o Mapa Hidrogeológico elaborado pela CPRM em 2005) e resultados do Projeto para a Proteção e Uso Sustentável do Sistema Aquífero Guarani (Banco Mundial, Organização dos Estados Americanos - Argentina/ Brasil/ Paraguai/ Uruguai, 2009).

Todos os mapas gerados neste trabalho foram feitos com o software ArcGis 10.0, utilizando-se shapefiles e imagens raster de diferentes fontes e o sistema de coordenadas Sirgas 2000.

3.3 Caracterização do Sistema Aquífero Guarani na área de estudo

Inicialmente, fez-se o levantamento de poços tubulares no estado do RS consultando o SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas), operado e mantido pela CPRM. Dentre os poços levantados, foram identificados aqueles pertencentes à rede RIMAS, ou seja, aqueles poços que são utilizados de forma dedicada e exclusiva ao monitoramento da flutuação do nível de água. Entre estes poços da RIMAS buscou-se os que fossem localizados dentro da bacia do Ibicuí, pertencentes a aquíferos livres, e que tivessem no mínimo um ano de dados de monitoramento. Dentre estes poços, selecionou-se

então alguns que apresentaram início de monitoramento em 2010, e outros com início de monitoramento em 2011.

Após a escolha dos poços buscou-se o levantamento das fichas cadastrais junto aos SIAGAS, as quais contêm os perfis construtivos dos poços, além de dados geológicos e hidrogeológicos da área onde estão localizados. A consulta a estas fichas cadastrais foi realizada na data de 19/05/2014, portanto qualquer possível alteração após esta data não foi abordada. A partir destas fichas e de trabalhos e relatórios realizados na bacia do Ibicuí, foi realizada então a caracterização detalhada do SAG na área de estudo. A caracterização envolveu a avaliação das unidades hidroestratigráficas captadas pelos poços, características gerais do aquífero como espessura e parâmetros hidrodinâmicos, e avaliação dos perfis construtivos.

3.4 Caracterização pluviométrica da área

A escolha das estações pluviométricas para serem utilizadas neste estudo foi realizada de acordo com sua proximidade em relação aos poços de monitoramento, assim como a disponibilidade de dados nos anos abordados no estudo. Os dados de precipitação foram selecionados no site da ANA, através do Portal Hidroweb, e se compõe apenas de dados brutos, uma vez que os dados só se encontram consistidos até o ano de 2006. Os dados utilizados foram referentes ao somatório das precipitações mensais. Com as coordenadas geográficas dos postos pluviométricos escolhidos para o estudo, gerou-se um mapa com a localização das estações utilizadas neste trabalho, cujos dados foram posteriormente utilizados para comparação da precipitação com a recarga aquífera. Foi também feita uma caracterização da precipitação na área utilizando-se ferramentas do ArcMap, no programa ArcGis. Utilizou-se como base para esta caracterização a imagem raster da precipitação, e também a shapefile de Isoietas Médias Anuais do projeto Atlas Pluviométrico (CPRM), para então gerar-se um mapa com a distribuição da precipitação na bacia do Ibicuí.

3.5 Uso do método VNA para obtenção de estimativas de recarga

3.5.1 Determinação do rendimento específico

No cálculo do rendimento específico, buscou-se inicialmente a utilização dos dados dos ensaios de bombeamento dos poços (Teste de Aquífero - *Aquifer Test*), cuja descrição do método encontra-se na Revisão Bibliográfica (item 2.4). Entretanto, os ensaios nos

poços de monitoramento na sua maioria foram realizados somente no poço de bombeamento sem a existência de poço de observação, fato que, por definição, impossibilita o cômputo do termo de armazenamento. Desta maneira, buscou-se então dados da literatura correspondentes ao mesmo aquífero e as mesmas unidades hidroestratigráficas dos poços selecionados para o estudo.

Dentre as primeiras estimativas das reservas do SAG em território brasileiro tem-se a de Rebouças et al. (1976 apud ANA, 2005), em que foi utilizado um valor de porosidade específica (rendimento específico) de 20%. Já Rocha (1997, apud ANA, 2005) apresentou uma avaliação para toda a área do SAG, abrangendo Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai, utilizando um valor de porosidade específica de 15%.

Para o Projeto Aquífero Guarani, executado pela Organização dos Estados Americanos (OEA, 2009), também calculou-se as reservas e considerou-se no cálculo, para os arenitos constituintes do SAG, um valor de porosidade efetiva entre 15% +/- 2%.

Martelli (2012) realizou um estudo na microrregião de Santa Maria (entre as bacias do rio Ibicuí e do rio Santa Maria), na cidade de Cacequi (RS). Esse autor determinou os valores de rendimento específico a partir de coleta de amostras em campo e posterior realização de ensaios em laboratório, nos quais foram determinadas a porosidade total, macroporosidade e microporosidade. Os valores encontrado de macroporosidade foram considerados equivalentes ao rendimento específico, e nos 7 poços monitorados estes valores variaram entre 15% e 17 %, com média de 16%.

Na Tabela 1 pode-se visualizar uma síntese dos valores de rendimento específico encontrados na bibliografia.

Tabela 1: Valores de rendimento específico para diversos autores

Autor	Local do estudo	Faixa de valores	Valor médio
Rebouças et al. (1976)	SAG indistinto e regional	-	20%
Rocha (1997)	SAG - área total	15% - 20%	15%
Projeto Aquífero Guarani (2009)	SAG indistinto e regional	13 % - 17%	15%
Martelli (2012)	SAG na cidade de Cacequi (RS)	15% - 17%	16%

Analisando-se todos os valores encontrados na literatura, decidiu-se pela utilização do valor de 16% para o rendimento específico, pois foi o valor encontrado por Martelli (2012) em uma cidade localizada dentro da bacia do rio Ibicuí, e também por encontrar-se dentro dos limites definidos na literatura para o SAG.

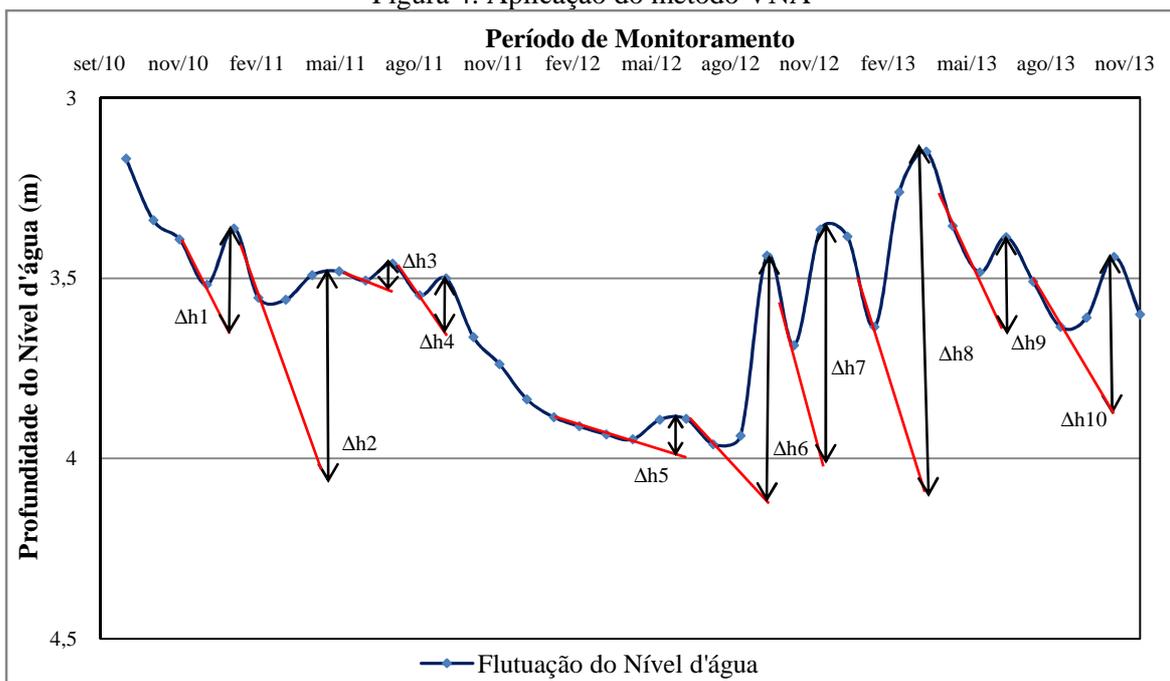
3.5.2 Avaliação da variação do nível d'água e estimativa da recarga

Os dados de nível d'água foram obtidos a partir dos poços de monitoramento da RIMAS. Utilizou-se as séries completas e consistidas para avaliação do nível de água, com as séries escolhidas desde o início das medições, até a data em que se tinha dados com consistência. De uma maneira geral, tem-se o começo do monitoramento em 2010 ou 2011, se estendendo até 2013 ou 2014 (vide o capítulo Resultados).

A medição de nível d'água pelos poços de monitoramento são realizadas por sensores (dataloggers) que realizam a medida de nível a cada uma hora. Sendo assim, para obtenção dos dados diários foi feita a mediana destes valores. Para a aplicação do método de variação do nível d'água optou-se pelas médias mensais de variação, principalmente devido ao longo período de dados da maioria dos poços do estudo. Também observou-se a mesma tendência de variação do nível de água para os poços, na comparação da flutuação diária com a mensal. Sendo assim, fez-se a média entre os dados diários dos poços, obtendo-se então a variação mensal. Escolheu-se, entre os oito poços, aquele que apresentou maior flutuação dos níveis d'água, e aplicou-se o método VNA nas medições diárias, de maneira a comparar o resultado encontrado, com aquele calculado para as flutuações mensais.

Para determinação do Δh , aplicou-se a metodologia apresentada por Healy e Cook (2002), e também utilizada por vários autores, conforme a Figura 4, utilizando no exemplo o poço de monitoramento Puitã. A linha de recessão antecedente foi obtida através de uma reta de ajuste, aplicada nos valores de nível d'água correspondentes a diminuição do nível. Picos que não se apresentaram muito pronunciados ou não estavam antecidos por diminuição do nível d'água não foram considerados.

Figura 4: Aplicação do método VNA



Fonte dos dados: RIMAS, CPRM

Após a identificação das elevações dos níveis de água e das curvas de recessão antecedentes, fez-se o somatório dos Δh s encontrados, separadamente para os oito poços do estudo. O total encontrado foi dividido pelo período de monitoramento, que foi variável para cada poço, uma vez que alguns tem-se seu início de monitoramento em 2010, e outros em 2011. Foram observadas interrupções em alguns períodos de medição, para alguns poços, ocorridas devido a falhas do tipo: (i) calibração, (ii) instalação do sensor, e (iii) mecânicas (falta de bateria do sensor). Sendo estes dados realizados em medição diária, estas lacunas não puderam ser preenchidas por correlação. Para cálculo da média mensal, portanto, só se considerou meses com no mínimo 15 dias com dados, com descarte direto dos meses com excesso de falhas.

No cálculo da recarga, aplicou-se a equação (1) em cada um dos poços de monitoramento. Para a situação mostrada na Figura 4, fez-se:

$$R = S_y \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t} = 0,16 \cdot \frac{\Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 + \Delta h_4 + \Delta h_5 + \Delta h_6 + \Delta h_7 + \Delta h_8 + \Delta h_9 + \Delta h_{10}}{N_{\text{meses}}}$$

Em que Δh é o somatório de todas as variações na altura do nível de água, enquanto que Δt é o período de monitoramento, em meses, variável para cada poço. O valor do $\Sigma \Delta h / \Delta t$ para cada poço foi multiplicado por 0,16 (S_y), encontrando-se a recarga em mm/mês. Para comparar-se com os resultados de precipitação, multiplicou-se cada valor de recarga pelo período analisado, e fez-se a soma das precipitações no mesmo período, para

cada poço. Dividindo-se estes valores de recarga (em mm) pela precipitação total (em mm) no período, obteve-se a quantidade de precipitação que corresponde ou que pode ser considerada como recarga.

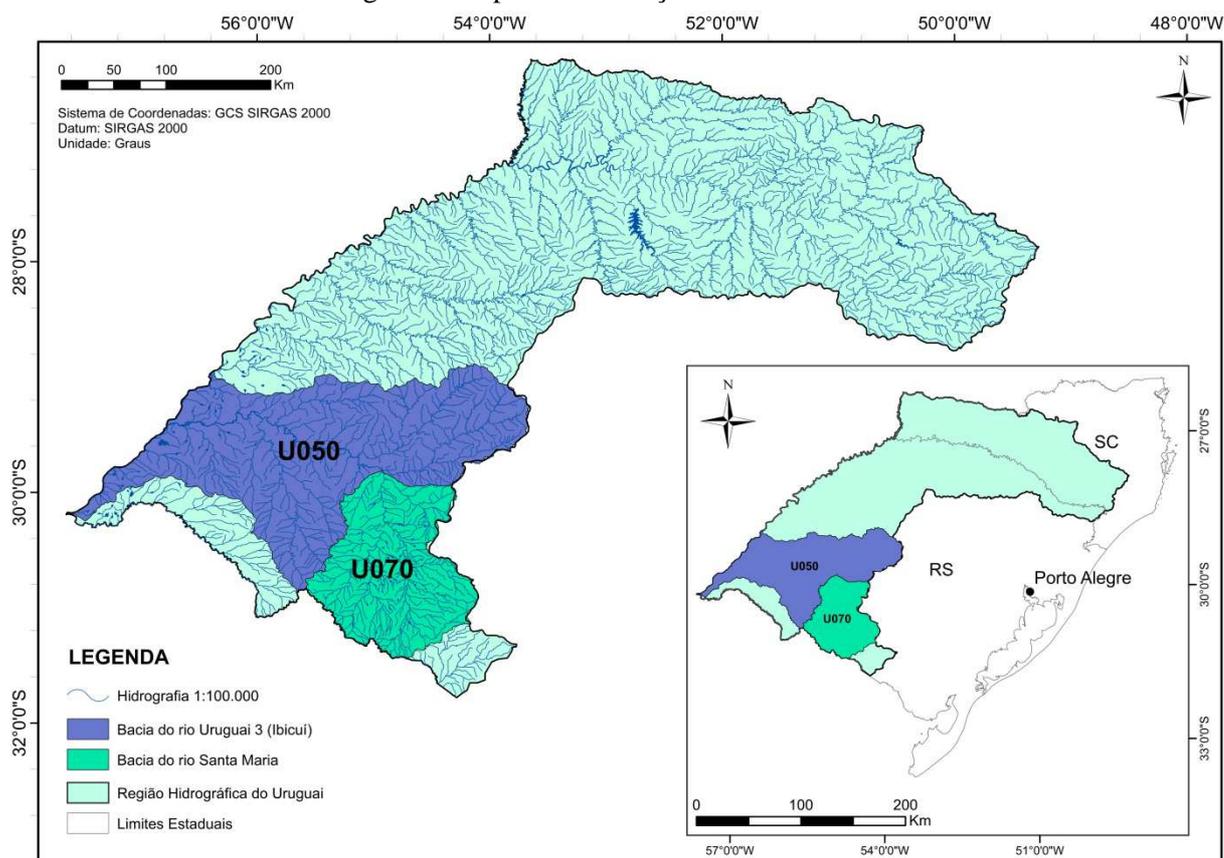
Os resultados obtidos com os cálculos foram analisados, interpretados e utilizados na avaliação da recarga da bacia.

4. RESULTADOS

4.1 Localização da área de estudo

A área de estudo deste trabalho pertence à Bacia Hidrográfica do rio Ibicuí, a qual está inserida na Região Hidrográfica do Rio Uruguai, conforme preconiza a Resolução CNRH nº30/2002, sendo esta base para o PNRH. As bacias do rio Ibicuí (Uruguai 3) e do rio Santa Maria foram consideradas individualmente pelo DRH/SEMA para fins de planejamento e gestão, recebendo as denominações de U050 e U070, respectivamente (Figura 5). Estas bacias unidas formam a bacia do Ibicuí, que possui área total de 47.320 km². A bacia do Uruguai 3 – Ibicuí (U050) ocupa uma área de 31.536 km², e a bacia do rio Santa Maria (U070) ocupa uma área de 15.784 km² (MMA, 2006). Neste trabalho, a unidade a ser trabalhada será a bacia do Ibicuí em sua totalidade.

Figura 5: Mapa de localização das bacias



Fonte (shapefiles): ANA, FEPAM e CPRM

4.2 Caracterização hidrogeológica da área

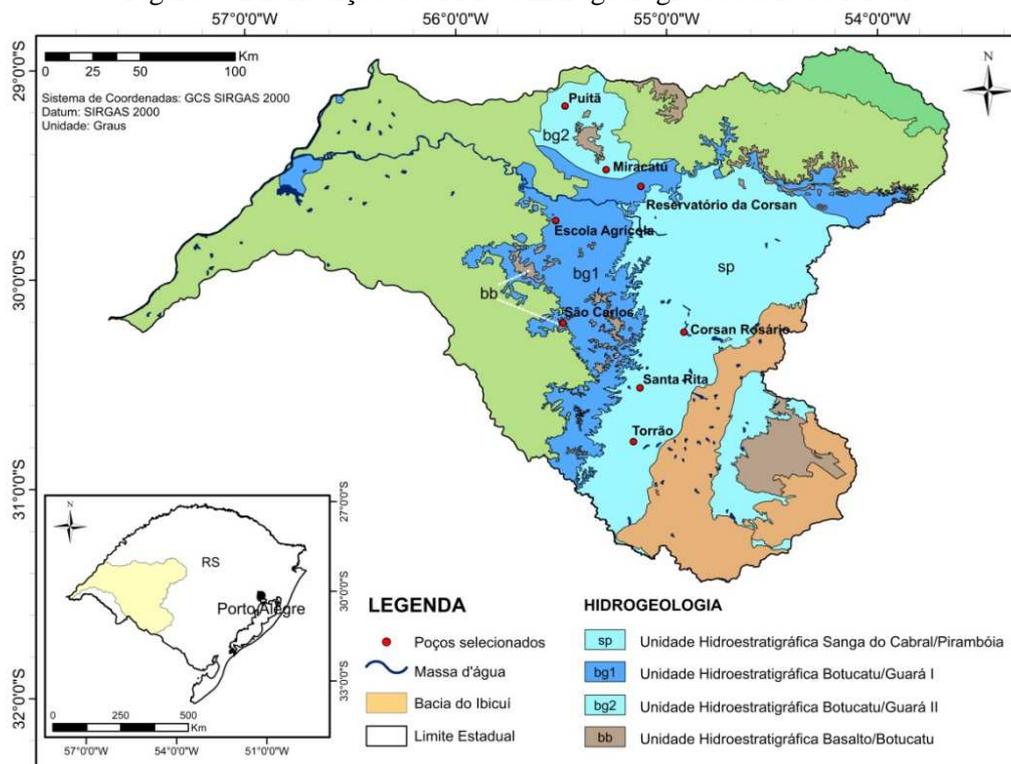
Os poços de monitoramento (que serão referidos também com o uso da sigla PM's) selecionados encontram-se apresentados na Tabela 2. Já na Figura 6 pode-se visualizar a localização dos PM's, assim como o arcabouço hidrogeológico da região onde estão localizados com base no Mapa Hidrogeológico da CPRM (2005).

Tabela 2: Características dos PM's

Localidade	Unidade Hidroestratigráfica	Latitude (g°m's'')	Longitude (g°m's'')	Município	Data Instalação	N° SIAGAS	NE* (m)	Profundidade (m)	Cota Topográfica (m)
Assentamento Torrão	Piramboia	-30°46'15"	-55°9'25"	Livramento	28/09/2010	4300020126	18,6	75	186,76
Estância Santa Rita	Piramboia	-30°30'48"	-55°7'33"	Livramento	28/09/2010	4300020123	37,6	98	193,22
ETA Centro (Corsan Rosário)	Piramboia	-30°14'50"	-54°55'3"	Rosário do sul	10/08/2011	4300020532	9,6	100	104,49
São Carlos	Botucatu	-30°12'16"	-55°29'27"	Rosário do sul	14/10/2010	4300020121	4,8	65	162,34
Escola Agrícola Federal	Guará	-29°42'52"	-55°31'33"	Alegrete	09/08/2011	4300020534	6	56	117,10
Reservatório da Corsan	Guará	-29°33'4"	-55°7'19"	São Francisco de Assis	09/08/2011	4300020535	35,8	70	171,09
Miracatu	Guará	-29°28'16"	-55°17'10"	São Francisco de Assis	08/10/2010	4300020124	39,5	77	161,20
Puitã	Guará	-29°10'11"	-55°28'52"	Itaqui	07/10/2010	4300020119	4	40	107,06

Fonte: SIAGAS e RIMAS; *NE - nível estático do PM

Figura 6: Distribuição dos PM's e hidrogeologia da bacia do Ibicuí



Fonte: Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul (adaptado de CPRM, 2005)

Os PM's que se localizam na Unidade Hidroestratigráfica Botucatu/Guará II (bg2) são Puitã e Miracatu, localizados nos municípios de Itaqui e São Francisco de Assis, respectivamente. Esta unidade localiza-se na fronteira oeste do Estado, abrangendo partes dos municípios de Manoel Viana, São Francisco de Assis, Maçambará e Itaqui, onde se situa a feição geomorfológica conhecida como Domo de Itu. Suas litologias predominantes são arenitos finos a médios, róseos a avermelhados, com intercalações siltico-arenosas. As capacidades específicas geralmente são menores do que $0,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, conforme consta no Mapa Hidrogeológico do RS (CPRM,2005).

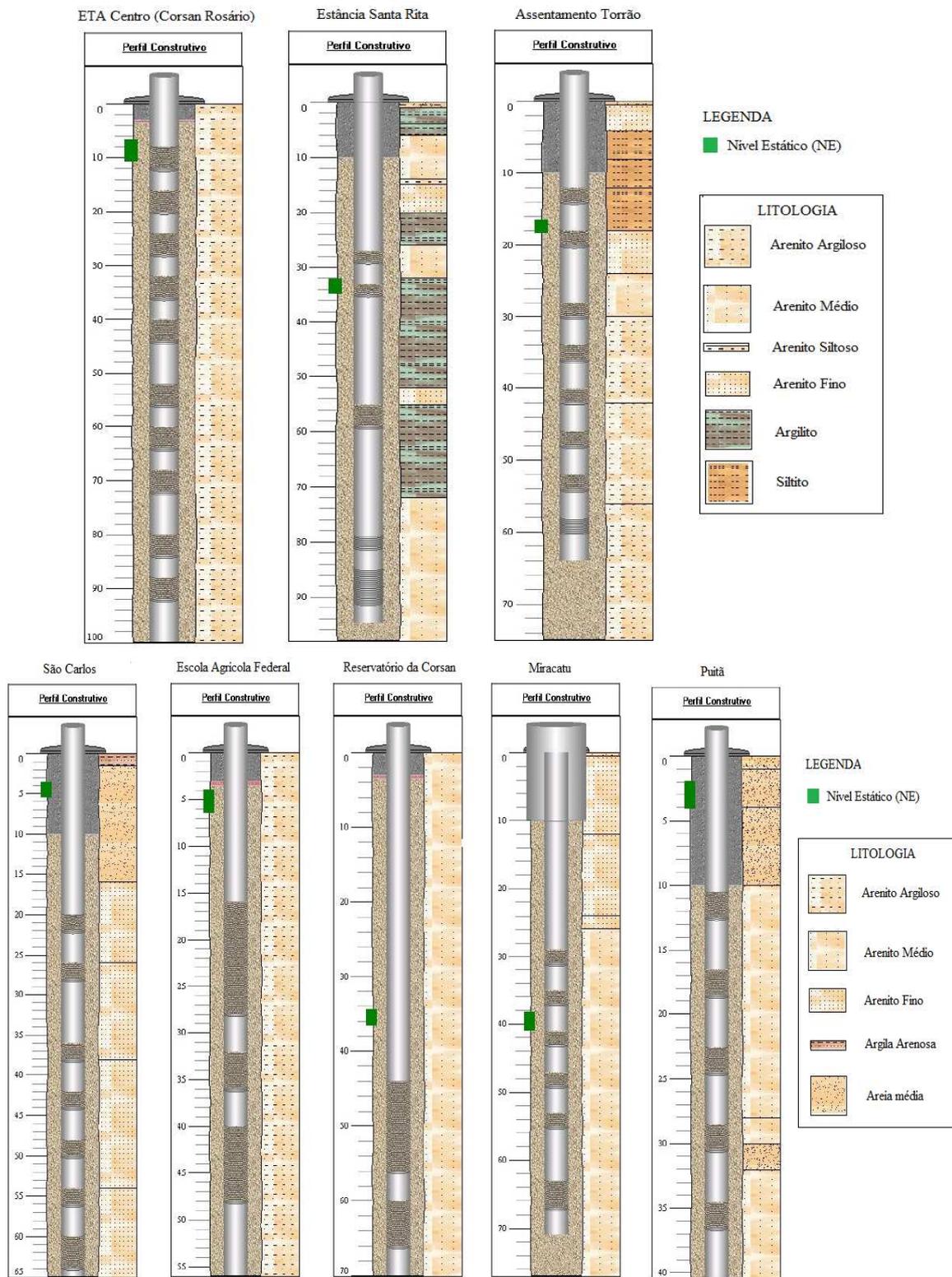
Os PM's que se situam na Unidade Hidroestratigráfica Botucatu/Guará I (bg1) são Escola Agrícola Federal e Reservatório da Corsan, localizados nos municípios de Alegrete e São Francisco de Assis, respectivamente. A área aflorante desta unidade restringe-se à fronteira oeste, entre Santana do Livramento e Jaguarí. A porção confinada pelas rochas basálticas ocorre entre os municípios de Santana do Livramento, Alegrete, Uruguai, Itaqui e São Borja. As litologias são compostas por arenitos médios a finos, quartzosos, róseos a avermelhados, apresentando intercalações pelíticas e cimento argiloso na unidade Guará. Na área aflorante as capacidades específicas variam entre 1 e $3 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ e na área confinada as capacidades específicas ultrapassam $4 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, alcançando até $10 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, segundo o Mapa Hidrogeológico do RS (CPRM, 2005).

Os PM's que se localizam na Unidade Hidroestratigráfica Sanga do Cabral/Piramboia (sp) são Corsan Rosário, Estância Santa Rita e Assentamento Torrão, localizados nos municípios de Rosário do Sul para o primeiro PM, e Livramento para os dois últimos. A área aflorante estende-se desde a fronteira do estado com o Uruguai, em uma faixa contínua até a região de Taquari. Compõe-se de camadas siltico-arenosas avermelhadas com matriz argilosa e arenitos finos a muito finos, avermelhados, com cimento calcífero. As capacidades específicas são muito variáveis, em geral entre $0,5$ e $1,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, segundo o Mapa Hidrogeológico do RS (CPRM, 2005).

Já o PM São Carlos localiza-se na Unidade Hidroestratigráfica Basalto/Botucatu (bb), no município de Rosário do Sul. Esta unidade localiza-se na região limite entre a fronteira oeste e a região das missões, entre Santiago, Unistalda e São Borja. Incluem-se também aquelas áreas com morros isolados de basalto sobre arenitos da Unidade Hidroestratigráfica Botucatu, tanto na fronteira oeste quanto na porção leste do estado. São áreas desfavoráveis ao armazenamento de água subterrânea, devido a sua condição topo-estrutural. Os poços são secos ou de baixas vazões, conforme consta no Mapa Hidrogeológico do RS (CPRM, 2005).

Os perfis geológicos dos poços de monitoramento encontram-se apresentados na Figura 7, separados entre as unidades hidroestratigráficas principais: Botucatu/Guará e Sanga do Cabral/Piramboia, respectivamente.

Figura 7: Perfis geológicos dos poços de monitoramento



Fonte: SIAGAS

Pelos perfis dos PM's, percebe-se que há uma predominância de arenitos. Os arenitos normalmente formam aquíferos regionais que armazenam grandes quantidades de água potável. Estes normalmente apresentam porosidades mais baixas que as areias consolidadas, devido a compactação e cimentação de parte dos vazios existentes entre os grãos (FEITOSA; FILHO, 2000). A profundidade útil dos poços, como apresentado na Tabela 2 e na Figura 7, fica entre 40 e 100 metros. Com relação as características construtivas, todos os poços possuem 8 1/2 polegadas de diâmetro, ou seja, 215,9 mm, e são revestidos com plástico geomecânico.

Nos PM's localizados na Unidade Hidroestratigráfica Sanga do Cabral/Piramboia tem-se a presença de arenito argiloso, siltito e argilito. Percebe-se, entretanto, diferenças nos perfis geológicos destes poços. No perfil do PM Corsan Rosário, o nível estático está localizado a 11,08 metros, e há presença apenas da litologia arenito argiloso. O poço possui uma vazão específica de 0,64 m³/h/m. No perfil do PM Estância Santa Rita, o nível estático está localizado a 37,62 metros, e há presença de várias litologias. Pela descrição litológica visualiza-se que nos primeiros metros tem-se um solo argiloso, seguido por uma intercalação de camadas de argilitos arenosos com camadas de arenito variadas (médio, siltoso e fino). No perfil do PM Assentamento Torrão, o nível estático está localizado a 18,60 metros, e há presença predominante de arenitos, intercalados por uma camada de siltitos entre 4 e 18 metros. Até os 30 metros tem-se predominância de arenitos arenosos e siltitos arenosos e argilosos, enquanto que a partir dos 30 metros tem-se apenas arenitos argilosos finos a médios. O poço possui uma vazão específica de 0,14 m³/h/m.

No PM São Carlos, o nível estático está localizado a 4,80 metros, e tem-se predominância de arenito fino, o qual ocorre entre 16 e 64 metros. Nos primeiros 1,5 metros tem-se argila arenosa, e entre 1,5 e 16 metros tem-se areia média. O poço possui uma vazão específica de 1,115 m³/h/m.

Nos PM's Escola Agrícola Federal e Reservatório da Corsan, ambos localizados na Formação Botucatu/Guará I, tem-se a presença de arenitos. No perfil do poço Escola Agrícola Federal, o nível estático está localizado a 6,20 metros, e há presença apenas da litologia arenito argiloso. No perfil do PM Reservatório da Corsan, o nível estático está localizado a 36,74 metros, e ocorre apenas a litologia arenito médio.

Nos PM's Miracatu e Puitã, localizados na Formação Botucatu/Guará II, tem-se a presença de arenitos e areia média. No perfil do poço Miracatu, o nível estático está localizado a 39,50 metros, e há presença principalmente de arenitos. Entre 0,5 e 26 metros tem-se arenito fino, composto por areias finas a médias. Entre 26 metros e 77 metros tem-

se arenito médio. O poço possui uma vazão específica de 5,60 m³/h/m. No perfil do PM Puitã, o nível estático está localizado a 4,00 metros, e há variação nas litologias. No primeiro metro tem-se solo arenoso, seguido, entre 1 e 10 metros, por areia fina. Entre 10 metros e 40,5 metros tem-se predominância de arenito médio. O poço possui uma vazão específica de 2,53 m³/h/m.

Para os PM's que possuem o valor de vazão específica, buscou-se caracterizar hidráulicamente os poços. A Tabela 3 apresenta a caracterização hidráulica das classes dos aquíferos, conforme o Manual de Cartografia Hidrogeológica da CPRM (2014). A vazão apresentada na primeira coluna da Tabela 3 corresponde a vazão específica, sendo possível então enquadrar os PM's em classes de produtividade.

Tabela 3: Caracterização hidráulica das classes dos aquíferos

Q/s (m ³ /h/m)	T (m ² /s)	K (m/s)	Vazão (m ³ /h)	Produtividade	Classe
≥4,0	≥10 ⁻²	>10 ⁻⁴	≥100	Muito Alta: Fornecimentos de água de importância regional (abastecimento de cidades e grandes irrigações). Aquíferos que se destaquem em âmbito nacional.	(1)
2,0≤Q/s≤4,0	10 ⁻³ ≤T≤10 ⁻²	10 ⁻⁵ ≤K≤10 ⁻⁴	50≤Q≤100	Alta: Características semelhantes à classe anterior, contudo situando-se dentro da média nacional de bons aquíferos.	(2)
1,0≤Q/s≤2,0	10 ⁻⁴ ≤T≤10 ⁻³	10 ⁻⁶ ≤K≤10 ⁻⁵	25≤Q≤50	Moderada: Fornecimento de água para abastecimentos locais em pequenas comunidades, irrigação em áreas restritas.	(3)
0,4≤Q/s≤1,0	10 ⁻⁵ ≤T≤10 ⁻⁴	10 ⁻⁷ ≤K≤10 ⁻⁶	10≤Q≤25	Geralmente baixa, porém localmente moderada: Fornecimentos de água para suprir abastecimentos locais ou consumo privado.	(4)
0,04≤Q/s≤0,4	10 ⁻⁶ ≤T≤10 ⁻⁵	10 ⁻⁸ ≤K≤10 ⁻⁷	1≤Q≤10	Geralmente muito baixa, porém localmente baixa: Fornecimentos contínuos dificilmente são garantidos.	(5)
<0,04	<10 ⁻⁶	<10 ⁻⁸	<1,0	Pouco produtiva ou não aquífera: Fornecimentos insignificantes de água. Abastecimentos restritos ao uso de bombas manuais.	(6)

Adaptado de: STRUCKMEIR e MARGAT (1995) - Modificado em DINIZ (2012)

De acordo com a Tabela 3, tem-se que o PM Torrão, com 0,14 m³/h/m, encaixa-se na Classe 5, com produtividade geralmente muito baixa, e o PM Corsan Rosário, com 0,64 m³/h/m, encaixa-se na Classe 4, com produtividade baixa. Já o PM São Carlos, com 1,115 m³/h/m, encaixa-se na Classe 3, com produtividade moderada, e o PM Puitã, com 2,53

$m^3/h/m$, encaixa-se na Classe 2, com alta produtividade. O PM com o valor mais alto de vazão específica é o Miracatu, com $5,60 m^3/h/m$, que apresenta produtividade muito alta. O que pode se avaliar desta situação é que a produtividade dos poços encontra-se bem variada, e é possível perceber que ela aumenta de sudeste para noroeste, e que os PM's localizados nas Unidade Hidroestratigráficas bg1 e bg2 apresentaram maior vazão específica (vide Figura 6).

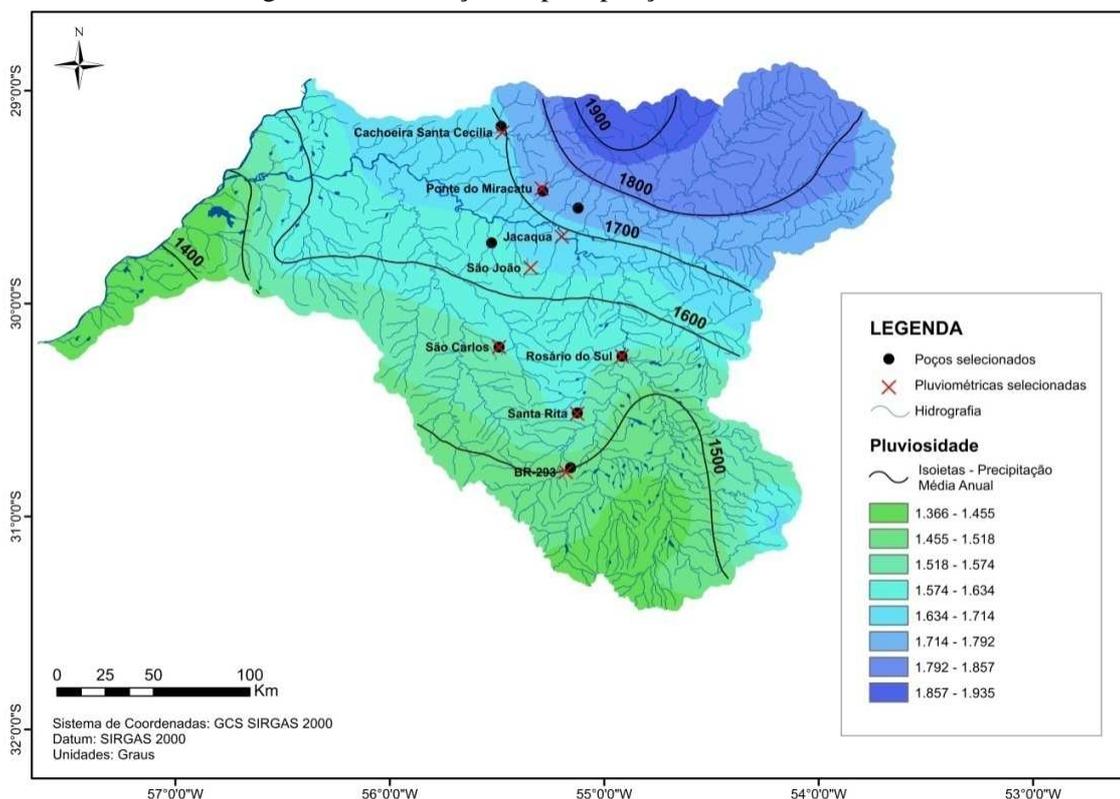
4.3 Caracterização da precipitação

As estações pluviométricas selecionadas, em sua maioria, localizam-se bem próximas aos poços de monitoramento, como pode-se visualizar na Figura 8. As mesmas são apresentadas na Tabela 4, com sua localização geográfica. Os valores de precipitação são apresentados, mais adiante, em conjunto com a avaliação da recarga. A descrição das séries utilizadas e da sua consistência já foi apresentada no item 3.4 da Metodologia.

Tabela 4: Estações Pluviométricas utilizadas na avaliação

Estação	Código	Latitude	Longitude	Poço mais próximo
Cachoeira Santa Cecília	02955002	-29,196	-55,475	Puitã
Ponte do Miracatu	02955006	-29,459	-55,291	Miracatu
Jacaqua	02955016	-29,685	-55,198	Corsan São Francisco de Assis
São João	02955017	-29,832	-55,343	Escola Agrícola
São Carlos	03055007	-30,204	-55,491	São Carlos
Rosário do Sul	03054007	-30,247	-54,918	Corsan Rosário
Santa Rita	03055005	-30,516	-55,127	Estância Santa Rita
BR-293	03055009	-30,792	-55,179	Torrão

Figura 8: Distribuição da precipitação na bacia do Ibicuí



Fonte (shapefiles): Atlas Pluviométrico, ANA e CPRM

Através do mapa, visualiza-se que a precipitação varia de 1400 mm a 1900 mm na bacia. Percebe-se que os quatro poços situados mais ao norte da bacia localizam-se em região de precipitação entre 1600 mm e 1800 mm, enquanto que os quatro poços situados mais ao sul da bacia localizam-se em região de precipitação entre 1500 e 1600 mm, fator que pode ocasionar variações nos valores de recarga.

4.4 Avaliação da recarga aquífera

Na avaliação dos dados de flutuação de nível d'água para os oito poços selecionados, percebeu-se tendências diferenciadas entre eles. Sendo assim, os resultados são apresentados e discutidos separadamente, para depois realizar-se comparações e discussões sobre os valores de recarga encontrados. Primeiramente, são avaliados os poços de monitoramento (PM's) que apresentaram resposta mais direta frente à precipitação.

O primeiro destes PM's é o Puitã, cujos resultados do cálculo da recarga estão apresentados na Tabela 5. A esquerda na tabela são apresentados os valores de variação do nível de água, enquanto que a direita encontram-se dispostos os valores da flutuação separados pelos anos de monitoramento, com destaque para os meses em que ocorreram os picos.

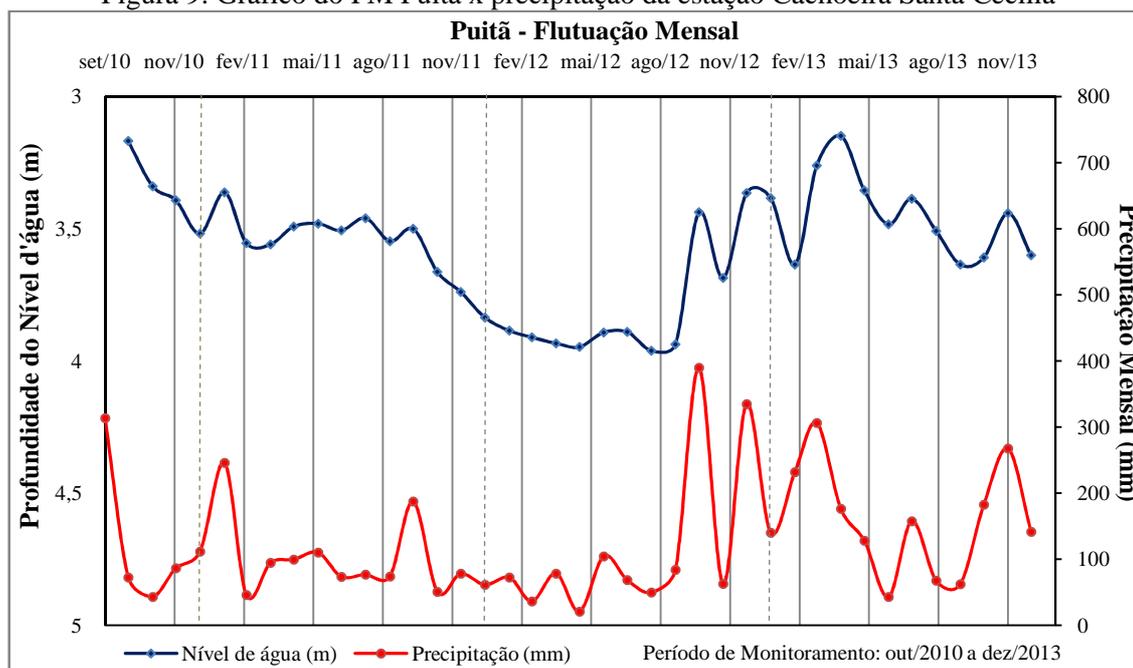
Tabela 5: Resultados do cálculo da recarga para o PM Puitã

Flutuação do nível d'água		Anos de Monitoramento		
Δh	Valores de Δh (m)	2011	2012	2013
1	0,304	Fevereiro		
2	0,497	Mai		
3	0,095	Agosto		
4	0,166	Outubro		
5	0,074		Junho	
6	0,740		Outubro	
7	0,713		Dezembro	
8	1,140			Abril
9	0,280			Julho
10	0,559			Novembro
$\sum \Delta h$ (m)	4,57	1,06	1,53	1,98
$\sum \Delta h$ (mm)	4567	1062	1526	1979
Sy	0,16	0,16	0,16	0,16
Recarga (mm)	730,7¹	169,9	244,2	361,6
Precipitação (mm)	4719,1¹	1248,5	1363,2	1905,0
Rec/pp (%)	15,48¹	13,61	17,91	16,62

¹ Estes valores são os resultados de todo o período de monitoramento (39 meses)

Na Figura 9 têm-se as flutuações de nível no período monitorado (outubro de 2010 a dezembro de 2013), em comparação com a precipitação no mesmo período, acrescido de um mês anterior ao início do monitoramento (setembro de 2010 a dezembro de 2013). A linha pontilhada separa o início dos anos de monitoramento.

Figura 9: Gráfico do PM Puitã x precipitação da estação Cachoeira Santa Cecília



Pelos resultados do PM Puitã, pode-se perceber eventos de flutuação de nível semelhantes nos três anos completos do monitoramento, com valores similares de resposta a precipitação. Visualiza-se que a flutuação de nível no poço responde diretamente a precipitação, o que pode ser evidenciado principalmente nos maiores picos, e também pode ser visto pelos valores encontrados. A recarga líquida calculada para todos os 39 meses de monitoramento foi de 730,7 mm, correspondente a 15,48 % da precipitação no período.

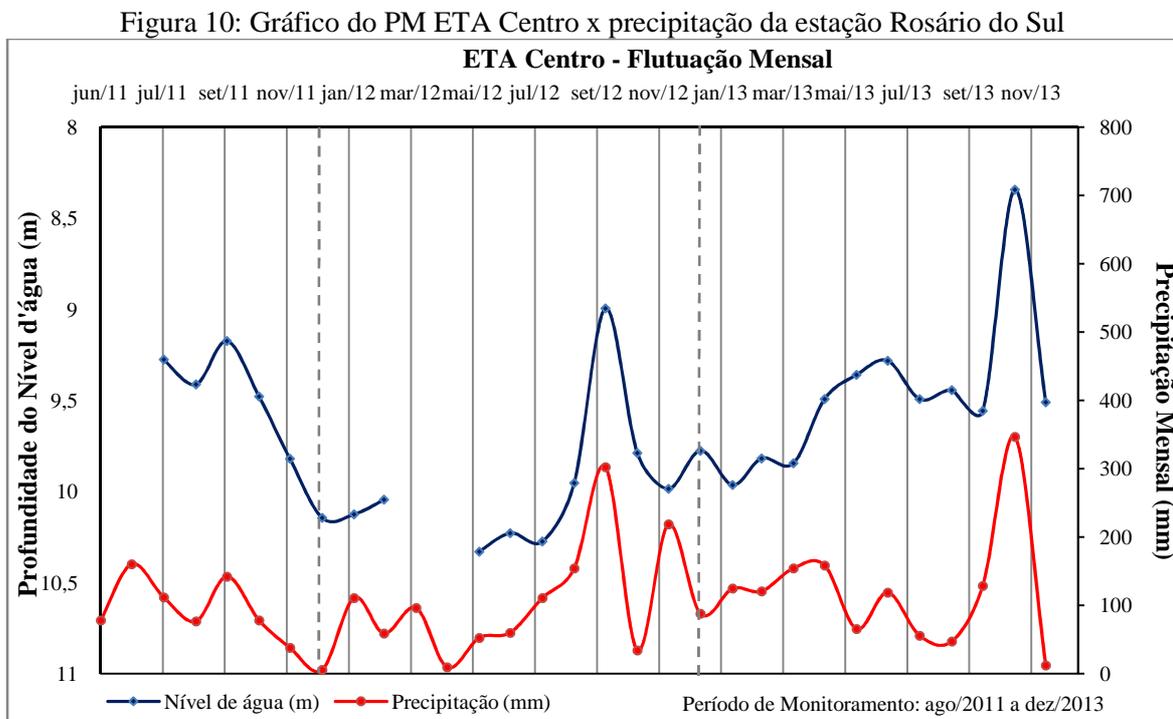
O PM Puitã foi o escolhido para determinação da recarga total, avaliando-se as flutuações de nível diárias ocorridas, no mesmo período avaliado acima, e neste caso específico utilizando-se precipitações médias diárias. Nesta tentativa de avaliação de recarga, encontrou-se um valor extremamente alto que extrapolou a precipitação, para o mesmo período, tanto que decidiu-se por não demonstrar este resultado neste trabalho. Pensou-se que este valor elevado ocorreu devido a quantidade de picos ocorridos que, somados em conjunto, resultaram nesta extrapolação. Esta comparação apenas evidenciou que a recarga "bruta" ou total deve ser tratada de maneira diferenciada da recarga "líquida", pois representam taxas de estimativas de recarga em escalas temporais diferentes.

O próximo PM é o ETA Centro (Corsan Rosário), cujos resultados estão apresentados na Tabela 6, em que novamente tem-se os valores totais da variação do nível a esquerda, e a direita a apresentação destes valores distribuídos nos anos de monitoramento.

Tabela 6: Resultados do cálculo da recarga para o PM ETA Centro

Flutuação do nível d'água		Anos de Monitoramento		
Δh	Valores de Δh (m)	2011	2012	2013
1	0,481	Outubro		
2	1,517		Outubro	
3	0,502			Janeiro
4	0,360			Março
5	0,785			Julho
6	0,312			Setembro
7	1,661			Novembro
$\sum \Delta h$ (m)	5,62	0,48	1,52	3062
$\sum \Delta h$ (mm)	5618	481	1517	3620
S_y	0,16	0,16	0,16	0,16
Recarga (mm)	899,0¹	77,0	242,7	579,2
Precipitação (mm)	2978,6¹	447,0	1215,8	1421,5
Rec/pp (%)	30,18¹	17,23	21,86	40,75
¹ Estes valores são os resultados de todo o período de monitoramento (27 meses)				

Na Figura 10 tem-se as flutuações de nível no período monitorado (agosto de 2011 a dezembro de 2013), em comparação com a precipitação no mesmo período, acrescido de dois meses anteriores ao início do monitoramento (junho de 2011 a dezembro de 2013). A linha pontilhada separa o início dos anos de monitoramento.



Pelos resultados do PM ETA Centro, percebe-se uma boa resposta de elevação dos níveis d'água em relação aos eventos de precipitação, embora no ano de 2013 esta correspondência seja mais ressaltada apenas para o pico elevado ocorrido no mês de novembro. O ano de 2011 só contém os dados a partir de agosto, o que pode influenciar o valor mais baixo de recarga em comparação com os outros anos. A recarga líquida calculada para todos os 27 meses de monitoramento foi de 899,00 mm, correspondente a 30,18 % da precipitação no período. Devido a alta taxa de recarga encontrada para este poço, buscou-se informações para averiguar o motivo deste valor elevado. Ao analisar-se a localização do poço no Google Earth (Figura 11), pode-se visualizar sua proximidade com o rio Santa Maria (aproximadamente 0,4 km de distância). Por este motivo, procurou-se uma estação fluviométrica próxima para avaliação de uma possível influencia do rio na recarga do poço, e analisou-se as vazões deste fluviograma no mesmo período de monitoramento do poço (Figura 12). O rio Santa Maria está na cota de 90 metros e o poço na cota de 104,5 m, sendo que o nível estático (NE) do PM ETA Centro é de 9,55 metros.

Figura 11: Localização do PM ETA Centro em relação a estação fluviométrica Ponte Ibicuí da Armada

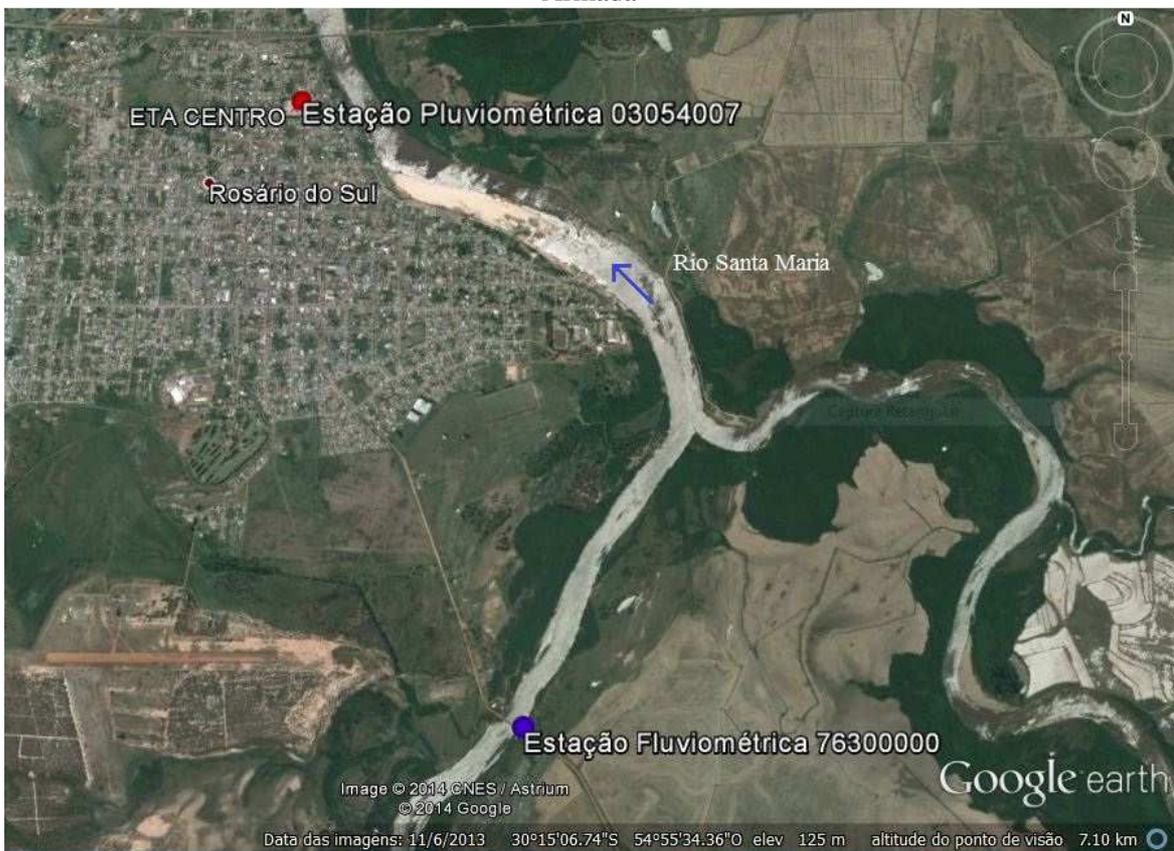
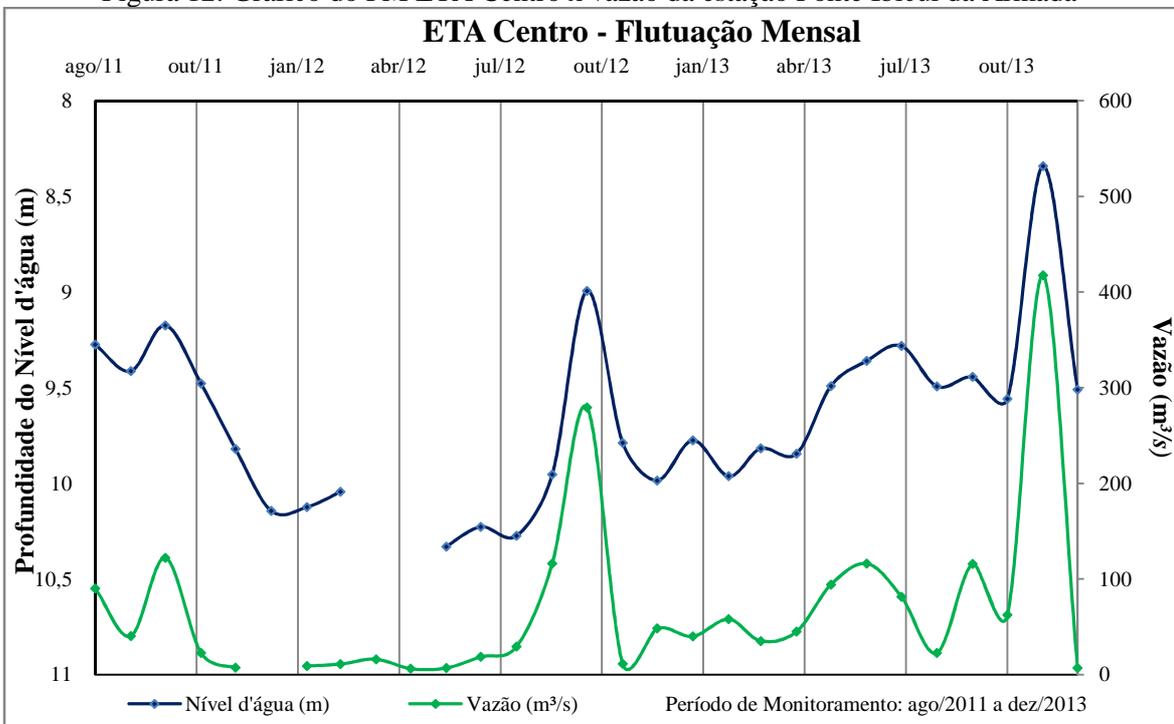


Figura 12: Gráfico do PM ETA Centro x vazão da estação Ponte Ibicuí da Armada



Analisando a flutuação do nível de água com o a flutuação das vazões, percebe-se que a resposta é bem similar para todo o período analisado. Desta maneira, pode-se supor que o PM ETA Centro de certa forma tem sua recarga influenciada pelo rio, apresentando então um comportamento diferenciado dos outros poços.

O próximo PM é o São Carlos, cujos resultados estão apresentados na Tabela 7, em que novamente tem-se os valores totais da variação do nível a esquerda, e a direita a apresentação destes valores distribuídos nos anos de monitoramento.

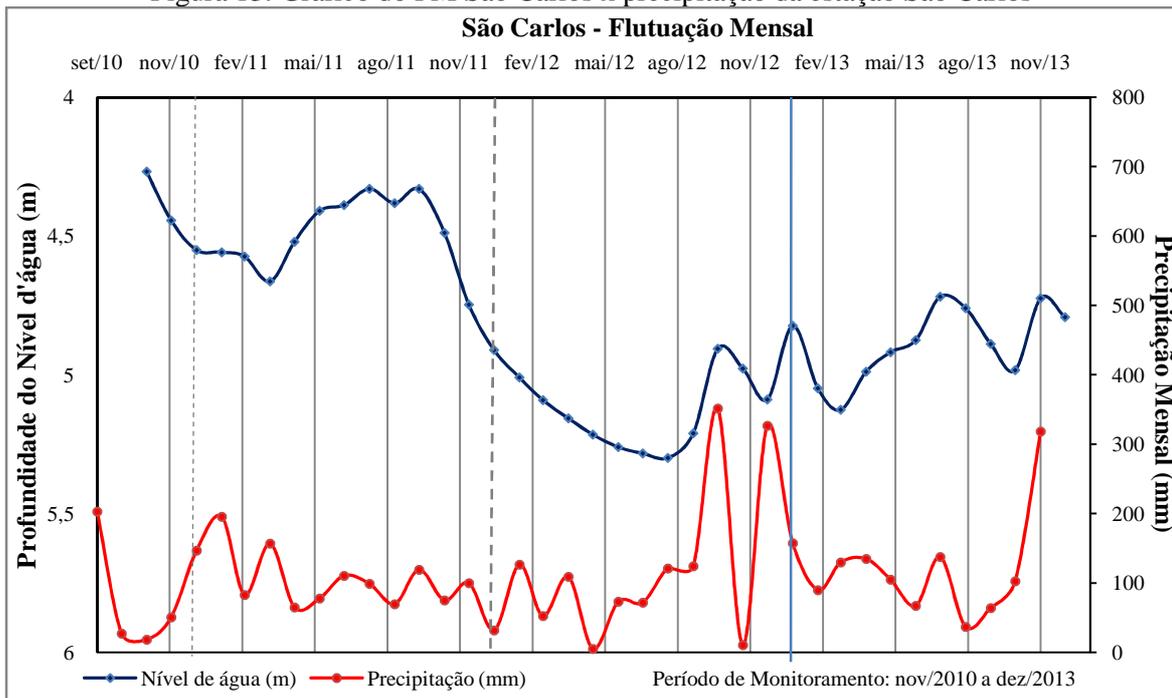
Tabela 7: Resultados do cálculo da recarga para o PM São Carlos

Flutuação do nível d'água		Anos de Monitoramento		
Δh	Valores de Δh (m)	2011	2012	2013
1	0,726	Agosto		
2	0,092	Outubro		
3	0,672		Outubro	
4	0,443			Janeiro
5	1,070			Julho
6	0,431			Novembro
$\sum \Delta h$ (m)	3,43	0,82	0,67	1,95
$\sum \Delta h$ (mm)	3433	817	671	1945
S_y	0,16	0,16	0,16	0,16
Recarga (mm)	549,4¹	130,8	107,4	311,1
Precipitação (mm)	4152,0¹	1299,5	1405,2	1377,9
Rec/pp (%)	13,23¹	10,06	7,65	22,58

¹ Estes valores são os resultados de todo o período de monitoramento (38 meses)

Na Figura 13 tem-se a as flutuações de nível no período monitorado (novembro de 2010 a dezembro de 2013), em comparação com a precipitação no mesmo período, acrescido de dois meses anteriores ao início do monitoramento (setembro de 2011 a dezembro de 2013). A linha pontilhada separa o início dos anos de monitoramento.

Figura 13: Gráfico do PM São Carlos x precipitação da estação São Carlos



Pelos resultados do poço São Carlos, não tem-se uma correlação tão direta para precipitação, embora no ano de 2013 as elevações de nível seguiram-se aos picos de precipitação. Entretanto, no início do ano de 2011 percebe-se que o aumento do nível de água ocorre após alguns meses dos eventos de precipitação, o que pode indicar que a elevação ocorreu devido a estes eventos em meses anteriores. No ano de 2012 ocorre uma diminuição significativa do nível d'água, que só torna a se elevar após a precipitação ocorrida em novembro deste ano. Percebe-se também que a recarga é mais elevada no ano de 2013, principalmente devido aos vários eventos de elevação de nível ocorridos. A recarga líquida calculada para todos os 38 meses de monitoramento foi de 549,40 mm, correspondente a 13,23 % da precipitação no período.

O próximo PM é o Escola Agrícola, cujos resultados estão apresentados na Tabela 8, em que novamente tem-se os valores totais da variação do nível a esquerda, e a direita a apresentação destes valores distribuídos nos anos de monitoramento.

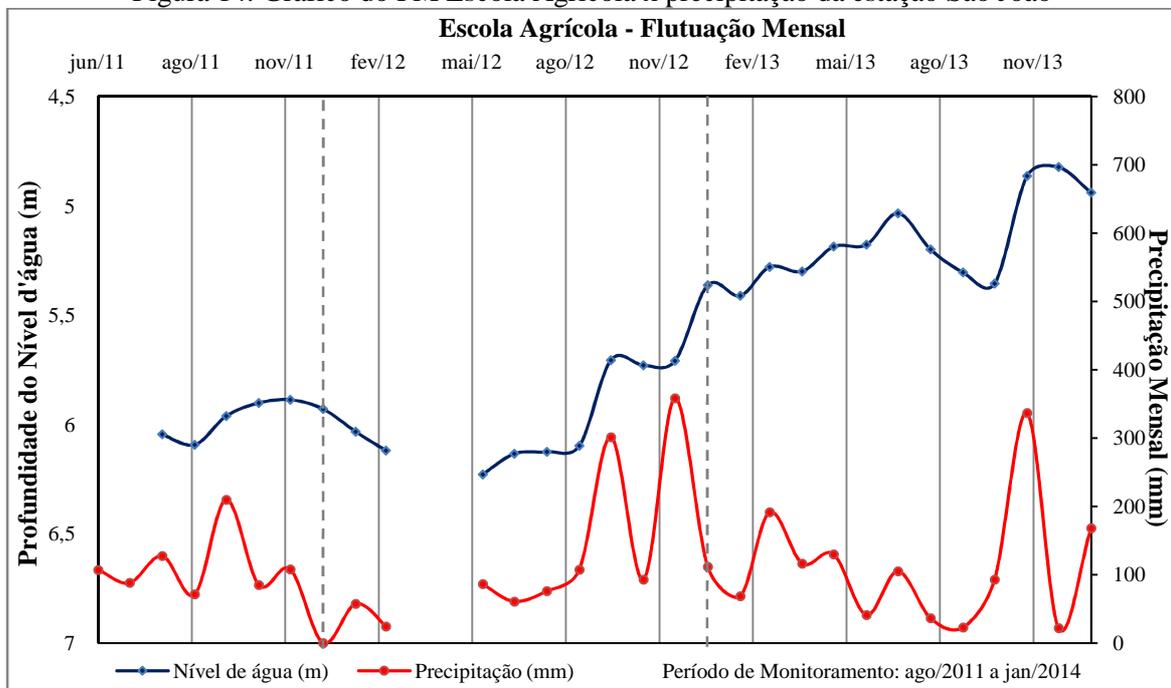
Tabela 8: Resultados do cálculo da recarga para o PM Escola Agrícola

Flutuação do nível d'água		Anos de Monitoramento		
Δh	Valores de Δh (m)	2011	2012	2013
1	0,412	Dezembro		
2	1,084		Outubro	
3	0,505			Janeiro
4	0,222			Março
5	0,411			Julho
6	0,833			Dezembro
$\sum \Delta h$ (m)	3,47	0,41	1,08	1,97
$\sum \Delta h$ (mm)	3466	411	1084	1971
S_y	0,16	0,16	0,16	0,16
Recarga (mm)	554,6¹	65,8	173,4	315,4
Precipitação (mm)	3214,7¹	602,5	1166,6	1277,4
Rec/pp (%)	17, 25¹	10,93	14,87	24,69

¹Estes valores são os resultados de todo o período de monitoramento (28 meses)

Na Figura 14 tem-se a as flutuações de nível no período monitorado (agosto de 2011 a janeiro de 2014), em comparação com a precipitação no mesmo período, acrescido de dois meses anteriores ao início do monitoramento (junho de 2011 a janeiro de 2014). A linha pontilhada separa o início dos anos de monitoramento.

Figura 14: Gráfico do PM Escola Agrícola x precipitação da estação São João



Pelos resultados do poço Escola Agrícola, visualiza-se respostas diferenciadas aos eventos de precipitação. No pico do mês de outubro de 2011, percebe-se uma lenta elevação no nível d'água logo após, o que também ocorre após os picos nos meses de outubro e dezembro de 2012, em que o nível d'água só passou a descer após agosto de 2013. No final de 2013 tem-se um evento intenso de precipitação, que obteve elevação direta no nível d'água no mês de novembro, motivo pelo qual a recarga deste ano foi mais elevada. A recarga líquida calculada para todos os 28 meses de monitoramento foi de 554,60 mm, correspondente a 17,25 % da precipitação no período.

O próximo PM é o Estância Santa Rita, cujos resultados estão apresentados na Tabela 9, em que novamente tem-se os valores totais da variação do nível a esquerda, e a direita a apresentação destes valores distribuídos nos anos de monitoramento.

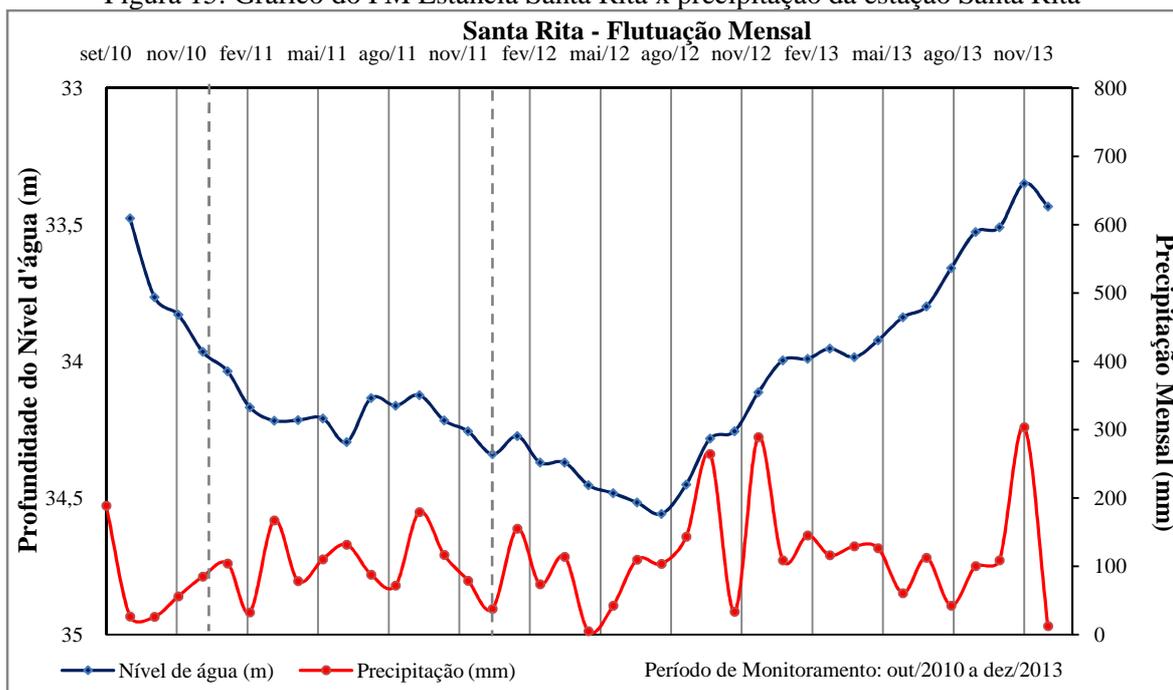
Tabela 9: Resultados do cálculo da recarga para o PM Estância Santa Rita

Flutuação do nível d'água		Anos de Monitoramento		
Δh	Valores de Δh (m)	2011	2012	2013
1	0,344	Agosto		
2	0,143	Outubro		
3	0,204		Fevereiro	
4	0,208		Abril	
5	0,924			Março
6	1,107			Novembro
$\sum \Delta h$ (m)	1,823	0,487	0,412	2,031
$\sum \Delta h$ (mm)	1823	487	412	2031
Sy	0,16	0,16	0,16	0,16
Recarga (mm)	468,71¹	77,89	65,88	324,95
Precipitação (mm)	4092,6¹	1243,9	1372,9	1367,2
Rec/pp (%)	11,45¹	6,26%	4,80%	23,77%

¹ Estes valores são os resultados de todo o período de monitoramento (39 meses)

Na Figura 15 tem-se a as flutuações de nível no período monitorado (outubro de 2010 a dezembro de 2013), em comparação com a precipitação no mesmo período, acrescido de dois meses anteriores ao início do monitoramento (agosto de 2011 a dezembro de 2013). A linha pontilhada separa o início dos anos de monitoramento.

Figura 15: Gráfico do PM Estância Santa Rita x precipitação da estação Santa Rita



Pelos resultados do PM Estância Rita, percebe-se diferenças entre os anos de monitoramento. O ano de 2010 só apresenta os últimos meses, mas pode-se perceber o declínio do nível de água relacionada a baixa precipitação. O ano de 2011 apresenta algumas elevações um pouco após os eventos de precipitação, de intensidade média. O ano de 2013 apresentou três picos intensos de precipitação, e visualiza-se que a elevação do nível de água ocorre gradativamente nos meses posteriores aos eventos de precipitação, resultando na maior recarga encontrada para este ano. A recarga líquida calculada para todos os 39 meses de monitoramento foi de 468,71 mm, correspondente a 11,45 % da precipitação no período.

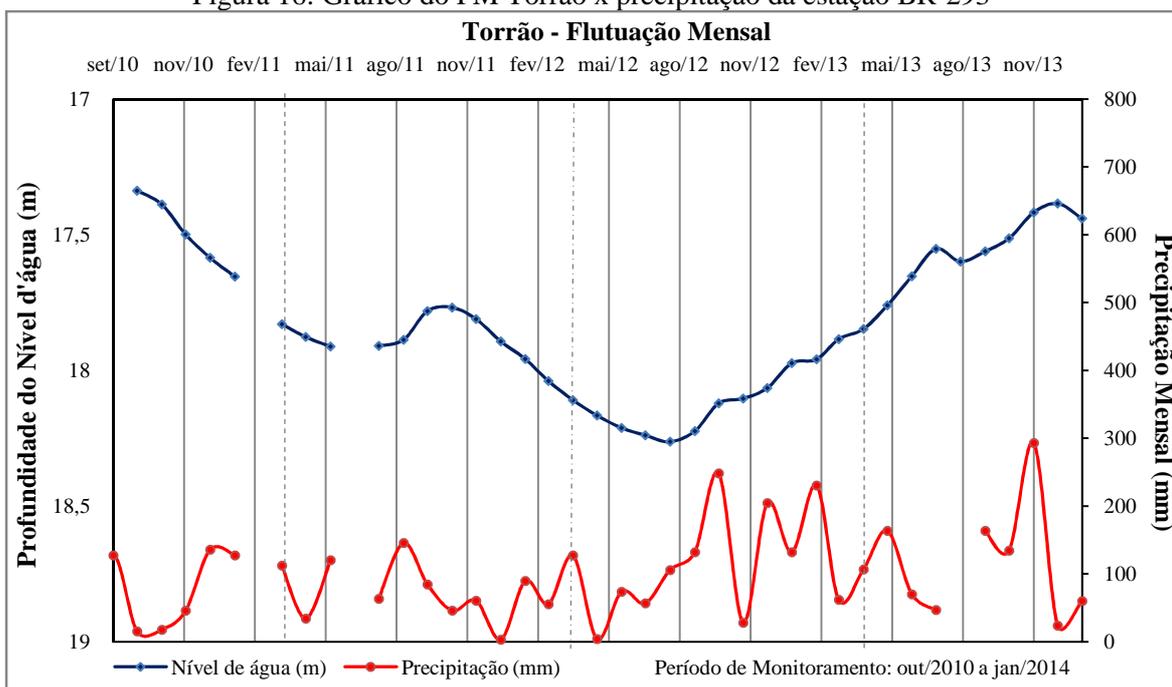
O próximo PM é o Torrão, cujos resultados estão apresentados na Tabela 10, onde tem-se apenas os dados totais de flutuação de nível. A comparação entre os anos de monitoramento não foi feita devido as poucas variações de nível ocorridas.

Tabela 10: Resultados do cálculo da recarga para o PM Torrão

Flutuação do nível d'água	
Δh	Valores de Δh (m)
1	0,598
2	1,537
3	0,471
$\sum \Delta h$ (m)	2,606
$\sum \Delta h$ (mm)	2606
Sy	0,16
Recarga (mm)	417,00
Precipitação (mm)	3572,9
Rec/pp (%)	11,67

Na Figura 16 tem-se a as flutuações de nível no período monitorado (outubro de 2010 a janeiro de 2014), em comparação com a precipitação no mesmo período, acrescido de dois meses anteriores ao início do monitoramento (agosto de 2011 a janeiro de 2014). A linha pontilhada separa o início dos anos de monitoramento.

Figura 16: Gráfico do PM Torrão x precipitação da estação BR-293



Pelos resultados do poço Torrão, visualiza-se pouca variação no nível de água, com apenas dois picos, um ocorrendo em outubro de 2011, e outro ocorrendo em julho de 2013. O que pode-se perceber é que a elevação no nível de água ocorre de forma lenta, após vários eventos de precipitação. A recarga líquida calculada para todos os 38 meses de monitoramento foi de 417,00 mm, correspondente a 11,67 % da precipitação no período.

Os dois próximos PM's a serem avaliados apresentaram uma tendência diferenciada em relação aos anteriores, como pode-se ver nas Figuras 17 e 18. Devido a esta tendência não foi possível a aplicação do método VNA nestes poços, embora eles tenham sido considerados neste trabalho para a comparação com a precipitação no mesmo período.

Figura 17: Gráfico do PM Miracatu x precipitação da estação Ponte do Miracatu

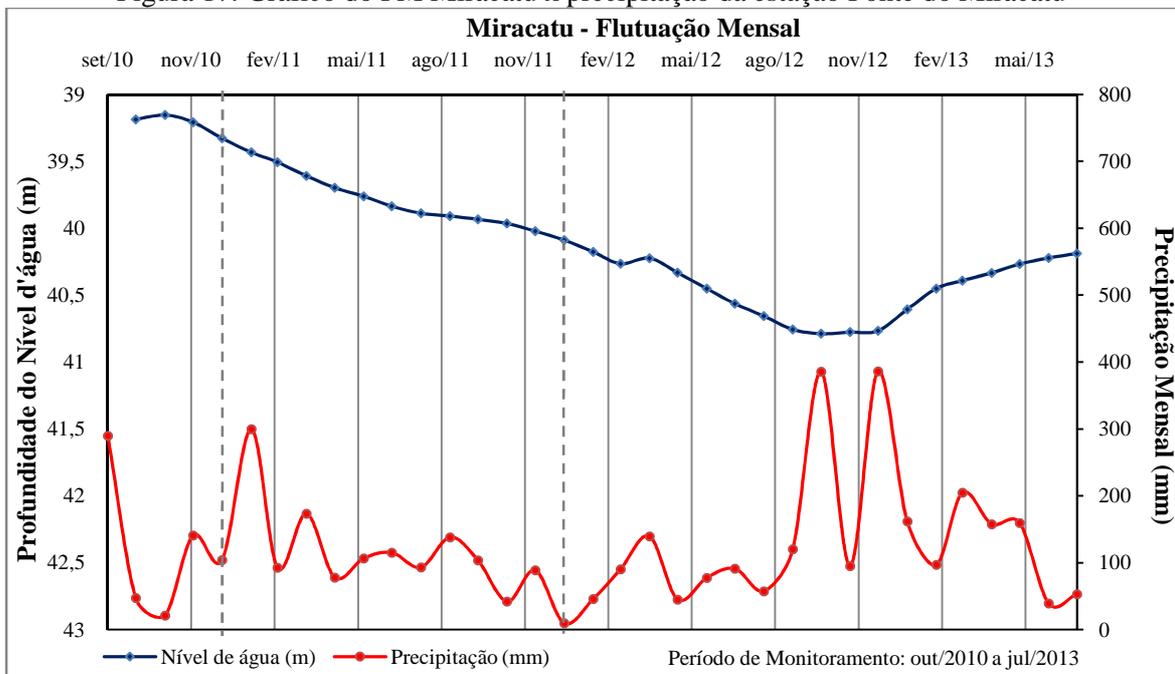
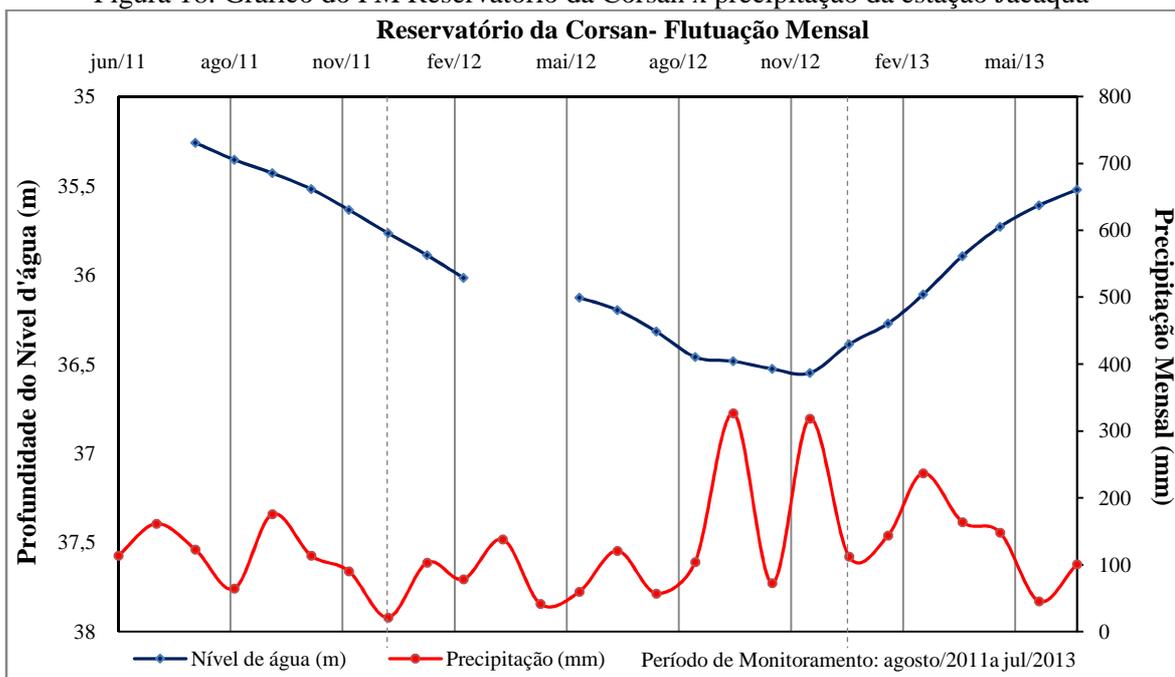


Figura 18: Gráfico do PM Reservatório da Corsan x precipitação da estação Jacaqua



Na avaliação da resposta à precipitação para estes dois PM's, pode-se perceber que só ocorre elevação do nível d'água após eventos maiores de precipitação, na ordem de 300 mm a 400 mm. Este comportamento pode indicar um possível grau de semi-confinamento do aquífero na região de localização dos poços, fato de certa forma corroborado pela pequena magnitude de recarga estimada pelo método. Para o poço Miracatu, mesmo calculando-se a recarga para a pequena elevação de nível visualizada no gráfico, este valor é ínfimo quando comparado com a precipitação no período, pois o valor encontrado foi de 39,9 mm, correspondente a 0,98 % da precipitação de 4058 mm.

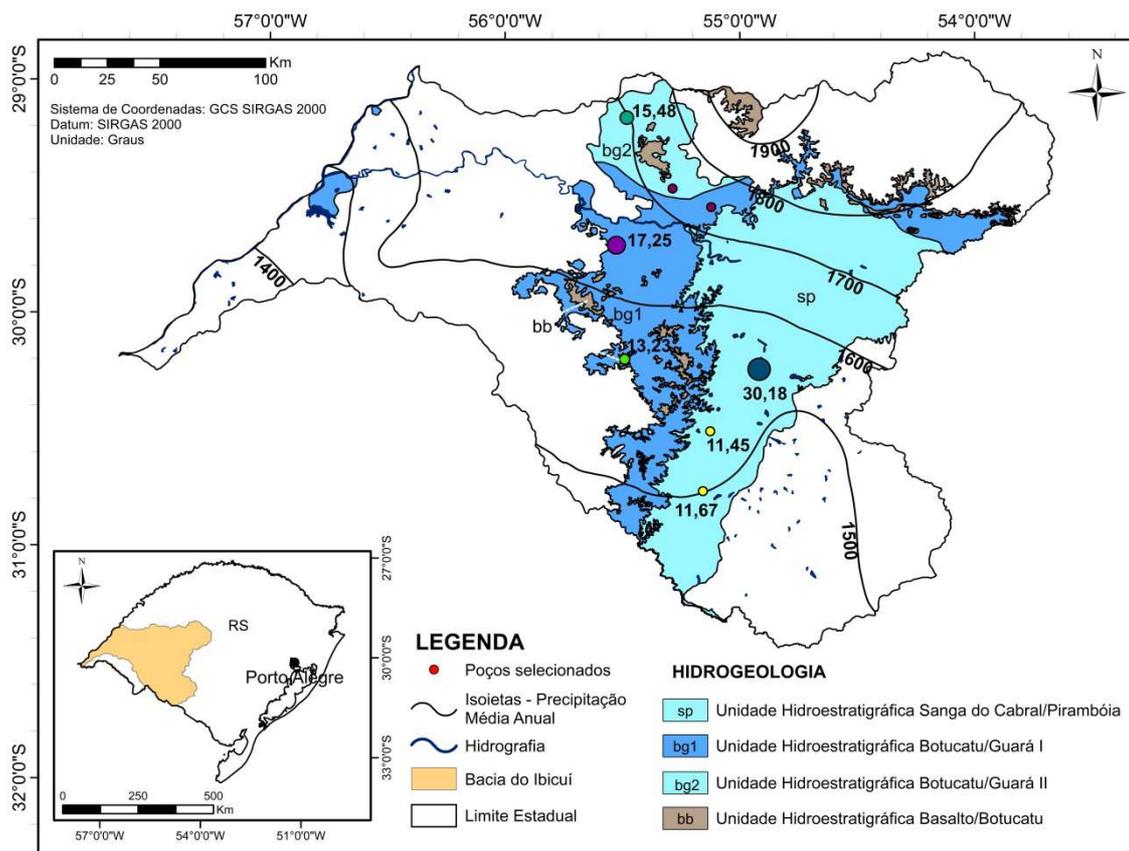
O condicionamento geológico e outras características desta área de recarga podem estar influenciando no comportamento das flutuações dos níveis d'água dos PM's Miracatu e Reservatório da Corsan, caracterizando então esta característica de semi-confinamento.

A Tabela 11 resume os valores de recarga encontrados para cada poço, lembrando que a comparação entre eles só será realizada para os valores de recarga sobre a precipitação, uma vez que tem-se diferentes períodos de monitoramento. Na Figura 19 tem-se a distribuição desses valores encontrados na bacia do Ibicuí.

Tabela 11: Valores de recarga encontrados para cada PM

Poço	Meses de Monitoramento	Recarga (mm)	Precipitação (mm)	Recarga/ Precipitação (%)
Puitã	39	730,7	4719,1	15,48
ETA Centro	27	899,0	2978,6	30,18
São Carlos	38	549,4	4152,0,	13,23
Escola Agrícola	28	554,6	3214,7	17,25
Santa Rita	39	468,7	4092,6	11,45
Torrão	38	417,0	3572,9	11,67
Miracatu	39	-	4058,0	-
Corsan São Francisco	24	-	3917,9	-
Média =				16,54
Mediana =				14,36

Figura 19: Distribuição dos valores de recarga em relação a precipitação na bacia do Ibicuí



Adotando-se os valores obtidos como valores de recarga médios, percebe-se ao comparar os resultados que ao sul da bacia tem-se dois valores similares, para um mesmo período de monitoramento, para os PM's Santa Rita e Torrão. Não pode-se deixar de observar o alto valor apresentado no PM ETA Centro, que se mostrou bem acima dos demais. Como já abordado, este valor pode estar elevado devido a alta precipitação ocorrida no período, mas também à influência do rio Santa Maria sobre o PM. Estes três PM's citados encontram-se localizados na Unidade Hidroestratigráfica Sanga do Cabral. Já os três poços localizados na Unidade Hidroestratigráfica Botucatu/Guará, e nos quais foi possível calcular recarga, apresentaram valores correspondentes entre aproximadamente 13 % a 17 % da precipitação. Analisando-se os PM's de período similar, entre 38 e 39 meses, percebe-se que o Puitã apresentou recarga mais elevada, fato relacionado a maior precipitação ocorrida na área, visível nos resultados e no mapa.

Buscou-se comparar estes resultados com aqueles encontrados por Mattiuzi (2013), ressaltando que podem haver diferenças devido ao método diferenciado (separação de escoamento de base) e a estimativa de recarga, que para o trabalho referido, foi calculada como sendo uma recarga média representativa de uma área (no caso, as respectivas bacias

de contribuição de montante dos postos fluviométricos estudados). Selecionando-se estas áreas e avaliando-se os PM's inseridos nas mesmas, fez-se a relação entre os valores calculados nos PM's deste estudo com os valores de recarga calculados por Mattiuzi (Tabela 12).

Tabela 12: Comparação de dois métodos de estimativa de recarga

VNA		Escoamento de Base		
PM	Rec/pp (%)	Bacia	Área drenagem (km ²)	Rec/pp (%)
Puitã	15,5	Passo da Cachoeira	2564	21,0
ETA Centro	30,2	Rosário do Sul	12092	11,0
São Carlos	13,2	Passo do Osório	1165	13,0
Escola Agrícola	17,3	Passo Mariano Pinto	42108	12,0
Santa Rita	11,5	Ponte Ibicuí da Armada	6004	11,0
Torrão	11,7	Ponte Ibicuí da Armada	6004	11,0
Miracatu	-	Manoel Viana	28922	14,0
Reservatório da Corsan	-	Manoel Viana	28922	14,0

Com relação às convergências, é visível a similaridade das magnitudes nos valores encontrados para o poço São Carlos, Santa Rita e Torrão, com os valores de recarga média encontrados nas bacias representativas de Mattiuzi (2013). Este fato pode significar que a maior parte do arcabouço hidrogeológico destas áreas de drenagem corresponde ao material geológico aflorante no local destes PM's. Buscando os dados do trabalho de Mattiuzi, tem-se que, para a bacia Passo do Osório, 66% de sua área tem predominância de arenitos aflorantes, enquanto que para a bacia Ponte Ibicuí da Armada, este valor cai para 43%, mas ainda é a unidade geológica predominante.

O valor mais elevado encontrado na bacia Passo da Cachoeira também é plausível, uma vez que a recarga média congrega toda a área de drenagem a montante da estação avaliada. Já o valor de recarga estimado para a bacia Rosário do Sul, de Mattiuzi, vem a indicar que a recarga encontrada no PM ETA Centro provavelmente representa um valor superestimado, possivelmente devido a interferências do tipo rio-aquífero, como já mostrado no decorrer deste trabalho. O valor mais elevado no PM Escola Agrícola pode indicar que nesta região próxima ao mesmo a recarga também é mais elevada, enquanto que a média da bacia, que possui grande área de drenagem, tem valor menor. Desta feita, muito provavelmente as condições de recarga pontual nas imediações do PM são distintas e não se reproduzem ao longo da respectiva bacia definida por Mattiuzi.

Quanto aos PM's nos quais não foi possível estimar recarga, percebe-se que para a bacia na qual eles estão inseridos, Manoel Viana, Mattiuzi estimou uma recarga de 14 %. Como não ocorreram elevações do nível d'água significativas nestes dois PM's durante o período monitorado, não foi possível aplicar o VNA e estimar a recarga para os mesmos. Isto evidencia a necessidade de um estudo mais completo nestas áreas no sentido de avaliar o comportamento hidrodinâmico dos aquíferos SAG e avaliar a hipótese de estes estarem em regime de semi-confinamento.

5. CONCLUSÕES

A aplicação do método VNA foi possível de ser efetuada na maioria dos PM's pertencentes a rede RIMAS, na bacia do Ibicuí. Destaca-se que, desde o princípio da aquisição dos dados neste programa, trata-se da primeira iniciativa de avaliá-los e de extrair informações hidrogeológicas. Pode-se observar que os PM's situam-se em duas unidades hidroestratigráficas principais, que são Botucatu/Guará e Sanga do Cabral/Piramboia, e que, muito embora estas apresentem características diferenciadas, ambas foram agrupadas no que veio a ser definido como sendo o Sistema Aquífero Guarani (SAG).

Pode-se visualizar que a precipitação na bacia possuiu um gradiente de 500 mm de variação, implicando em precipitação mais elevada a noroeste da bacia, onde situam-se os PM's presentes na Unidade Botucatu/Guará. Foi observado, pelos dados de vazões específicas destes PM's, que a produtividade de poços que captam águas subterrâneas nestas unidades tendem a ser mais elevadas, quando em comparação com a Unidade Sanga do Cabral/Piramboia.

Foi visível neste trabalho que as variações de recarga estão relacionadas com a precipitação, influenciando nos valores encontrados para os diferentes anos de monitoramento. Em praticamente todos os poços, o ano de 2013 foi o que apresentou maior precipitação, ocasionando elevações do nível de água em todos os PMs, inclusive naqueles que apresentaram resposta lenta. Já o ano de 2012 apresentou rebaixamento do nível d'água para a maioria dos PM's, ocasionando nas baixas taxas de recarga encontradas para este ano. Dentre os PM's, dois apresentaram comportamento diferenciado, demonstrando um possível grau de semi-confinamento do aquífero SAG na região, impossibilitando, portanto, a estimativa da recarga.

Para os poços em que foi possível o cálculo da recarga pelo método VNA, encontrou-se valores que variaram entre 417,0 mm a 730,7 mm, para os PM's com período de monitoramento de 27 ou 28 meses, e entre 554,6 mm a 899,0 mm, para os PM's com período de monitoramento de 37 ou 38 meses. Este fato deve-se a um conjunto de variáveis, ora influenciados pela própria dinâmica aquífera local, ora pelas diferenças de precipitação tendo em conta não somente o gradiente de precipitação, como também a existência de séries históricas distintas.

Já para os resultados encontrados de recarga em relação a precipitação, os valores nos PM's variaram entre 11 % e 30 % da precipitação, com média de 16,54 %. De uma maneira geral, os PM's localizados na Unidade Hidroestratigráfica Botucatu/Guará

apresentaram recarga mais elevada, com média correspondente a 15,32 % da precipitação. Na Unidade Hidroestratigráfica Sanga do Cabral/Piramboia, o PM ETA Centro apresentou um valor muito elevado de recarga, o qual pode ter ocorrido devido a proximidade do PM com o rio. Se este valor não for considerado, tem-se uma média de recarga de 11,56 % para a Unidade Hidroestratigráfica Sanga do Cabral/Piramboia. Ambos os valores apresentaram-se coerentes com a precipitação nestas regiões.

Os valores encontrados neste estudo apresentaram resultados similares ou coerentes com outros estudos de estimativa de recarga no mesmo local, o que valida o método em sua aplicação. Em algumas áreas os valores apresentaram-se muito próximos aos calculados por Mattiuzi (2013), o que ressalta a importância da estimativa utilizando-se mais de um método. No caso do método VNA e do escoamento de base, pode-se dizer que são inclusive métodos complementares.

6. RECOMENDAÇÕES

A bacia do Ibicuí apresentou valores de recarga diferenciados, o que pode ocorrer devido a variações devido a outras variáveis hidrogeológicas como topografia, geologia, declividade da superfície do terreno, vegetação, espessura da zona não saturada, entre outros. Mudanças no nível do lençol freático também podem ocorrer por outros motivos além da precipitação, que não foram abordados neste trabalho: evapotranspiração (especialmente para aqueles com nível mais próximo a superfície, mudanças na pressão atmosférica), retenção de ar entre o lençol freático e uma frente úmida que avança para baixo a partir da superfície do solo (mais raro), mudanças na temperatura da superfície, bombeamento de outros poços e outros fenômenos induzidos por atividades humanas, como irrigação e urbanização. Propõe-se então a realização de estudos mais avançados que procurem determinar outras variáveis hidrogeológicas que possam interferir na estimativa da recarga.

A presença de um valor muito elevado de recarga, encontrado para o PM ETA Centro, pode indicar interferência do rio no aquífero. Para estudos futuros, sugere-se uma análise mais detalhada de como ocorre esta interação. Pode-se também utilizar dados fluviométricos para avaliação em outros poços que tenham sua localização próxima a rios, para verificar se também ocorre interação entre o rio e o aquífero nestes poços.

A análise de flutuação diária realizada para o PM Puitã resultou em uma superestimação da recarga, o que indica a necessidade da realização de mais estudos que busquem diferenciar a recarga líquida da recarga bruta, e permitir a realização de comparação entre as mesmas. Como a recarga estimada varia com a escala utilizada na avaliação (diária, mensal, anual), o estudo destas recargas comparativamente poderá também servir de base para avaliações do comportamento de aquíferos.

A impossibilidade do cálculo pelo método VNA para dois PM's evidencia a necessidade da avaliação da área de recarga e de outras características que possam ter influenciado no comportamento destes PM's. Embora eles supostamente encontram-se em áreas onde o SAG se encontra livre, este comportamento diferenciado sugere a ocorrência de um grau de semi-confinamento que deve ser melhor avaliado.

A estimativa do rendimento específico também interfere no cálculo da recarga, podendo inclusive alterar os valores encontrados. Propõe-se trabalhos futuros que busquem determinar o rendimento específico para cada PM, a partir de ensaios de bombeamento, análises laboratoriais ou outro método que permita o cálculo deste parâmetro diretamente dos PM's.

Em relação a curva de recessão antecedente, optou-se pela aproximação linear para determinação dos valores de Δh , entretanto há outras aproximações que podem ser feitas e que poderiam resultar em valores diferentes de recarga. Pode-se realizar, portanto, pesquisas mais aprofundadas de maneira a buscar o melhor método de aproximação para determinar o prolongamento da curva de recessão, podendo-se até utilizar softwares e modelos matemáticos.

Devido a bons resultados encontrados na comparação entre dois métodos de estimativa de recarga, sugere-se a aplicação de outros métodos visando comparar os resultados estimados, desde que respeitando as limitações de cada método e as escalas utilizadas. Pelo método VNA, as estimativas de recarga em cada um dos PM's representam condições locais, cujos valores não necessariamente podem ser extrapolados para uma região maior (como a bacia ou a área de exposição ou afloramento do aquífero). Deve-se ressaltar, entretanto, que os resultados encontrados neste estudo são de caráter preliminar, e que uma série histórica maior pode possibilitar a extrapolação dos valores encontrados, desde que as condições hidrogeológicas sejam similares.

A rede RIMAS, utilizada neste trabalho, encontra-se em ampliação, com sete novos poços já instalados em 2013 e 2014, além dos 11 que já haviam anteriormente na região pertencente ao SAG. A ampliação da rede é de extrema importância para melhor estimativa da recarga nas unidades do SAG aflorante, tanto na bacia do Ibicuí como em outras áreas, pois permitirá resultados ainda mais precisos que podem contribuir futuramente em cálculos de reservas reguladoras do aquífero na região, e servir assim de base para planejamento e gestão da água subterrânea.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA (Agência Nacional das Águas). **Glossário de Termos Hidrológicos**. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb.asp?TocItem=6010>>. Acesso em 4 abr. 2014.

ANA (Agência Nacional das Águas). **Mapa esquemático do Sistema Aquífero Guarani**. Elaborado pela CAS/SRH/MMA (UNPP/Brasil). Brasília: Agência Nacional das Águas, 2001. Escala 1:13.600.000.

ANA (Agência Nacional das Águas). **Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil**. Agência Nacional das águas, Brasília - DF, 2005. 134 p. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/planejamento/estudos/sprtew/2/2-ANA.swf>>. Acesso em 15 abr. 2014

ANA (Agência Nacional das Águas). **Atlas BRASIL. Abastecimento urbano de água**. 2010. Disponível em: <<http://atlas.ana.gov.br/Atlas/downloads/atlas/Resumo%20Executivo/Atlas%20Brasil%20-%20Volume%202%20-%20Resultados%20por%20Estado.pdf>>. Acesso em 20 mar. 2014.

ANA (Agência Nacional das Águas). **Avaliação dos recursos hídricos subterrâneos e Proposição de modelo de gestão compartilhada Para os aquíferos da Chapada do Apodi, entre os estados do Rio grande do Norte e Ceará**. ANA - Programa Nacional de desenvolvimento dos recursos hídricos. Vol. V – Modelo de Gestão. Brasília: ANA, SIP, 2010.

AGUIRRE, C.; FERRARESI, P.; IBÁÑEZ, S. B.; SCHELOTTO, M. L. R. **Síntesis Sistema Acuífero Guarani, Muestras de subsuelo y afloramientos**. Perfíles relevados por P & T Consultoria srl. Argentina-Uruguay-Brasil-Paraguay. Buenos Aires, Junio 2008.

ARAÚJO, L. M.; FRANÇA, A. B.; POTTER, P. E. 1999. **Hydrogeology of the Mercosul aquifer system in the Paraná and Chaco-Paraná Basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget aquifer system, USA**. Hydrogeology Journal, 7(3):317-336.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023: Referências bibliográficas**. Rio de Janeiro: ABNT, ago. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520: Citações em documentos**. Rio de Janeiro: ABNT, ago. 2002.

BERTOL, G. A. **Avaliação de Recarga no Aquífero Bauru no Município de Araguari, Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, UFMG, Belo Horizonte, 2007. Disponível em : <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/MPBB74MN3Y/diss_ertacaogisele.pdf?sequence=1>. Acesso em 10 mar 2014.

BORGHETTI, N. R. B.; BORGHETTI, J. R.; FILHO, E. F. da.R. **Aquífero Guarani: A verdadeira integração dos países do Mercosul**. Curitiba, 2004. 214 p.

BRASIL. **Lei nº 9443, de 9 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 8 jan. 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.HTM>. Acesso em: 20 mar. 2014.

CNRH (Conselho Nacional de Recursos Hídricos). **Resolução nº 22, de 24 de maio de 2002**. Estabelece diretrizes para inserção das águas subterrâneas no instrumento Planos de Recursos Hídricos. CNRH, 2002. Disponível em: <http://www.cnrh.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=14>. Acesso em 25 mar. 2014.

CNRH (Conselho Nacional de Recursos Hídricos). **Resolução nº 30, de 11 de dezembro de 2002**. Define metodologia para codificação de bacias hidrográficas, no âmbito nacional. CNRH, 2002. Disponível em: <http://www.cnrh.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=14>. Acesso em 27 mar. 2014.

COELHO, V. H. R.; ALMEIDA, C. das.N.; SILANS, A. M. B. P. de. **Análise da flutuação do nível d'água para estimativa de recarga subterrânea da bacia representativa do rio Gramame no nordeste brasileiro**. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos - v. 17 n. 2 – Abr/Jun 2012, 241-252. Disponível em: <<http://132.248.9.34/hevila/Revistabrasileiraderecursoshidricos/2012/vol17/no2/20.pdf>>. Acesso em 11 abr. 2014.

COLLISCHONN, W.; FAN, F. 2012. **Defining Parameters for Eckhardt's Digital Base Flow Filter**. Hydrological Processes, 27 (18): 2614-1622.

CPRM/SGB - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil. SIAGAS - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas. Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/index.php>>. Acesso em 20 abr. 2014.

CPRM/SGB - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil. **Mapa Hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul**. 2005. Escala 1:750.000. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/mapa_rio_grande_sul.pdf>. Acesso em 10 mai. 2014.

CPRM/SGB - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil. RIMAS - Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas, 2009. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=35&infoid=1463>>. Acesso em 25 mar. 2014.

CPRM/SGB - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil. **Manual de Cartografia Hidrogeológica**, 2014. Manual de Circulação interna do grupo de Hidrogeologia da CPRM.

DAMBRÓS, C. **Recarga e flutuação do nível da água subterrânea em sub-bacias com floresta e campo nativo**. Dissertação de Mestrado – Pós Graduação em Engenharia Civil e

Ambiental. UFSM - Santa Maria, RS. 2011. Disponível em: <http://w3.ufsm.br/ppgec/wp-content/uploads/Dissertacao_Cristiane_2011.pdf>. Acesso em 15 mar. 2014.

DELIN, G. N.; HEALY, R. W.; LORENZ, D. L.; NIMMO, J. R. **Comparison of local-to regional-scale estimates of ground-water recharge in Minnesota, USA**. Journal of Hydrology, v.334, p.231-249, 2006.

DRH/SEMA. Processo de Planejamento da Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí – Relatório Final. Fevereiro, 2012. Disponível em: <http://www.comiteibicui.com.br/planodabacia/documentos/rtf_ibicui.pdf>. Acesso em 10 abr. 2014.

EILERS, V. H. M. 2004. **Estimativa de Recarga de Águas Subterrâneas Utilizando o Método do Balanço Hídrico**. In: XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Cuiabá/MS, 20p. Disponível em : <<http://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23458>>. Acesso em 30 mar. 2014.

EMBRAPA. **Caracterização das áreas de afloramento do Aquífero Guarani no Brasil – Base para uma proposta de Gestão Sustentável**. Jaguariúna, SP, 2006. Disponível em: <http://www.cnpma.embrapa.br/download/documentos_52.pdf>. Acesso em: 10 abr .2014.

FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M. **Hidrogeologia : Conceitos e Aplicações**. CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 2 ed. 2000. 404 p.

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**. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). São Carlos, 2008. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-28042009-132417/pt-br.php>>. Acesso em 7 abr. 2014.

GÓMEZ, A. A.; RODRÍGUES, L. B. ; VIVES, L. S. **The Guarani Aquifer System: estimation of recharge along the Uruguay-Brazil border**. Hydrogeology Journal, 18 (7) 1667-1684. 2010.

GUN, Jac van der. **Groundwater and global change: Trends, opportunities and challenges**. UNESCO, 2012. Disponível em: <<http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/pdf/Groundwater%20and%20Global%20Change.pdf>>. Acesso em 25 fev. 2014.

HEALY, R. W.; COOK, P. G. **Using groundwater levels to estimate recharge**. In: Hydrogeology Journal. v.10(1). February 2002. Springer-Verlag, Berlin. p 91-109. Disponível em: <http://www.hydrosys.net/myplus/bbs/table/hydrosys_doc/upload/Using%20groundwater%20levels%20to%20estimate%20recharge.pdf>. Acesso em 20 mai. 2014.

HEALY, R.W. **Estimating groundwater recharge**. Cambridge , 2010.

HIRATA, R.; ZOBY, J. L. G.; OLIVEIRA, F. R. de. (2010). **Água subterrânea: reserva estratégica ou emergencial**. In.: Águas do Brasil: Análises Estratégicas - BICUDO, C. E. de M.; TUNDISI, J. G.; SCHEUENSTUHL, M. C. B. Disponível em <<http://www.abc.org.br/IMG/pdf/doc-815.pdf>>. Acesso em 20 mar. 2014.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Censo Demográfico 2000**. Brasil. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/>>. Acesso em 14 mar 2014.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Sistema Aquífero Guarani: Subsídios ao Plano de Desenvolvimento e Proteção Ambiental da Área de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo**. Cadernos do Projeto Ambiental Estratégico Aquíferos, n.5, 2011. 102 p.

LEAL, A. de S. **As águas subterrâneas no Brasil: ocorrências, disponibilidades e usos**. In: FREITAS, Marcos Aurélio Vasconcelos de (org.). **O Estado das Águas no Brasil**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas; Ministério do Meio Ambiente; Secretaria de Recursos Hídricos; Ministério de Minas e Energia. 1999. 334 p.

LERNER, D. N. **Groundwater recharge in urban areas**. Atmos. Environment, 24 B(1), p. 29-33, 1990.

LERNER, D. N.; ISSAR, A. S. e SIMMERS, I. **Groudwater recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge**. International Contributions to Hydrogeology, Vol.8. International Association of Hydrogeolosit, Verlag Heinz Heise, 1990.

MACHADO, J. L. F. **Compartimentação Espacial e Arcabouço Hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul**. São Leopoldo: UNISINOS, 2005. 237 f. : ilustr. Tese – Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Geologia – Área de Concentração em Geologia Sedimentar. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/media/aquifero.pdf>>. Acesso em 22 mai. 2014.

MARTELLI, G. V. **Monitoramento de flutuação de níveis de água em aquíferos freáticos para avaliação do potencial de recarga em área de afloramento do sistema aquífero guarani em Cacequi – RS**. Dissertação de Mestrado. Santa Maria, 2012. Disponível em: <<http://w3.ufsm.br/ppgec/wp-content/uploads/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Guilherme%20Viana%20Martelli.pdf>>. Acesso em 5 mai. 2014.

MATTIUIZI, C. D. P. **Estimativa de recarga a partir da separação de escoamento de base na bacia hidrográfica do rio Ibicuí/RS**. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Ambiental). Porto Alegre, dezembro de 2013.

MAZIERO, T. A.; WENDLAND, E. **Avaliação da recarga subterrânea de bacias urbanas no município de São Carlos, SP**. In: XIV Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, II Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste. 2005. Disponível em: <<http://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23197>> Acesso em 5 abr. 2014.

MMA (Ministério do Meio Ambiente). **Plano Nacional de Recursos Hídricos**. Síntese Executiva - português / Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos.- Brasília: MMA, 2006. 135p. ; 27 cm. + 1 CD-ROM. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/plano-nacional-de-recursos-hidricos>>. Acesso em 28 mar. 2014.

MMA (Ministério do Meio Ambiente). **Caderno da Região Hidrográfica do Uruguai**. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. – Brasília: MMA, 2006. 132p. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/161/_publicacao/161_publicacao03032011023025.pdf> Acesso em 12 mar. 2014.

MOON, S.; WOO, N. C.; LEE, K. S. **Statistical analysis of hydrographs and water-table fluctuation to estimate groundwater recharge**. Journal of Hydrology, 292, p.198-209, 2004.

MOURÃO, M. A. A. **Caracterização Hidrogeológica do Aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte, 2007.

OEA (Organização dos Estados Americanos). **Aquífero Guarani: programa estratégico de ação = Acuífero Guaraní: programa estatégico de acción**.– Edição bilíngüe.– Brasil; Argentina; Paraguai; Uruguai: Organização dos Estados Americanos (OEA), janeiro 2009. 424 p. ISBN: 978-85-98276-07-6. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/projetos/GEFAquiferoGuarani.aspx>>. Acesso em 13 mar. 2014.

OEA (Organização dos Estados Americanos). **Termo de referencia: Projeto Proteção Ambiental e Gerenciamento Sustentável do Sistema Aquifero Guarani**. Curitiba: Global Environmental Facility, Banco Mundial, fevereiro de 2001. 208 p .

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

PARALTA, E. A.; OLIVEIRA, M. M.; LUBCZYNSKI, M. W.; RIBEIRO, L. F. **Avaliação da recarga do sistema aquífero dos Gabros de Beja segundo critérios múltiplos: disponibilidades hídricas e implicações agro-ambientais**. In: Simpósio de hidráulica e recursos hídricos dos países de língua oficial portuguesa, Cabo Verde, 6., 2003. Disponível em: <http://www.itc.nl/library/papers_2003/art_proc/lubczynski_ava.pdf>. Acesso em 12 mar. 2014.

PINTO, E. J. de A.; LIMA, J. do. E. S.; DAVIS, E. G.; SILVA, A. J. da.; DANTAS, C. D. de. O.; CANDIDO, M. de. O.; PALMIER, L. R.; MONTE-MOR, R. C. de. A. **Estimativa da recarga natural do aquífero livre de uma sub-bacia da bacia representativa de Juatuba (MG) aplicado o método da variação dos níveis d'água (VNA)**. In: XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços. São Luís – MA, 2010. Disponível em:

<http://www.cprm.gov.br/publique/media/evento_PAP004229.pdf>. Acesso em 19 mar. 2014.

POEHLS, D. J.; SMITH, G. J. **Encyclopedic Dictionary of Hydrogeology**. Editora Academic Press. 527 p. 2009.

RABELO, J. L. **Estudo da recarga do Aquífero Guarani no sistema Jacaré-Tietê**. Tese de Doutorado (Engenharia Civil). São Carlos, 2006. Disponível em : <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-12022007-155139/pt-br.php>> Acesso em 2 abr. 2014.

REBOUÇAS, A. da. C. **Recursos hídricos subterrâneos da Bacia do Paraná**. Tese (Livro Docência) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1976. 143 p.

REBOUÇAS, A. da.C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 2.ed.rev e ampl. São Paulo: Escrituras, 2002. 702 p.

RIO GRANDE DO SUL (Estado). Secretaria Estadual do Meio Ambiente – SEMA, Conselho de Recursos Hídricos, Departamento de Recursos Hídricos. **1º Plano Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul**. Agosto de 2013. Disponível em : <<http://perh-rs.com.br/>>. Acesso em 17 mar. 2014.

RIO GRANDE DO SUL (Estado). Secretaria Estadual do Meio Ambiente – SEMA, Departamento de Recursos Hídricos (DRH/SEMA); Profill - Engenharia e Ambiente. **Processo de Planejamento da Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí - Fases A e B**. Fevereiro, 2012. Disponível em: <http://www.sema.rs.gov.br/upload/Relat%C3%B3rio_Cenarios_Futuros_e_Enquadramento.pdf>. Acesso em 10 mar. 2014.

ROCHA, G. **O grande manancial do Cone Sul**. Estudos Avançados, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997. v.30, p. 191-213.

SCANLON, B.R.; HEALY, R.W.; COOK, P.G. **Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge**. Hydrogeology Journal, vol 10, nr. 1, February 2002. Springer-Verlag, Berlin. p.18-39. Disponível em : <http://www.beg.utexas.edu/enviro/qly/vadose/pdfs/webbio_pdfs/HJ2002Scanlon&Cook.pdf>. Acesso em 5 mar .2014.

SEILER, K.-P.; GAT, J.R. **Groundwater recharge from run-off, infiltration and percolation**. v. 55. Water Science and Technology Library. USA, 2007. Ed Springer.

SHIKLOMANOV, I. A. **World water resources – a new appraisal and assessment for the 21st century**. Paris: International Hydrological Programme/ONU, 1998. 37 p. Disponível em: <<http://www.ce.utexas.edu/prof/mckinney/ce385d/papers/shiklomanov.pdf>>. Acesso em 15 mar 2014.

SILVA, J. L. S. da.; FARIAS, P. V. da C. **Estimativa de recarga de água subterrânea em microbacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim**. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE

RECURSOS HÍDRICOS, 20. Bento Gonçalves, 2013. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/9b720b6f30120503c09c0749ec72d277_f9d8335346ed7dc951a9f088cdf67c9b.pdf>. Acesso em 29 mar. 2014.

STRUCKMEIER, W. F.; MARGAT, J. **Hydrogeological Maps: A Guide and a Standard Legend**. Hannover: International Association of Hydrogeologists, 1995. International contributions to hydrogeology, v. 17.

UNESCO – WWPA. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o desenvolvimento dos recursos hídricos 4 : o manejo dos recursos hídricos em condições de incerteza e risco**. Brasília - DF, 2012. Disponível em: <<http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002154/215491por.pdf>>. Acesso em: 05 mar. 2014.

VASCONCELOS, S. M. S. **Avaliação da recarga subterrânea através da variação do nível potenciométrico no Aquífero Dunas/Paleodunas**. Fortaleza, Ceará. 2005. In: RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 10, n. 2 ,abr/jun 2005, 49-57. Disponível em :<http://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/1340ff15a70c177b9bf7e226aa743e95_3259f1f85c27944d05ff33c27202a3e5.pdf>. Acesso em 25 mar 2014.

WAHNFRIED, I; HIRATA, R. **Comparação de Métodos de Estimativa de Recarga de Aquíferos em Uma Planície Aluvionar na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (São Paulo)**. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 10 n;2 Abr/Jun 2005, 15-25. Disponível em : <http://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/0723686259e3d7c357d57b65b57ca19_2_5787df31f3842af5edb9866292ed20fe.pdf>. Acesso em 25 mar 2014.