**Universidade de São Paulo
Instituto de Geociências**

**Programa de Pós-Graduação em Geociências
– Recursos Minerais e Hidrogeologia –**

**Subsídios para o manejo do Sistema Aquífero Guarani em São José do
Rio Preto (SP)**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Marcus Sangiorge Ucci

Orientador: Prof. Dr. Ricardo César Aoki Hirata

São Paulo 2015

DEDICATÓRIA

À minha família

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus e à minha família pelo que sou hoje. Sou grato por toda paciência e dedicação com as quais vocês me ajudaram em todos os caminhos que escolhi, tenham sido eles de alegria, comemorando ao meu lado, ou de tristeza, me apoiando e me reconfortando. Especialmente, agradeço ao meu irmão Vinicius Sangiorge Ucci pelo auxílio na confecção de diversas figuras presentes nessa dissertação.

Agradeço ao Prof. Dr. Ricardo Hirata pela orientação, ensino e paciência, além da compreensão e incentivo nos momentos difíceis.

Agradeço ao Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), agência de Araraquara, nas pessoas do Engº Reinaldo de Jesus Passerini e do Geól. José Luiz Galvão de Mendonça, pelo auxílio na aquisição dos dados dos poços que embasaram o estudo.

Agradeço ao Programa de Pós-graduação em geologia Sedimentar e Ambiental do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo por toda a infraestrutura colocada a disposição para a realização desse trabalho.

Agradeço aos meus colegas e amigos do Laboratório de Modelos Físicos (LAMO) do Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas (CEPAS) Rafael Terada, Bruno Pirilo, Ana Maciel, Sandra Procel, Jonathan Batista, Jorge Peñaranda e Ricardo Saito pelas diversas contribuições técnicas por meio de papos e conversas do dia-a-dia do laboratório. Um especial agradecimento ao Paulo Galvão pelo essencial auxílio dado no período da qualificação. E um agradecimento adicional ao meu amigo Engº Fabio Costa pela ajuda na edição e formatação dessa dissertação.

E finalmente, agradeço a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram de alguma forma para que esse trabalho pudesse ser realizado.

RESUMO

No Estado de São Paulo, o Sistema Aquífero Guarani (SAG) tem uma extensão de 155.800 km², dos qual 90% encontram-se sob condições de confinamento. Somente os poços de São Paulo representam mais de 80% da vazão explorada de todo o SAG. As porções confinadas do SAG são caracterizadas por águas antigas (>10 mil anos), resultado da restrita recarga vertical através dos basaltos da Formação Serra Geral e longos tempos de trânsito das águas desde as zonas de afloramento. Com isso, a exploração na zona confinada implica na utilização de água subterrânea não renovável em escala de tempo humano, resultando em um caráter de extração de “lavra” em um modelo que se aproxima ao de Theis (água provida do armazenamento). Para avaliar se cidades abastecidas pelo SAG poderiam ter restrições na sua exploração, uma modelação numérica preliminar foi conduzida no aquífero em São José do Rio Preto (SP) permitindo concluir que: a) o nível atual de extração de 68.700 m³/dia, a partir de 8 poços de abastecimento público, poderá ser mantido por mais de 500 anos; b) seria possível incrementar a vazão dos poços em mais de cinco vezes, sem que o mesmo apresente exaustão. Embora os resultados sejam bastante promissores, notou-se que a modelação é bastante sensível às incertezas dos dados hidráulicos do SAG. Variações de uma ordem de magnitude da condutividade hidráulica e/ou no coeficiente de armazenamento mostraram que as vazões atuais poderiam ser mantidas por longo tempo, entretanto não permitiriam produções nos cenários de aumento de extração como simulados.

ABSTRACT

In São Paulo, the Guarani Aquifer System (GAS) has an area of 155,800 km², of which 90% are under confined conditions. Only the wells of São Paulo represent over 80% of the exploited output of the entire SAG. The confined portions of the SAG are characterized by ancient waters (> 10,000 years), resulting from restricted vertical recharge through the basalts of the Serra Geral Formation and long transit times of the waters from the outcrop zones. Thus, the exploitation in the confined zones implies the use of non-renewable groundwater in human time scale, resulting in an extraction mode of "mining" in a model that is similar to Theis (water from the storage). To evaluate if cities supplied by GAS might have restrictions on their exploitation, a preliminary numerical modeling was conducted in the aquifer in São Jose do Rio Preto (SP) allowing to conclude that: a) the current level of extraction of 68,700 m³/day, through 8 wells of public supply, can be maintained for over 500 years; b) it would be possible to increase the exploited volume of water over the wells five times without it presents exhaustion. Although the results are promising, it was noted that the modeling is very sensitive to the uncertainties of hydraulic data of the GAS. Variations in an order of magnitude of the hydraulic conductivity and/or storage coefficient showed that the current output could be maintained for a long time, although not allow the extraction yields increase as simulated scenarios.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa esquemático do SAG dentro da Bacia do Paraná (OEA, 2009).	15
Figura 2: Zoneamento básico para gestão do SAG (OEA, 2009).....	24
Figura 3: Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo.....	26
Figura 4: Potenciometria do SAG no Estado de São Paulo (DAEE, IG, IPT, CPRM, 2005).....	30
Figura 5: Poços do SAG em São José do Rio Preto.	38
Figura 6: Compilação das seções geológicas da área de estudo.	57
Figura 7: Perfil Geofísico em Gama (Coluna 1), R (Coluna 2) e SP (Coluna 3) do poço Palácio das Águas (destaque quadriculado para as zonas com maior porção argilosa).....	59
Figura 8: Mapa Potenciométrico do SAG na área de estudo.	60
Figura 9: Relação entre capacidade específica (Q/s) e transmissividade (T) dos poços tubulares do SAG em São José do Rio Preto.....	62
Figura 10: Modelo Conceitual Geral do SAG.	63
Figura 11: Desenho da malha básica do modelo	65
Figura 12: Representação leste-oeste da distribuição das camadas, respectivamente representando o Aquitarde Serra Geral, o Aquífero Botucatu, o Aquífero Pirambóia e o Aquitarde Passa Dois.	66
Figura 13: Poços de bombeamento localizados na área (detalhe do modelo). 66	
Figura 14: Representação leste-oeste da distribuição das condutividades hidráulicas (k) nas camadas.....	67
Figura 15: Zonas de armazenamento e porosidade do modelo.	68
Figura 16: Representação das cargas constantes de borda. Poços de bombeamento ao centro.	70
Figura 17: Linhas equipotenciais resultantes no modo estacionário (à esquerda sem bombeamento e à direita com bombeamento).	71
Figura 18: Balanço de massa no modo estacionário para um período de 100 anos.	72
Figura 19: Mapa de cargas equipotenciais resultantes no modo transiente em 100 anos simulados.	72

Figura 20: Evolução do balanço de massa ao longo do tempo com o bombeamento.	73
Figura 21: Evolução das cargas equipotenciais para bombeamento de até 500 anos.	74
Figura 22: Cenário de exploração com 16 poços em 100 anos de bombeamento.	75
Figura 23: Cenário de exploração com 24 poços em 100 anos de bombeamento.	75
Figura 24: Cenário de exploração com 40 poços em 100 anos de bombeamento.	76
Figura 25: Cenário de aumento dos valores da condutividade hidráulica das camadas 2 e 3 em uma ordem de magnitude.	77
Figura 26: Cenário de redução dos valores da condutividade hidráulica das camadas 2 e 3 em uma ordem de magnitude.	77
Figura 27: Cenário de aumento dos valores do armazenamento das camadas 2 e 3 em uma ordem de magnitude.....	78
Figura 28: Balanço de massa em três intervalos modelados (10, 50 e 100 anos) considerando cenário de aumento no valor de S.	79
Figura 29: Cenário de diminuição dos valores do armazenamento das camadas 2 e 3 em uma ordem de magnitude.....	79
Figura 30: Balanço de massa em dois intervalos modelados (10 e 100 anos) considerando cenário de diminuição no valor de S.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Subdivisão estratigráfica revisada do SAG (Foster et al., 2009 e OEA, 2009).	16
Tabela 2: Cálculo da reserva estática armazenada no SAG (OEA, 2009).	22
Tabela 3: Perfil estratigráfico compilado (Sracek e Hirata, 2002 e OEA, 2009).	28
Tabela 4: Características hidráulicas das unidades hidrogeológicas que compõem o SAG no Estado de São Paulo (Araújo, França e Potter, 1999; Sracek e Hirata, 2002; OEA, 2009; Hirata et al., 2011).	31
Tabela 5: Características hidráulicas das unidades hidrogeológicas que se dispõem sobrejacente e subjacente ao SAG no Estado de São Paulo (Araújo, França e Potter, 1999; Sracek e Hirata, 2002; DAEE, IG, IPT, CPRM, 2005; Iritani e Ezaki, 2009; Hirata <i>et al.</i> , 2011).	31
Tabela 6: Características químicas da água subterrânea do SAG no Estado de São Paulo (Gastmans, Chang, Hutcheon, 2010).	33
Tabela 7: Velocidade real de fluxo média para o SAG confinado na região norte do Estado de São Paulo (nef Botucatu = 0,25 e nef Pirambóia = 0,15).	61
Tabela 8: Parâmetros de cada camada do SAG na área de estudo adotados no Modelo Conceitual.....	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Justificativa.....	12
2	OBJETIVOS	13
3	O SISTEMA AQUÍFERO GUARANI.....	14
3.1	Reservas Aquíferas do SAG	21
3.2	O Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo.....	26
3.2.1	Geologia do SAG	27
3.2.2	Aspectos hidrogeológicos.....	28
3.2.3	Aspectos hidroquímicos.....	31
3.2.4	Recarga profunda do SAG	33
3.2.5	Uso da água subterrânea do SAG no Estado de São Paulo	34
4	MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1	Estudo de trabalhos sobre o SAG no Estado de São Paulo, com ênfase nos dados do Projeto Sistema Aquífero Guarani.....	36
4.2	Avaliação da base de dados do DAEE em Araraquara.....	37
4.3	Processamento dos dados.....	39
4.4	Modelo Conceitual de Fluxo	39
4.5	Modelo Numérico de Fluxo de Águas Subterrâneas	39
4.6	Estabelecimento de recomendações para o uso e gestão da água subterrânea no SAG confinado.....	42
5	GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS NÃO RENOVÁVEIS	43
5.1	<i>Embasamento técnico e exemplificação</i>	<i>43</i>
5.1.1	Theis.....	43
5.2	<i>Gestão de recursos hídricos</i>	<i>49</i>
5.3	<i>Direitos para a exploração de água subterrânea.....</i>	<i>50</i>

5.4	<i>Recursos hídricos subterrâneos não renováveis</i>	51
5.5	<i>Condições para exploração desses recursos</i>	52
5.6	<i>Conhecimentos do sistema para a gestão adequada</i>	53
5.7	<i>Considerações socioeconômicas para a gestão</i>	54
5.8	<i>Arranjo institucional para o uso socialmente sustentável</i>	55
6	MODELO CONCEITUAL DE FLUXO	57
7	MODELO NUMÉRICO DE FLUXO	64
7.1	Desenho da malha do modelo	64
7.2	Poços de bombeamento	66
7.3	Atribuição e distribuição das propriedades hidráulicas	66
7.3.1	Condutividade hidráulica	67
7.3.2	Armazenamento e porosidade	67
7.4	Carga hidráulica inicial	68
7.5	Condições de contorno	69
7.6	Calibração	70
7.7	Resultados obtidos	71
7.7.1	Simulação de cenário de exploração até 500 anos	73
7.7.2	Simulação de cenário de exploração com mais poços de bombeamento	74
7.7.3	Testes de sensibilidade do modelo	76
8	ANÁLISE DOS CENÁRIOS DE MANEJO	81
9	CONCLUSÕES	84
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
	ANEXO A	93
	ANEXO B	99

1 INTRODUÇÃO

O Sistema Aquífero Guarani (SAG) constitui um dos mais importantes reservatórios de água subterrânea do território brasileiro, sendo transfronteiriço e estendendo-se também por territórios argentinos, paraguaios e uruguaios. Abrange quase toda a Bacia Sedimentar do Paraná, com uma área total de 1.087.879 km² (Gastmans *et al.*, 2012) dos quais 155.800 km² encontram-se no Estado de São Paulo (OEA, 2009). Cerca de 90% dessa área do Sistema encontram-se sob condições de confinamento em território paulista.

Esse manancial dispõe de um volume total de água de aproximadamente 30.000 km³ (Foster *et al.*, 2009), dos quais apenas 50 km³ estaria disponível na zona confinada. A água é armazenada principalmente na porosidade primária de arenitos das Formações Botucatu (Guará) e Pirambóia (Caturrita e Santa Maria), no Brasil, e das formações Misiones, no Paraguai, ou Tacuarembó, na Argentina e Uruguai. Essas formações aquíferas estão dispostas abaixo de camadas de basaltos com espessuras variáveis, assim como de sedimentos relacionados a coberturas cenozóicas indiferenciadas (Gastmans, 2007). Abaixo, são sotopostas por siltitos e argilitos que configuram um aquítarde basal.

Por meio da estrutura e da compartimentação das rochas, o ambiente de deposição provável para as formações que compõem o SAG em território nacional seria o de lençóis de dunas eólicas com interdunas úmidas localmente intercaladas com depósitos fluviais (Strugale *et al.*, 2004). Essas unidades são descritas como associações de arenitos finos, subordinadamente finos a médios, com arenitos finos siltosos.

As zonas de recarga do SAG, associadas às áreas de afloramento das formações que o compõem, se encontram distribuídas predominantemente pelas bordas do Sistema. No Estado de São Paulo, essas faixas de afloramento representam cerca de 16.000 km² (Gastmans, 2007). Portanto, aproximadamente 90% da área paulista do SAG encontra-se em condições de confinamento.

Segundo Gómez (2007), mais de 15 milhões de pessoas habitam a área do SAG, onde o aquífero está sendo cada vez mais explorado, constituindo uma

das principais fontes de água potável para abastecimento público, assim como para usos industriais, agropecuários e recreativos.

Com o desenvolvimento econômico alcançado por essas áreas nos últimos anos, a intensificação da exploração do recurso mostra-se vantajosa, já que trata-se de um recurso mais protegido contra poluição antrópica do que as águas superficiais e não está sujeito a grandes oscilações devido a mudanças climáticas pontuais. Contudo, o uso intensivo e a superexploração da água podem ocasionar em complicações no aproveitamento ótimo do recurso.

Particularmente, em relação às zonas de maior confinamento do SAG, ou seja, onde ele encontra-se subjacente a camadas muito espessas de basalto e coberturas sedimentares mesozoicas e cenozoicas, a recarga do sistema constitui um problema preocupante. Essa situação de forte confinamento define uma recarga direta do sistema praticamente nula. A recarga dá-se basicamente devido à carga quase nula de fluxo vertical descendente das formações sobrejacentes e ao fluxo subterrâneo de água proveniente das áreas de recarga, o qual demora dezenas a centenas de milhares de anos para alcançar as zonas mais profundas do SAG.

Com isso, a exploração do SAG nessas regiões implica na utilização de água subterrânea não renovável em escala de tempo humano (OEA, 2009), atribuindo um caráter de “de lavra” à exploração do recurso hídrico.

1.1 Justificativa

No Estado de São Paulo, destaca-se a importância do SAG no abastecimento público e agroindustrial de água. Ele é responsável por 80% de todo o volume explorado do recurso. Cerca de 67% desse total é utilizado para abastecimento público, 22% para processos industriais, 6% para uso doméstico, 3% em atividades agropecuárias e 2% para estâncias de águas geotérmicas e atividades recreativas gerais (Santos, 2009).

Em muitos municípios do estado, a captação de água superficial é limitada, seja pelo alto custo, poluição do recurso (vulnerabilidade) e/ou distância do centro consumidor. Essas razões, junto às características ótimas de exploração do SAG, vêm tornando o recurso responsável por parcelas significativas do abastecimento estadual de água.

Contudo, a limitação na caracterização da área do SAG onde ele é considerado como um aquífero confinado profundo é grande, o que resulta em uma exploração desordenada do recurso, sem uma estratégia eficiente e planejada. Portanto, a contribuição para a caracterização do gerenciamento de um aquífero em regime de exploração “de lavra” também evidencia a importância deste trabalho, sendo que esse tipo de estudo nunca foi realizado no país.

Visando a proposição de estratégias de gestão que orientem para boas práticas de aproveitamento dos recursos do SAG, objetivou-se o desenvolvimento de um modelo conceitual de fluxo das águas subterrâneas do SAG e posterior idealização e confecção de um modelo numérico de fluxo, os quais constituem ferramentas e técnicas que podem auxiliar decisões importantes para esse planejamento.

É importante citar que, devido à escassez de trabalhos de gerenciamento de aquíferos confinados em regime de exploração de lavra no país este trabalho pode ser encarado como uma primeira tentativa para auxiliar na gestão das águas deste tipo de aquífero no país.

2 OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa foi o de identificar problemas que a cidade de São José do Rio Preto poderia enfrentar devido à extração continuada da porção confinada do Sistema Aquífero Guarani, bem como no estabelecimento de um programa de manejo apoiado em modelação numérica de fluxo.

3 O SISTEMA AQUÍFERO GUARANI

O Sistema Aquífero Guarani (SAG) é um importante sistema hidrogeológico localizado principalmente na bacia do rio Paraná no Brasil (70% da sua área), Paraguai (6%), Uruguai (5%) e Argentina (19%).

A Bacia Sedimentar do Paraná compreende cerca de 7.000 m de rochas ígneas e sedimentares acumuladas em ciclos tectônico-sedimentares em regimes transgressivos e regressivos, separados por inconformidades em grandes escalas (Milani *et al.*, 1994).

A geometria, compartimentação e arquitetura das camadas sedimentares da bacia, da qual o SAG é composto, são delimitadas, ao norte, pelos Arcos de Canastra e São Vicente; a oeste, pelo Arco de Assunção e o Arco Pampeano/Punta; e ao sul, pelo Arco do rio da Prata. No interior da bacia, há também importantes elementos estruturais, como o Arco de Ponta Grossa (condicionante importante na divisão do sistema em dois ambientes de fluxo distintos, um ao norte e outro ao sul), o Arco do rio Grande e o Sinclinal de Torres (OEA, 2009) (Figura 1).

O SAG possui uma espessura média de 250 m, podendo variar entre 50 e 600 m, e alcança profundidades superiores a 1.000 m (Rocha, 1997) e é composto por uma sequência de camadas de arenitos quartzosos de idade triássico-jurássica, formadas por processos eólicos, fluviais e lacustres (Gilboa *et al.*, 1976), a partir da erosão regional de rochas permotriássicas (250 milhões de anos), que delimita estratigraficamente a base do SAG, pois é identificada em grande parte da Bacia do Paraná. Isso define um critério operacional, definido por Gastmans (2007), que implica no reconhecimento dessa discordância regional que coloca o SAG em contato com litologias subjacentes de características hidrodinâmicas diversas, como os argilitos e siltitos das formações Corumbataí e Estrada Nova. Na maior parte de sua extensão, o SAG é sobreposto por rochas basálticas que podem exceder espessuras de 1.000 m.

- 88 – 65 milhões de anos: deposição do Grupo Bauru em condições de clima semi-árido;
- Discordância Erosiva;
- 15 milhões de anos: “Rejuvenescimento” da Serra do Mar durante a Orogenia Andean, com continuidade do fluxo para oeste (intensificação dos eventos chuvosos);
- Contínuo soerguimento e aumento do gradiente, viabilizando o fluxo d’água subterrânea para oeste, com aumento das chuvas, durante o Terciário tardio e Quaternário.

Uma vez que trata-se de um corpo hídrico subterrâneo transfronteiriço, as formações que compõem o SAG recebem diferentes denominações ao longo de sua distribuição espacial. Os agrupamentos geológicos estão apresentados na Tabela 1, de acordo com suas respectivas nacionalidades.

Tabela 1: Subdivisão estratigráfica revisada do SAG (Foster et al., 2009 e OEA, 2009).

País	URUGUAI	ARGENTINA	PARAGUAI	BRASIL			
BACIA SEDIMENTAR	Norte	Chaco-Paraná	Paraná	Paraná			
				Sul	Central	Norte	
PÓS-SAG	Fm. Arapey	Fm. Serra Geral (Curuzú Cuatiá)	Fm. Alto Paraná	Fm. Serra Geral			
		Fm. Posadas/Solari					
SAG	Fm. Tacuarembó (Membro Superior)	Fm. Misiones ou Tacuarembó	Fm. Misiones	Fm. Botucatu	Fm. Botucatu		
				Fm. Guará			
	DISCORDÂNCIA REGIONAL JURÁSSICA						
	(Triássico)	Fm. Itacumbú (Membro Inferior)	Fm. Misiones ou Tacuarembó	Fm. Misiones	Fm. Caturrita	Fm. Pirambóia	
					Fm. Santa Maria		
DISCORDÂNCIA REGIONAL PERMO-TRIÁSSICA							
PRÉ-SAG	Fm. Buena Vista	Fm. Buena Vista	Fm. Tacuary	Fm. Sanga do Cabral	Fm. Corumbataí		
			(Gr. Independência)		Fm. Rio do Rasto		

O SAG é delimitado em três domínios hidrogeológicos por feições estruturais pertencentes à Bacia Sedimentar do Paraná. Estas estruturas geológicas

exercem o controle da espessura e profundidade do aquífero, e influencia o fluxo de água subterrânea regional.

Devido a estes condicionantes, o fluxo de água subterrânea regional parte das principais áreas de recarga, geralmente nas bordas do sistema, em direção às bacias estruturais mais profundas, e subsequente fluxo para sul, paralelo ao eixo principal da Bacia do Paraná.

Segundo Campos (2000), o SAG se define hidrogeologicamente como uma unidade predominantemente confinada de arenitos com uma condutividade hidráulica de 0,2 a 4,6 m/dia, a qual diminui em profundidade devido ao aumento na proporção argilosa da matriz rochosa.

De acordo com Araújo, França, Potter (1999), os depósitos flúvio-lacustres de idade triássica da Formação Pirambóia, que constituem a base do SAG, possuem porosidade média de 14 a 24% distribuídos por uma espessura média de 139 m, e valores de condutividade hidráulica da ordem de 1,9 m/dia.

Já os depósitos areníticos eólicos de idade cretácea da Formação Botucatu apresentam porosidade média de 17 a 30%, distribuídos por 138 m de espessura média, e valores de condutividade hidráulica média de 8,7 m/dia (Araújo, França, Potter, 1999). Este último pacote sedimentar constitui a camada de melhor fluxo hídrico do sistema, possuindo taxas de transmissividade de 2,4 a 552 m²/dia.

As características sedimentares destes depósitos eólicos típicos, como a ausência de matriz argilosa nos arenitos, o bom grau de seleção dos grãos, e a alta porosidade primária (até 40%), proporcionam que as rochas dessa formação representem excelentes reservatórios para água subterrânea (Hirata *et al.*, 2011).

As principais zonas de recarga regional para as águas do sistema estão, da mesma forma que para a descarga, associadas às faixas de afloramento, no qual o gradiente hidráulico varia entre 3 e 5 m/km.

Em direção ao centro das bacias sedimentares, as águas do SAG tornam-se progressivamente mais confinadas, devido ao aumento das espessuras dos basaltos sobrepostos (Foster *et al.*, 2009), até alcançar essas zonas de confinamento do aquífero, onde o gradiente hidráulico tende a ser menor que 0,1 m/km, as águas adquirem diversas características hidroquímicas, principalmente devido: ao seu tempo de trânsito; às trocas catiônicas de Ca²⁺,

que ocorrem desde as águas das zonas de recarga até as águas das zonas confinadas profundas ricas em Na^+ , com significantes concentrações de Cl^- e SO_4^{2-} ; e à relação da percolação da água por meio da matriz rochosa (Sracek e Hirata, 2002).

Apesar dos valores relativamente altos de condutividade hidráulica do sistema (da ordem de 5 a 10 m/dia), os baixos valores de gradientes hidráulicos citados anteriormente, principalmente do aquífero confinado, resultam em velocidades de fluxo da água subterrânea muito baixas (menores que 0,5 m/ano). Isso resulta em um longo tempo de circulação da água no sistema, favorecendo as modificações hidroquímicas.

Estas modificações permitem a classificação hidroquímica das águas do SAG em quatro zonas distintas (OEA, 2009):

- I. Águas do Tipo A/Zona I: Geralmente potáveis, bicarbonatadas cálcicas e subordinadamente bicarbonatadas calco-magnésicas e calco-sódicas. Possuem pouca mineralização e baixas taxas de condutividade elétrica ($< 150 \text{ mS/cm}$). Possuem pH em torno de 4 a 8. Constituem uma pequena evolução hidroquímica e composição próxima às águas de recarga. Estas estão localizadas próximas à faixa de afloramentos, contornando a zona de confinamento do SAG. Sua largura é variável, obtendo sua maior extensão na região oeste do sistema (150 km).
- II. Águas do Tipo B/Zona II: Geralmente potáveis, bicarbonatadas sódicas, com maior graus de mineralização e taxas de condutividade elétrica médias (entre 200 e 600 mS/cm). Possuem pH em torno de 7 a 10. A alcalinidade aumenta progressivamente à medida que torna-se dominante o processo de troca iônica. Pode possuir uma proporção salina na mistura de $< 1\%$. É a evolução hidroquímica das águas do tipo A. Estão localizadas em áreas intermediárias do setor confinado do SAG, e em uma subzona localizada ao longo do rio Uruguai, onde as águas são caracterizadas pela presença de cloreto.
- III. Águas do Tipo C/Zona III: Composição oscila entre bicarbonatadas, sulfatadas e cloretadas sódicas, e cloradas-sódicas ou sulfatadas-sódicas. Mineralização entre média e alta com taxas de condutividade elétrica maiores que 550 mS/cm. Possuem pH em torno de 7 a 9. Representa uma mistura de águas do tipo B com águas mais

salinizadas, provenientes de aquíferos sotopostos ao SAG. São as mais salinas de todas as classificadas em OEA (2009). Estão localizadas onde o SAG encontra-se altamente confinado, geralmente no centro da bacia (como em São Paulo e em Santa Catarina, no Brasil).

- IV. Águas do Tipo D/Zona IV: Possivelmente, são águas cloretadas sódicas com alta mineralização. Os perfis geofísicos mostraram baixas taxas de resistividade elétrica ($< 2\Omega\text{m}$) e altíssimas condutividades elétricas ($> 10.000 \text{ mS/cm}$). Foram caracterizadas indiretamente por meio de perfis geofísicos de poços de petróleo argentinos.

Anomalias hidroquímicas também foram evidenciadas por diversos autores, localizadas em regiões específicas do corpo hídrico do SAG. As de maior destaque são as que concernem ao arsênio e ao flúor (Silva *et al.*, 2002). Ao longo do corredor termal do rio Uruguai, entre Argentina, Brasil e Uruguai, foram descritas diversas ocorrências de arsênio nas águas subterrâneas próximas a este limite sul do SAG (Gastmans *et al.*, 2010), algumas vezes acima dos limites de potabilidade.

O arsênio ocorre, nessa região, associado a águas alcalinas ricas em sódio (Águas do Tipo B/Zona IIA), com pHs próximos ou superiores a 8. A fonte deste arsênio está associada, segundo Gastmans *et al.* (2010), à intensa atividade magmática do final do Permiano e início do Triássico, que liberou o material vulcânico identificado nas unidades subjacentes ao SAG, aos quais frequentemente estão associados concentrações anômalas de arsênio.

Outra grande anomalia hidroquímica estudada no SAG refere-se à ocorrência de flúor (F^-). Silva *et al.* (2002) estudaram a origem desse elemento nas proximidades da depressão central gaúcha, no Brasil. Este avaliou, a partir da espacialização das ocorrências de flúor em águas subterrâneas acima do VMP (valor máximo permitido), que o processo de caolinização da matriz das rochas sedimentares que contem minerais alteráveis como micas, feldspatos, anfibólios e piroxênios pode ser uma fonte primária de concentrações mais elevadas de flúor nas águas subterrâneas. A substituição local no pacote sedimentar contendo flúor de hidroxiapatitas por flúorapatitas também disponibiliza o íon fluoreto na água subterrânea de circulação no meio rochoso.

Silva *et al.* (2002) destacam adicionalmente a atuação de diques relacionados a eventos tardios da Fm. Serra Geral, que podem ter disponibilizado F^- para as

rochas seccionadas pela estrutura intrusiva ou ainda atuando como barreira hidráulica no sistema. Este semiconfinamento local do SAG poderia ter gerado regiões de água subterrâneas mais mineralizadas, podendo assim liberar F^- para circulação hídrica por meio do intemperismo.

De acordo com a ideia de que as rochas intrusivas da Fm. Serra Geral são uma possível origem das contaminações de flúor no SAG, Frank *et al.* (2007) discorrem sobre o modelo de que durante a desgaseificação do episódio vulcânico Serra Geral, a rocha basáltica reteve flúor em taxas superiores a 60%. A partir disso, as intrusivas Serra Geral, quando do ato de sua extrusão (devido à perda de voláteis pela desgaseificação), tem o potencial de liberar mais de 2 Gt de ácido fluorídrico para dentro dos aquíferos da Bacia do Paraná, constituindo-se em fontes localmente poderosas de flúor, com a possibilidade de contaminar até o SAG.

Ocorre ainda a proposição de um evento hidrotermal de grande porte e longa duração devido a este grande volume de HF e outros voláteis. Apesar da dissipação de boa parte dessa massa volátil na superfície da bacia, volumes menores e localizados desta podem ter sido retidos e gradativamente liberados por falhamentos ao longo dos diques da Fm. Serra Geral, que conectam os aquíferos profundos confinados aos superiores (Frank *et al.*, 2007).

Outra possibilidade para a ocorrência do flúor nas águas do SAG deve-se ao fato da ocorrência de misturas com águas salinas das formações pré-SAG. O flúor encontra-se associado a águas mais salinas, quentes e com relações Na/Cl próximas a 1. Isso sugere que sua principal fonte esteja nas formações salobras do pré-SAG (OEA, 2009).

Em termos de hidrotermalismo, na maior parte de sua área confinada, a temperatura da água varia de 35 °C a 55 °C. As máximas registradas são de aproximadamente 65 °C, mas há áreas limitadas nas quais a temperatura pode chegar a 80 °C (OEA, 2009).

É importante salientar que os dados de condutividade hidráulica do SAG citados em muitos trabalhos não consideram para seus cálculos a densidade da água e a correção da viscosidade em relação à temperatura. A água, nas zonas confinadas muito profundas, possui temperaturas da ordem de 60 °C. A essa temperatura, os valores de viscosidade e de densidade calculados são errôneos, se considerada uma temperatura de 25 °C. Considerando este efeito,

os valores relatados para a condutividade hidráulica nas zonas altamente confinadas do aquífero são sempre superestimados (Sracek e Hirata, 2002).

É importante ressaltar que o SAG, em quase toda a sua extensão, é um sistema funcionalmente “controlado pelo armazenamento” com águas muito antigas, da ordem de dezenas de milhares de anos, as quais alcançaram o limite de aplicabilidade do método de datação de ^{14}C em algumas amostras da zona confinada profunda, próximas ao rio Paraná (Hirata *et al.*, 2011).

De acordo com Gastmans *et al.* (2012), as razões isotópicas das águas subterrâneas do SAG apresentam valores de $\delta^{18}\text{O}$ que variam entre -4,3 até -10,2 e de $\delta^2\text{H}$ que variam entre -31 até -72. Em teoria, de acordo com a reta meteórica global, as águas atmosféricas possuem valores mais positivos desses isótopos. Percebeu-se então que os valores mais enriquecidos tendem a aproximar-se dos valores observados nas águas coletadas próximas das áreas de recarga, enquanto os mais empobrecidos referem-se à água da parte confinada e profunda do sistema. Isso representa uma assinatura isotópica das águas subterrâneas indicativo do fluxo no aquífero.

Adicionalmente, isso indica que a recarga destas águas deu-se sob condições climáticas distintas ao longo do tempo, o que representaria uma variação espacial em relação às suas zonas de recarga.

Aravena (2009) indica ainda águas cujas análises pelo método de $\delta^{14}\text{C}$ apresentam idades superiores a 35.000 anos. Elas estariam associadas às águas que possuem os valores mais negativos de $\delta^{18}\text{O}$ de todo o SAG, nas regiões mais confinadas do sistema.

Essas verificações isotópicas, junto aos dados hidrogeológicos e hidroquímicos, contribuíram para o aperfeiçoamento do entendimento do fluxo de água subterrânea do SAG.

3.1 Reservas Aquíferas do SAG

Segundo a OEA (2009), há dois tipos de reservas de água subterrânea: as (i) Reservas Ativas que representam o volume de água renovável que entra anualmente no aquífero. Elas variam de acordo com a recarga sazonal e estão disponíveis para exploração. São fundamentais nas porções de aquífero livre; e

as (ii) Reservas Estáticas que representam a quantidade total de água armazenada no reservatório.

As reservas estáticas, relevantes para este trabalho, podem ser divididas em duas porções: aquela passível de drenagem, onde se encontra a água que pode ser drenada pela ação da gravidade; e a parcela de compressão, na qual o armazenamento deve-se à compressão do aquífero e da expansão da água. Trata-se de uma reserva não renovável, a qual funciona em regime de exploração “de lavra da água subterrânea”.

A reserva ativa do SAG, diretamente relacionada às áreas de afloramentos das formações Botucatu/Pirambóia, somam 124.650 km³. Aproximadamente 64% desse total encontra-se disponível em áreas de recarga.

Os excedentes hídricos no SAG variam de 350 – 450 mm/ano na região norte a 650 – 750 mm/ano na região sul do sistema. A partir desses valores, o excedente hídrico gerador da recarga profunda não ultrapassa 10 a 20 mm/ano (OEA, 2009). Portanto, os volumes de recarga resultantes seriam da ordem de 0,8 a 1,4 km³/ano de água.

A reserva estática do SAG foi obtida por meio da estimativa numérica, dividindo-a entre o volume de água armazenada dentro da matriz do aquífero (reserva permeável ou drenável), e o volume de água armazenada sob compressão na zona confinada (reserva compressível).

A Tabela 2 apresenta o cálculo da reserva estática armazenada do SAG, considerando uma porosidade efetiva de 15%±2% para a reserva permeável/drenável e um coeficiente de armazenamento de 10⁻⁴ para a reserva compressível.

Tabela 2: Cálculo da reserva estática armazenada no SAG (OEA, 2009).

	Reserva drenável (km ³)	Reserva compressível (km ³)	Total geral (km ³)
Volume total (100%)	218.527,14	506.006,18	724.533,32
Volume de água	32.780±4.400	50,6	32.830,6±4.400
Volume permeável (90%)	196.674,43	506.006,18	702.680,61
Volume de água	29.501±4.000	50,6	29.551,6±4.000

Todavia, devido à limitação da operação dos equipamentos de bombeamento e das técnicas construtivas atuais para exploração de níveis da água rebaixados a profundidades maiores que 400 m, as reservas exploráveis do SAG não se relacionam diretamente ao volume total de água do reservatório.

Além disso, é importante ressaltar o mecanismo de controle para evitar o efeito de retirada total da camada saturada drenável do SAG, na qual o sistema possa passar da condição confinada à livre, devido à superexploração. Nessas regiões, sob essas condições críticas, o rebaixamento máximo não pode ultrapassar 30% da espessura da camada (OEA, 2009).

De acordo com este cenário máximo de rebaixamento de 400 m, o volume explotável do SAG totaliza aproximadamente 2.000 km^3 , o que perfaz cerca de 6% das reservas atuais. Contudo, na zona de confinamento profundo, o volume total do armazenamento está em torno de 40 km^3 (Foster *et al.*, 2009).

Portanto, fica evidente que a exploração da parte central do SAG requer manejo específico, tornando vital a atividade de definir vazões de exploração ótimas para o SAG nessas regiões.

Essa classificação de reserva do SAG apresenta importantes dados que foram considerados para o desenvolvimento de um plano para o gerenciamento do recurso. OEA (2009) desenvolveu uma classificação de zonas de gestão do SAG. Elas são: zonas de afloramento (ZA), zonas de confinamento próximo (ZC) e zonas de forte confinamento (ZFC), como apresentadas na Figura 2.

Figura 2: Zoneamento básico para gestão do SAG (OEA, 2009).

As ZAs correspondem às áreas onde o aquífero é do tipo livre (ou semiconfinado), e a água de recarga é direta, ou seja, proveniente de precipitação. São águas de circulação rápida, geralmente potáveis e de composição do tipo A (ver Classificação Hidroquímica). Apresentam alta e elevada vulnerabilidade à contaminação antrópica.

Devido à acessibilidade do recurso, foi definido que nestas ZAs a exploração deve cessar quando a camada saturada disponível atingir a espessura de 40 m.

As ZCs são definidas geograficamente como as áreas adjacentes às ZAs, possuindo de 10 a 50 km de largura, tendo como limitantes regiões onde o basalto da Formação Serra Geral alcança no máximo 100 m de espessura vertical.

Nessas zonas, a recarga é indireta, sendo proveniente do fluxo horizontal desde as áreas de recarga. Também é possível que haja condutividade hidráulica vertical por meio do basalto, sendo essa uma recarga secundária das ZCs.

As águas provenientes dessas zonas são do tipo A e do tipo B (ver Classificação Hidroquímica), e apresentam baixa vulnerabilidade à contaminação antrópica, devido à existência do capeamento pelos basaltos e da proximidade com as zonas de recarga.

Já as ZFCs são quaisquer áreas onde a espessura do basalto da Formação Serra Geral supera 100 m de espessura vertical, tornando o aquífero fortemente confinado. As águas possuem velocidade de circulação muito baixa, resultando também em taxas de recarga muito baixas, o que caracteriza a exploração como uma exploração “de lavra” do aquífero.

A exploração do recurso em regime “de lavra” difere da exploração de aquíferos com taxas de recarga efetivas, pois estes não possuem taxas expressivas de recarga, sendo esta praticamente nula em termos da escala temporal humana. Portanto, uma vez explorada a água do sistema, esta não é reposta, e a disponibilidade do recurso é diretamente impactada.

As águas nestas zonas são geralmente do tipo B e C (ver Classificação Hidroquímica), e sua vulnerabilidade à contaminação antrópica é praticamente nula. Na região que compreende o limite entre os estados de São Paulo e Paraná, podem ser encontradas as maiores temperaturas naturais da água do SAG.

Hidrodinamicamente, no caso das ZCs e ZFCs, ambas não recebem recarga local direta e a recarga originada nas áreas de afloramento leva muito tempo para alcançar a zona confinada (milhares de anos). Portanto, a exploração da água é feita diretamente do armazenamento (S), proveniente dos mecanismos da compressão do corpo do aquífero e da expansão das moléculas de água. E como não há reposição do volume de água na mesma proporção, os níveis hidráulicos estão em contínua diminuição (regime de “de lavra” do aquífero).

3.2 O Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo

A caracterização da área é definida principalmente pelos aspectos físicos, como a localização e os aspectos geológicos, hidrogeológicos e hidroquímicos. De acordo com projeções cartográficas, o SAG no Estado de São Paulo está localizado entre os paralelos 20° e 23°30' de latitude sul e os meridianos 47° e 52°30' de longitude oeste, e seus limites são definidos por rios e por áreas de afloramento das litologias que o constituem em contato com unidades subjacentes.

A distribuição do SAG em São Paulo compreende as regiões central e oeste do Estado, possuindo uma extensão total de aproximadamente 155.800 km² (Gastmans, 2007), representando cerca de 60% do território estadual (Figura 3).

Figura 3: Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo.

As camadas aflorantes do sistema definem a extremidade leste do SAG no Estado de São Paulo, representada pelo contato geológico das formações Botucatu e Pirambóia com as formações Corumbataí e Rio do Rasto. Como esses afloramentos relacionam-se diretamente como áreas de recarga,

caracterizados como um sistema livre, o limite leste compreende a zona de confinamento intermediário do SAG, definida por uma área adjacente à zona de afloramentos, na qual a espessura do basalto Serra Geral não supera 100 m. O limite oeste do SAG é definido pelo rio Paraná. O limite sul é definido pelo rio Paranapanema. E o limite norte é definido pelo rio Grande.

Em São Paulo, o SAG é caracterizado como um aquífero de caráter livre apenas nas bordas da bacia, que também são suas principais áreas de recarga, e de caráter confinado devido ao basalto Serra Geral em 90% de sua extensão.

Devido às ótimas características hidrogeológicas para exploração, constitui-se em uma ótima fonte de recurso de água subterrânea explotável no Estado de São Paulo.

A escolha do SAG no Estado de São Paulo deve-se à característica que o Sistema Aquífero assume, sendo confinado em boa parte da área. Esta característica, auxiliada pela intensa exploração de água (aproximadamente 80% da exploração total do SAG é atribuída aos usuários paulistas), constitui uma situação de gerenciamento peculiar em termos nacionais.

3.2.1 Geologia do SAG

O SAG no Estado de São Paulo é composto por duas unidades sedimentares, representantes de um estágio de evolução tardio da Bacia Sedimentar do Paraná, definidas como Formação Pirambóia (basal) e a Formação Botucatu (sobrejacente).

A Formação Pirambóia é caracterizada por arenitos de fina a média granulometria, depositados por eventos eólicos em dunas (possuem tamanhos de grãos de 176 a 200 μm), arenitos de muito fina a fina granulometria depositados em ambientes interdunares (tamanho de grão aproximado de 140 μm), e arenitos conglomeráticos de granulometria grossa no topo da formação (tamanho de grãos de 100 a 1.100 μm) (Hirata *et al.* 2011). Apresentam estratificações cruzadas planar, acanaladas e plano-paralelas.

A Formação Botucatu é caracterizada por arenitos de granulação fina a média (tamanho de grão de 195 a 210 μm), com coloração avermelhada, bem

selecionados, exibindo estratificações cruzadas tangenciais de grande porte. São identificados como depositados em paleoambientes eólicos e flúvio-eólicos (Gesicki, 2007).

Sobrepondo essas formações, encontram-se os basaltos da Formação Serra Geral e os sedimentos consolidados do Grupo Bauru, o qual não possui conexão hidráulica com o SAG. Subjacente às formações, estão dispostos os sedimentos permianos do Grupo Passa Dois (formações Rio do Rasto e Corumbataí).

A Tabela 3 apresenta um esquema litoestratigráfico da área de estudo.

Tabela 3: Perfil estratigráfico compilado (Sracek e Hirata, 2002 e OEA, 2009).

Unidades Estratigráficas	Espessura no Estado de São Paulo	Petrografia	Função Hidrogeológica
Grupo Bauru	até 200 m	Arenito continental, com predominância de quartzo e cimento carbonático	Sistema aquífero não-confinado a semi-confinado
Formação Serra Geral	até 1200 m	Basalto	Aquitarde regional. Até 200 m, ocorre como um aquífero fraturado não confinado
Formação Botucatu	até 200 m, com média de 138 m	Arenito eólico, com predominância de quartzo, com adição de feldspatos e carbonatos	Porção superior do SAG
Formação Pirambóia	até 350 m, com média de 130 m	Arenito argiloso, de origens eólica, fluvial e lacustrina	Porção inferior do SAG
Grupo Passa Dois	Formação Rio do Rasto: até 100m; Formação Corumbataí: até 150 m; Formação Teresina: até 200 m	Predominância de siltito e argilito, com bancos (Formação Corumbataí) e lentes (Formação Teresina) de origem carbonáticos	Aquitarde

3.2.2 Aspectos hidrogeológicos

O empilhamento estratigráfico configura aspectos hidrogeológicos atribuídos a cinco camadas distintas, das quais duas delas compõem o SAG no Estado de São Paulo (do topo para a base):

- Grupo Bauru (aquífero livre – não possui conexão hidráulica com o SAG);
- Formação Serra Geral (principal camada confinante do SAG);
- SAG (Botucatu);
- SAG (Pirambóia);
- Formações Corumbataí e Rio do Rasto (base do SAG – Aquitarde).

3.2.2.1 Mapa Potenciométrico

Em termos de fluxo subterrâneo, este é relativamente lento no Estado de São Paulo, mantendo-se predominantemente na direção leste – oeste, com sentido para oeste.

O fluxo subterrâneo é condicionado por feições geológicas, as quais causam alteração na direção do fluxo, que ruma para sudoeste. Segundo Hirata *et al.* (2011), essas feições geológicas são:

- a) Barreira hidráulica ao fluxo (no norte do Estado do Paraná), formada pelo Arco de Ponta Grossa. Esse define uma estrutura tectônica composta por diques ígneos que impõem uma forte anisotropia ao fluxo, e condiciona o fluxo do SAG em direção oeste;
- b) A convergência do fluxo subterrâneo do SAG com o fluxo vindo do norte, nas proximidades do rio Paraná, proveniente da zona de recarga localizado no sul do estado de Goiás;
- c) No norte do Estado de São Paulo, ocorre uma zona sem recarga (definida como condição de contorno de fluxo = 0 no SAG), originada pelo capeamento do sistema por rochas vulcânicas da Formação Serra Geral;
- d) As zonas de forte confinamento (ZFCs) por rochas vulcânicas sobrejacentes que perfazem 90% do SAG no Estado de São Paulo.

A Figura 4 apresenta o mapa potenciométrico do SAG em sua condição confinada no Estado de São Paulo. As linhas de carga hidráulica da porção confinada foram modificadas a partir de DAEE, IG, IPT, CPRM (2005).

Figura 4: Potenciometria do SAG no Estado de São Paulo (DAEE, IG, IPT, CPRM, 2005).

3.2.2.2 Parâmetros Hidrogeológicos

Dos poços profundos que são operados no Estado de São Paulo, os que exploram água proveniente do SAG são os que apresentam as maiores vazões de produção. Os poços instalados na porção confinada chegam a extrair mais de 600 m³/h e os instalados na porção não-confinada chegam a vazões superiores a 150 m³/h.

Essas altas taxas de vazão de produção de poços são diretamente relacionadas a altos valores de condutividade hidráulica (K). Diversos trabalhos apresentam valores de K entre 0,5 e 4,0 m/dia, com médias de 2,5 m/dia para os arenitos da Fm. Pirambóia e 3,5 m/dia para a Fm. Botucatu (Araújo, França e Potter, 1999; Sracek e Hirata, 2002; OEA, 2009; Hirata *et al.*, 2011).

Contudo, os valores regionais de gradientes hidráulicos são baixos, tipicamente entre 0,1 a 0,3 m/km. Considerando valores de porosidade efetiva em torno de 15%, define-se que os valores de velocidade de fluxo linear nas áreas mais confinadas do SAG estão em torno de 0,5 m/dia (Hirata *et al.*, 2011).

A Tabela 4 e a Tabela 5 apresentam valores de parâmetros hidrogeológicos das formações que compõem o SAG e das formações que o delimitam, respectivamente.

Tabela 4: Características hidráulicas das unidades hidrogeológicas que compõem o SAG no Estado de São Paulo (Araújo, França e Potter, 1999; Sracek e Hirata, 2002; OEA, 2009; Hirata et al., 2011).

Unidade Hidrogeológica	Sistema Aquífero Guarani (em SP)	
	Formação Pirambóia	Formação Botucatu
Espessura (m)	Média: 139 (75 - 270)	Média: 138 (20 - 238)
Condutividade Hidráulica (m/dia)	Média: 2,5 (0,5 a 3,0)	Média: 3,5 (2,0 a 4,0)
Transmissividade (m ² /dia)	39 a 1.037	
Armazenamento (adimensional)	1x10 ⁻³ a 1x10 ⁻⁵	-
Porosidade	Média: 0,15 (0,20 a 0,30)	Média: 0,25 (0,20 a 0,40)
Porosidade Efetiva	Média: 0,15 (0,10 a 0,30)	-
Gradiente Hidráulico (m/m)	Área Confinada	0,001
	Área Não-Confinada	0,008 a 0,003
Velocidade Advectiva (m/dia)	Área Confinada	0,017
	Área Não-Confinada	0,133
Recarga - Área Não-Confinada (mm/ano)		100 a 200
Recarga Regional Profunda (mm/ano)		10 a 20

Tabela 5: Características hidráulicas das unidades hidrogeológicas que se dispõem sobrejacente e subjacente ao SAG no Estado de São Paulo (Araújo, França e Potter, 1999; Sracek e Hirata, 2002; DAEE, IG, IPT, CPRM, 2005; Iritani e Ezaki, 2009; Hirata et al., 2011).

Unidade Hidrogeológica	Grupo Bauru	Fm. Serra Geral	Gr. Passa Dois
Espessura (m)	Média: 75 (100 - 300)	300 - 1.500	120
Condutividade Hidráulica (m/dia)	0,09 a 0,9	0,04 a 4,3	6,9x10 ⁻³
Transmissividade (m ² /dia)	25,9 a 86,4	0,864 a 691	0,864
Armazenamento (adimensional)	1x10 ⁻³	-	-
Porosidade	0,07 a 0,15	0,01 a 0,05	0,1
Porosidade Efetiva	0,05	-	-

3.2.3 Aspectos hidroquímicos

Genericamente, as águas do SAG no Estado de São Paulo são potáveis, pouco mineralizadas (condutividade elétrica menor que 1000 µS/cm) e de baixa velocidade de fluxo. Seus valores de pH variam entre 4,5 e 11, sendo geralmente neutras a alcalinas.

Silva (1983) definiu três fácies hidroquímicas transicionais para o SAG no Estado de São Paulo: (i) Águas de zona de recarga, na porção livre do aquífero, a leste da área de estudo: tratam-se de águas predominantemente bicarbonatadas magnesianas e calco-magnesianas; (ii) Águas de uma faixa de cerca de 30 km de largura, a partir dos contatos dos sedimentos Botucatu/Pirambóia com as rochas basálticas da Fm. Serra Geral: tratam-se de águas bicarbonatadas cálcicas e calco-magnesianas; (iii) Águas da zona totalmente confinada do aquífero: tratam-se de águas bicarbonatadas sódicas que evoluem, no extremo sudoeste do estado, para cloro-sulfatadas sódicas.

A definição anteriormente citada forneceu os fundamentos para a elaboração da configuração de quatro zonas hidroquímicas principais para toda a área do SAG, estabelecida em OEA (2009).

O padrão de fluxo da água subterrânea no aquífero influencia a evolução geoquímica da água, assim como a presença do Aquitarde Serra Geral sobrejacente tem também uma importante influência nessa evolução (Gastmans, Chang, Hutcheon, 2010). Similarmente ao enfoque dado por Silva (1983), a análise das características químicas da água do SAG define dois grandes grupos, sendo um deles de águas próximas às áreas de afloramento do sistema, e outro de águas onde o aquífero encontra-se sobreposto pelas rochas basálticas da Formação Serra Geral.

No Estado de São Paulo, as características químicas da água subterrânea estão evidenciadas na Tabela 6:

Tabela 6: Características químicas da água subterrânea do SAG no Estado de São Paulo (Gastmans, Chang, Hutcheon, 2010).

Característica do Aquífero	Química da água	Zona de ocorrência	Geoquímica da Água Subterrânea	
Não-confinado	Águas bicarbonatadas cálcio-magnesianas	Próximo às áreas de afloramento (Leste do Estado de São Paulo)	STD < 294 mg/L	Ca: 0,04 - 2,5 meq/L
			pH < 7,5	Mg: < 1,13 meq/L
				CO ₃ : < 0,04 meq/L
				Cl: < 0,31 meq/L
				Na: < 0,9 meq/L
				HCO ₃ : 0,06 - 3,16 meq/L
Confinado	Águas bicarbonatadas sódicas e cloretadas/sulfata das	Regiões centrais e oeste do Estado de São Paulo	STD: 61 - 650 mg/L	Ca: 0,02 - 0,84 meq/L
			pH: 8,2 - 10,4	Mg: < 0,08 meq/L
				CO ₃ : < 2,9 meq/L
				Cl: 0,01 - 3,75 meq/L
				Na: 0,6 - 9,8 meq/L
				HCO ₃ : 0,66 - 3,4 meq/L
				SO ₄ : < 1,92 meq/L

A tabela demonstra, entre outros fatores, o papel fundamental que a Formação Serra Geral desempenha na evolução geoquímica do SAG, uma vez que o aumento na espessura das rochas basálticas da formação tende a coincidir com a ocorrência do aumento nas concentrações de sólidos totais dissolvidos das águas (Gastmans, Chang, Hutcheon, 2010).

É importante citar que o tempo de circulação da água subterrânea tem fundamental influência no grau hidrogeoquímico que ela alcança. Segundo a OEA (2009), as águas do SAG no Estado de São Paulo foram datadas por meio de ¹³C e classificadas como águas modernas até águas fósseis, datadas com até 35.000 anos de idade.

3.2.4 Recarga profunda do SAG

As altas taxas de precipitação nas áreas de afloramento do SAG são responsáveis por altos valores de recarga anual do aquífero. São estimadas recargas aproximadamente de 300 a 400 mm/ano onde o SAG é considerado como livre. Entretanto, apenas uma pequena parcela desse volume alcança as zonas de forte confinamento do SAG, devido principalmente à

evapotranspiração e à distribuição do uso do solo no estado, que contribuem para a diminuição do volume de água disponível para recarga profunda (Wendland, Barreto, Gomes, 2007).

As áreas de recarga profundas do SAG no estado de São Paulo são limitadas por “janelas” estratigráficas que são conexões diretas do SAG com as rochas do Grupo Bauru devido à ausência do capeamento dos basaltos da Fm. Serra Geral, encontradas nos municípios de Bauru, Araraquara e São Carlos. Além disso, a recarga através dos Basaltos Serra Geral parece ser minimamente viável apenas em localidades próximas às áreas de afloramento do SAG, onde a espessura total das rochas vulcânicas não ultrapassa 50 m (Fernandes *et al.*, 2006).

De acordo com Wendland, Barreto e Gomes (2007), foi estimada uma recarga originada do fluxo horizontal até o aquífero profundo em torno de 40 mm/ano, enquanto que nas zonas de recarga onde afloram as formações Botucatu e Pirambóia obteve-se taxas na ordem de 350 mm/ano.

As áreas de descarga do SAG no estado de São Paulo são limitadas às áreas de afloramento e às “janelas” estratigráficas de ausência dos basaltos Serra Geral. Exceto essas, não há áreas de descarga naturais do SAG no Estado. Entretanto, o bombeamento de poços de produção instalados no SAG é o principal meio de descarga do aquífero na área de estudo. Ele é responsável pelas maiores taxas de exploração de água de todo o sistema, alcançando taxas superiores a 2.300.000 m³/ano por meio da operação de mais de 1.500 poços (Vives et al., 2008).

3.2.5 Uso da água subterrânea do SAG no Estado de São Paulo

O volume explotado atualmente no SAG como um todo encontra-se na ordem de 1,04 km³/ano (OEA, 2009), sendo o Estado de São Paulo responsável por aproximadamente 2/3 dessa exploração. Cerca de 80% desse volume explotado é destinado ao consumo humano (abastecimento), 15% para a indústria, enquanto o restante encontra-se dividido igualmente entre usos rurais e outros (Chang, 2001).

Em diversos pontos do interior de São Paulo, poços profundos de produção abastecidos pelo SAG exibem condições artesianas.

No entanto, é observado que a disponibilidade hídrica é muito pequena nas porções mais confinadas do sistema se relacionadas às porções onde ele se comporta como livre (áreas de afloramento), com lentíssima reposição de água na porção mais profunda (mais de 30.000 anos) (OEA, 2009). Portanto, é evidente que a exploração da porção mais a oeste do SAG no estado de São Paulo requer um manejo específico, com maiores atenções às taxas de recarga real das porções confinadas e definições de vazões de exploração ótimas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A realização deste trabalho envolve o estabelecimento de critérios técnicos para uma exploração planejada do SAG, a partir de simulações numéricas de fluxo e, adicionalmente, o entendimento dos possíveis impactos causados pela exploração não planejada em um aquífero confinado não renovável (exploração de lavra).

Para tal, além da revisão bibliográfica da área de estudo, foram previstas sete fases distintas:

- 1) Estudo de trabalhos existentes do SAG no Estado de São Paulo, com ênfase nos dados do Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani (PSAG);
- 2) Avaliação da base de dados do DAEE em Araraquara;
- 3) Processamento dos dados;
- 4) Modelo conceitual de fluxo;
- 5) Modelo numérico de fluxo;
- 6) Estabelecimento de recomendações para o uso e gestão da água subterrânea no SAG confinado.

4.1 Estudo de trabalhos sobre o SAG no Estado de São Paulo, com ênfase nos dados do Projeto Sistema Aquífero Guarani

Devido à bibliografia já publicada sobre o assunto, uma das metas iniciais do trabalho foi a seleção, compilação e análise dos trabalhos já existentes, focando principalmente a coleção de dados que embasam o modelo conceitual na área de estudo.

Estudos recentes são fundamentais para a composição de um modelo conceitual atual. Como exemplo para o melhor entendimento da recarga indireta na porção confinada do SAG, é possível citar os trabalhos desenvolvidos por Fernandes *et al.* (2006); Wendland *et al.*, (2007) e Gouvêa e Wendland (2011).

Adicionalmente, para melhor avaliação da bibliografia consultada, esta foi dividida em quatro grandes áreas de conhecimento, as quais foram utilizadas para a organização do estado da arte e para a distribuição dos dados:

- 1) Hidrogeologia e dinâmica geral do SAG;
- 2) Recarga, no que concerne à recarga indireta das regiões confinadas do SAG;
- 3) Gestão de Recursos Hídricos Subterrâneos não renováveis; e
- 4) Modelagem conceitual e numérica.

Dados foram levantados por meio do Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani (PSAG), em cooperação dos quatro países nos quais o SAG está localizado, e culminou no desenvolvimento do Programa Estratégico de Ação (PEA) em 2009 (OEA, 2009).

Esta é a base inicial de dados do projeto e parte dela foi obtida por intermédio do Centro de Estudios Hidroambientales (CENEHA) da Universidad Nacional del Litoral, Santa Fé, Argentina.

A partir da aquisição dessas informações, foram identificados 2.055 dados de poços distribuídos por toda a extensão do SAG. Destes, foram selecionados uma base de 696 poços, pertencentes ao Estado de São Paulo.

Contudo, os dados obtidos por meio do PSAG não apresentam as informações necessárias para a compreensão das características hidrogeológicas (como dados de K, S e T, e testes de bombeamento) e para a definição do modelo conceitual. Portanto, buscou-se outra fonte de dados que viabilizasse esses objetivos.

4.2 Avaliação da base de dados do DAEE em Araraquara

Em setembro de 2013, foi realizado um levantamento de dados na central de banco de dados hidrogeológicos do Estado de São Paulo no Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo, vinculado à Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos, agência de Araraquara.

Com o auxílio da equipe técnica do DAEE/Araraquara, foram levantados dados hidrogeológicos referentes à São José do Rio Preto e arredores. Da totalidade do banco de dados inventariado, foram selecionados 14 poços (8 em São José do Rio Preto e 6 em Catanduva, Mirassol e Olímpia) (Figura 5).

Figura 5: Poços do SAG em São José do Rio Preto.

Os dados desses poços continham as seguintes informações:

- Dados de localização: nome, município, proprietário, identificação do poço, coordenadas UTM sul e leste (em metros);
- Dados construtivos do poço: identificação do poço, profundidade de perfuração, cota topográfica, tipo do poço, data da perfuração, empresa perfuradora;
- Dados geológicos do poço: informações de topo e base de contato do Grupo Bauru, Formação Serra Geral, formações Botucatu e Pirambóia, e formações subjacentes;
- Dados hidrogeológicos do poço: profundidade do nível d'água (NE), nível dinâmico (ND), cota do NE, parâmetros hidráulicos (vazão específica, rebaixamento específico, transmissividade, tipo de aquífero etc);
- Dados de exploração do poço: vazão, período de exploração e testes de bombeamento.

A tabela completa com os dados obtidos para esses poços encontra-se compilada no Anexo A.

Perfilagens geofísicas em 7 dos 14 poços selecionados (seis deles em São José do Rio Preto e um no município de Olímpia) foram interpretados e isso

permitiu a identificação do contato das camadas das formações Botucatu e Piramboia, através da diferença na abundância de sedimentos mais finos, associados ao Piramboia, em relação do Botucatu, sobretudo através do perfilador de raios gama (Anexo B).

Já os dados dos testes de bombeamento foram interpretados com o software AquiferTest versão 4.2, da Schlumberger Water Services, permitindo a estimativa de valores de transmissividade.

4.3 Processamento dos dados

Para a organização e interpretação dos dados, foi utilizado um Sistema de Informação Geográfica (SIG), com uso dos programas ArcGIS®, versão 2010, produzido pela ESRI Products, georreferenciado em UTM, Fuso 23, *datum* SAD 69; Google Earth Pro e API JavaScript, produzido pela Google.org, georreferenciado em UTM.

A utilização do geoprocessamento foi fundamental para caracterizar regionalmente o SAG e para auxiliar na distribuição dos dados obtidos ao longo da área de estudo.

4.4 Modelo Conceitual de Fluxo

Um modelo conceitual foi elaborado, a partir do entendimento da geologia e da hidrogeologia da área de estudos e serviu para embasar a construção do modelo numérico de fluxo, incluindo a definição da geometria do aquífero, separação entre as formações Piramboia e Botucatu e os dados hidráulicos dessas unidades e os aquitardes superior e inferior.

4.5 Modelo Numérico de Fluxo de Águas Subterrâneas

Os principais objetivos da modelagem numérica são:

- Validar o modelo hidrogeológico conceitual proposto;
- Reproduzir o funcionamento atual e possivelmente futuro do sistema;
- Estimar valores hidrodinâmicos para o sistema.

O presente trabalho utilizou o código numérico MODFLOW (McDonald e Harbaugh, 1998; Harbaugh *et al.*, 2000). Essa escolha deveu-se à sua versatilidade de aplicação a uma ampla variedade de situações e sua consolidação no uso comercial.

O MODFLOW é um código computacional tridimensional de diferenças finitas que permite ser modificado e adaptado a cada aplicação particular, devido a sua estrutura modular. A estrutura modular é composta por um programa principal, auxiliado por uma série de sub-rotinas de funcionamento independentes. Essas sub-rotinas agrupam-se em pacotes. Cada pacote é utilizado para representar uma característica específica do sistema aquífero, como fluxo de rios etc. Outros pacotes são usados para resolver equações resultantes da discretização em diferenças finitas (Gómez, 2007).

A região a ser modelada é então dividida em células nas quais as propriedades hidrodinâmicas a elas atribuídas podem ser assumidas como uniformes por toda a sua extensão. O posicionamento de cada célula do modelo é descrita por sua linha, coluna e camada vertical. Então, a equação fundamental de fluxo, em diferenças finitas, pode ser aplicada a cada célula, por meio da equação de continuidade intrínseca a cada uma.

A equação fundamental de fluxo subterrâneo, de densidade constante, em um meio poroso heterogêneo e anisotrópico, é aplicada computacionalmente a um modelo matemático. Essa pode ser representada pela seguinte derivação:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Onde K_{xx} , K_{yy} e K_{zz} são os valores de condutividade hidráulica ao longo dos eixos coordenados x , y e z , que são assumidos como paralelos aos eixos principais de anisotropia (Bear, 1972); h é a carga potenciométrica ou carga hidráulica do aquífero; W é o fluxo volumétrico por unidade de volume de aquífero que representa as fontes e/ou os sumidouros de água ($W < 0$ define como água saindo do sistema, $W > 0$ define-se como água entrando no sistema); S_s é o coeficiente de armazenamento específico do meio poroso; e t é o tempo.

Nesta equação, os agrupamentos numéricos entre parêntesis são as três componentes do fluxo de Darcy (q_x , q_y e q_z), quando os eixos cartesianos são paralelos aos eixos principais de condutividade hidráulica (Gómez, 2007).

A partir dessa relação, o programa define um conjunto de equações lineares, que contemplam o tipo de aquífero estudado e os elementos a ele atribuídos. No caso do Visual Modflow, este possui alguns métodos de resolução de sistemas de equações disponíveis à escolha do usuário, definidos em três pacotes distintos. Para cada tempo t pré-definido, estes pacotes estipulam valores de carga hidráulica do aquífero, taxas de fluxo d'água subterrânea e balanço de massa.

O pacote para o cálculo do fluxo subterrâneo pode ser selecionado de acordo com a complexidade do sistema aquífero a ser modelado.

O modelo numérico de fluxo do SAG gerado para a área de estudo foi desenvolvido no *software* Visual Modflow Premium®, versão 4.3 (Guiguer e Franz, 1996), desenvolvido pela Schlumberger Water Services.

Este software consiste do seguinte grupo de programas informáticos:

- MODFLOW 2000 (padrão para simulação de fluxo de águas subterrâneas);
- MODPATH (pacote para detecção do movimento de avanço e recuo de partículas);
- Zone Budget (trabalha com cálculo da quota de água local).

Visando a representação real do sistema hidrogeológico, são necessárias a discretização da malha a ser modelada (de acordo com a extensão da área de estudo), a delimitação das condições de contorno e das condições iniciais de modo adequadamente adaptado ao aplicativo.

Com a definição do modelo numérico preliminar, é realizada a fase de calibração do modelo. Esse procedimento consiste no ajuste dos parâmetros do modelo para um conjunto de observações reais, por exemplo, de níveis d'água dos poços medidos em campo. Em um modelo de fluxo, os parâmetros de entrada sujeitos à calibração são: condutividade hidráulica, drenança do aquífero, coeficiente de armazenamento do aquífero, transmissividade, entre outros.

Existem dois tipos de estratégias de calibração de um modelo numérico: a manual e a automática. Neste estudo, como a modelação envolveu uma área

genérica baseada em dados da área de interesse, não houve uma calibração do modelo, e sim, a criação de cenários prospectivos para a exploração do SAG.

4.6 Estabelecimento de recomendações para o uso e gestão da água subterrânea no SAG confinado

A partir da estimativa de valores físicos para o sistema na área de estudo, por meio do desenvolvimento de modelos de fluxo, foi possível compreender o comportamento hidrodinâmico do SAG.

Através da avaliação dessas informações, combinadas aos dados de gestão de recursos hídricos subterrâneos encontrados na bibliografia consultada, elas colaboraram para a recomendação de formas de gestão da exploração do aquífero, principalmente na área mais confinada; considerações a cerca dos impactos da exploração; entre outros.

5 GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS NÃO RENOVÁVEIS

5.1 *Embasamento técnico e exemplificação*

Atualmente, o entendimento da exploração de água subterrânea é essencial para a mitigação de impactos aos recursos hídricos e sustentabilidade. O crescente comprometimento dos recursos hídricos subterrâneos para o atendimento das demandas populacionais e da produção de alimento através da irrigação tem aumentado a necessidade mundial do real entendimento das reservas hídricas dos aquíferos.

Com essa crescente demanda de água subterrânea, é vital quantificar quanto desse recurso está realmente disponível para produção e quais são os impactos dessa produção no sistema hídrico. De acordo com Foster *et al.* (2006), estritamente, os recursos de água subterrânea tendem a ser renováveis, contudo, em alguns casos, o período necessário para a recarga do aquífero é muito grande (centenas ou milhares de anos) em comparação com a escala de atividade humana e principalmente ao gerenciamento dos recursos hídricos.

Por isso, é importante distinguir os recursos renováveis dos não renováveis ou águas subterrâneas fósseis. A exploração de água subterrânea derivada de fontes renováveis é limitada pelo fluxo ou por taxas de recarga enquanto que a exploração de recursos não renováveis é limitada pelo armazenamento do aquífero (S).

5.1.1 *Theis*

Portanto, para as condições específicas de um aquífero confinado não drenante e regime transitório, Theis (1935) desenvolveu um método para descrever os rebaixamentos em um aquífero confinado a uma dada distância de um poço que está sendo bombeado. Esse método é baseado na seguinte equação:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \quad (1)$$

onde:

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

Onde:

r = distância do poço bombeado ao observado (m);

s = rebaixamento a uma distância r do poço bombeado (m);

Q = vazão de bombeamento (m³/s ou m³/dia);

T = transmissividade (m²/s ou m²/dia);

S = coeficiente de armazenamento (adimensional);

t = tempo a partir do início do bombeamento (s).

Contudo, segundo Feitosa e Manoel Filho (1997), a integral da expressão (1) não tem solução exata. Então, a resolução proposta inicialmente em Theis (1935) resultou na forma simplificada:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (2)$$

No entanto, o Método de Theis possui algumas condições, que devem ser admitidas para sua devida aplicação:

- a) O aquífero deve ser confinado não drenante;
- b) Poços com penetração total, onde a zona filtrante abrange a totalidade da espessura do aquífero;
- c) Aquífero homogêneo, isotrópico e com espessura uniforme sobre a área de influência do bombeamento;
- d) Aquíferos infinitamente extensos, ou seja, não sendo limitados por barreiras hidrológicas impermeáveis ou limites de recarga;

- e) Superfície potenciométrica horizontal antes do bombeamento;
- f) Poço de teste bombeado a vazão constante;
- g) O diâmetro do poço de teste deve ser pequeno, de modo que o armazenamento seja negligenciável;
- h) Regime transitório.

Complementarmente, segundo Alley (2007), é praticamente impossível remover toda a água do armazenamento (S) de aquíferos confinados por meio de poços de bombeamento. O uso do armazenamento específico (*specific yield* - S_y) no cálculo da água subterrânea “recuperável” do armazenamento considera a água retida nos poros da matriz rochosa pela capilaridade, mas muitos outros fatores limitam a quantia real de água recuperável. A condutividade hidráulica do aquífero, a qualidade de água, o custo da perfuração dos poços, o custo do bombeamento da água a tais profundidades e o *design* do processo de bombeamento são todos fatores que limitam o volume de água que pode ser utilizado de fato.

Adicionalmente, é importante considerar o impacto econômico que a exploração de tais recursos pode gerar, pois o rebaixamento de uma porção do volume total de água no armazenamento do aquífero, em alguns casos, pode gerar efeitos substanciais na subsidência de terrenos e na redução da disponibilidade de água superficial para uso humano e para ecossistemas aquáticos. Esses efeitos externos podem se tornar fatores limitantes para o desenvolvimento na exploração do recurso hídrico.

Em relação a esses impactos causados pela exploração de água do armazenamento de aquíferos, Johnston (1997) descreve a retirada de grandes volumes de água em três dos aquíferos mais bombeados dos Estados Unidos – Os Sistemas Aquíferos *The High Plains*, *California Central Valley* e o *Gulf Coastal Plain*. Perdas provenientes do armazenamento nesses sistemas aquíferos resultaram em impactos regionais e ambientais, como descrito:

- A superexploração da parte sul do Aquífero *High Plains* acompanhou um continuo declínio das cargas hidráulicas regionais. Esse declínio causou uma diminuição da espessura saturada do aquífero em mais de 25%, em cerca de $\frac{1}{4}$ do *High Plains* nos estados do Texas e do Novo Mexico.

O volume total retirado do armazenamento foi estimado em cerca de $2 \times 10^{11} \text{ m}^3$ de água até 1980;

- O bombeamento do Sistema Aquífero *California Central Valley* causou o rebaixamento dos níveis hidráulicos em mais de 120 metros no oeste de *San Joachin Valley*. Esse declínio causou a compactação inelástica dos sedimentos da formação aquífera e a maior subsidência já registrada no mundo devido ao bombeamento de água subterrânea. Cerca de 13.000 km^2 da região sofreram subsidência em mais de 0,3 m;
- A maior parte da perda do armazenamento no Sistema Aquífero *Gulf Coast* deu-se devido ao rebaixamento registrado no Aquífero aluvial *Mississippi River Valley*. O cone de rebaixamento resultou na perda de água do armazenamento do aquífero confinado nas regiões de Baton Rouge, Louisiana, Houston e Texas, acompanhado por subsidência do terreno por compactação de grãos.

Huang *et al.* (2012) descreve ainda que o bombeamento de água subterrânea do Aquífero Carrizo-Wilcox exauriu boa parte do armazenamento, principalmente na região sul, a qual é responsável por cerca de 50% de todo o bombeamento do recurso. A superfície potenciométrica rebaixou mais de 60 metros ao longo de 6.500 km^2 , o que corresponde a cerca de 4 km^3 do armazenamento compressivo do aquífero confinado.

Atualmente, segundo Huang *et al.* (2012), entender os impactos do bombeamento futuro nos recursos hídricos regionais é uma questão crítica para a gestão do aquífero. Similarmente ao SAG, o Aquífero Carrizo-Wilcox é definido como um sistema predominantemente confinado, com um fluxo de água subterrânea caracterizado por (1) um sistema não confinado e raso nas áreas de afloramento onde a maior parte da recarga flui diretamente para os recursos hídricos superficiais e (2) por um fluxo regional restrito e profundo para as seções confinadas do aquífero. Na região sul do aquífero, onde se concentram as maiores taxas de exploração, leva-se mais de 500 anos para se alcançar a recuperação das reservas diante das atuais taxas de exploração.

Portanto, abordagens para mitigar os impactos do bombeamento visando o armazenamento do aquífero e sua recuperação devem ser consideradas nos planos de gerenciamento do recurso hídrico subterrâneo. Devido à maior parte

do bombeamento se concentrar na porção confinada e o fluxo extremamente limitado da porção não confinada para a confinada, programas visando a recuperação do armazenamento devem ser o foco da gestão.

Visando a mitigação desses impactos, é fundamental o estudo do sistema configurando idéias de planejamento para gestão do recurso. A gestão de aquíferos com água subterrânea não renovável contempla duas situações principais, segundo Foster *et al.* (2006):

- Aquíferos não confinados em zonas onde a recarga atual é muito pouco frequente e de pequeno volume, nos quais o recurso se limita essencialmente às reservas do armazenamento do aquífero;
- As seções confinadas de sistemas aquíferos muito extensos, como o SAG, nos quais a exploração de água subterrânea induz pouca recarga ativa, e a superfície piezométrica rebaixa continuamente como resposta à extração.

Ambos os casos implicam na exploração da denominada “paleo-água subterrânea” (recurso fóssil) que provém da recarga de regimes climáticos pretéritos mais úmidos. Os volumes de água fóssil em alguns aquíferos são enormes (por exemplo, se estima 150.000 km³ nos arenitos aquíferos da Nubia e 15.000 km³ na Bacia Arábica Rub-al-Khali).

Essa situação é observada em vários sistemas aquíferos ao redor do globo. Lloyd e Pim (1990) avaliam que os Arenitos Cambro-Ordovicianos Saq formam o maior aquífero nacional da Arábia Saudita e Jordão. A qualidade da água subterrânea é excelente para irrigação o qual é o principal uso, assim como é boa sua potabilidade. A presença de uma reserva hídrica subterrânea tão extensa em uma região tão árida climaticamente motivou considerável investigação hidrogeológica e desenvolvimento da exploração desse recurso ao longo do tempo, particularmente na Arabia Saudita, enquanto que na Líbia a exploração planejada é de cerca de 2x10⁶ m³/dia.

Por meio de estudos de modelagem desenvolvidos na Arabia Saudita (Kawecki e Pim, 1987) o fluxo da água subterrânea no Aquífero Saq foi apresentado como sendo influenciado regionalmente por relativas baixas cargas hidráulicas do Aquífero Arenito Tabuk sobrejacente. A modelagem indica que na parte confinada leste do aquífero, fluxos ascendentes ocorrem do Saq para os

arenitos superiores a uma taxa de fluxo extremamente baixa. São citadas condutividades hidráulicas verticais da ordem de $8,6 \times 10^{-6}$ a $8,6 \times 10^{-5}$ m/dia.

Devido à recarga severamente limitada da região, a exploração de água subterrânea depende basicamente de métodos de “mineração” do recurso. Com isso, muito se tem feito para determinar o armazenamento específico.

Konikow e Neuzil (2007) analisam que, em aquíferos confinados, a água provém inicialmente do armazenamento, contudo, ao longo do tempo, ela pode ser derivada de unidades confinantes adjacentes e subjacentes, aquíferos sobrejacentes, e/ou zonas de afloramento conectadas. O armazenamento de água em camadas confinantes de baixa granulometria pode ser volumetricamente muito maior que em aquíferos confinados.

De acordo com Lloyd e Pim (1990), embora esses sistemas aquíferos disponham de volumosas reservas de água subterrânea que já estão sendo exploradas, o potencial continua sendo enorme para muitos deles, a partir da consideração de gerenciamento adequado. No caso do Aquífero Saq, alguns problemas locais já foram encontrados, como a contaminação em porções do aquífero e o excessivo rebaixamento em áreas confinadas. O primeiro problema tem sido resolvido com a adoção de designs de poços mais precisos e uma prática de irrigação mais eficiente, mas pouco pode ser feito em relação ao segundo problema citado sem políticas adequadas de gerenciamento regional do aquífero.

Devido à consideração da importância do aquífero em um contexto mais amplo, por ambos Jordão e Arábia Saudita, em termos de planejamento nacional, o governo saudita propôs que parte do Aquífero Saq seja a principal fonte de suprimento para um sistema de fornecimento de água potável que atende exclusivamente as cidades do norte do país. No Jordão, estudos foram executados e déficits futuros de abastecimento foram antecipados para a região norte do país, para qual a água subterrânea do Aquífero Saq foi direcionada (Lloyd e Pim, 1990). Esse tipo de gerenciamento do uso dos recursos hídricos requer profunda análise econômica e um claro estabelecimento das prioridades nacionais, por parte dos órgãos governamentais, para o uso de um extenso, mas não ilimitado volume de água subterrânea armazenada.

5.2 Gestão de recursos hídricos

Basicamente, a água subterrânea difere da água superficial devido ao contraste entre os ambientes em que ocorrem, tanto físico como quimicamente. A água superficial flui relativamente rápido através de canais, os quais alimentam o rio principal que drena determinada área. A área de abrangência de cada bacia fluvial é determinada pela superfície topográfica e genericamente é estável.

Já a água superficial move-se através de aquíferos desde áreas de recarga até as áreas de descarga, determinadas pela estruturação geológica, normalmente a baixas taxas de velocidade de fluxo. Essas baixas taxas de fluxo e longos tempos de residência, consequentemente devido a extensos volumes de armazenamento do aquífero, estão entre as mais distintas características dos sistemas de águas subterrâneas.

A gestão desse recurso hídrico diferenciado tem de contemplar o balanço da exploração de um recurso complexo, em termos de quantidade, qualidade e interações com a água superficial, com o aumento da demanda de água e de usuários do solo, os quais podem ser uma ameaça para a disponibilidade e qualidade do recurso.

Nesses termos da gestão, é essencial reconhecer que gerenciar a água subterrânea é tanto quanto gerenciar a população, relação entre a água e os usuários do solo, como gerenciar a água, em relação aos recursos do aquífero (Tuinhof *et al.*, 2006). Em outras palavras, a dimensão socioeconômica (gerenciamento da demanda) é tão importante quanto a dimensão hidrogeológica (gerenciamento do recurso), e a integração entre os dois aspectos é fundamental.

Em relação à gestão do recurso hídrico subterrâneo, deve-se considerar os sistemas aquíferos e suas susceptibilidades específicas a impactos negativos devido ao stress provocado pela exploração, e as interações entre a água superficial e a subterrânea, como efeitos de exploração e efeitos de redução de recarga efetiva.

Em relação ao gerenciamento da demanda hídrica subterrânea, é importante considerar que o desenvolvimento social influencia e é influenciado pelo uso da água, especialmente em áreas de interesse para a irrigação da agricultura e a

produção de alimento. Nesses termos também é fundamental considerar que intervenções regulatórias, como direitos ao uso e permissões, e ferramentas econômicas, tais como tarifas de extração, são mais efetivas se elas não apenas constarem na legislação, mas sim forem implementadas com altos índices de participação dos grupos de interesse e usuários.

5.3 Direitos para a exploração de água subterrânea

O direito de captar e usar água (inclusive a água subterrânea) pode ser garantido a indivíduos, entidades públicas e corporações privadas, sob certos termos e condições, e tais direitos são geralmente controlados por autoridades de recursos hídricos.

Garduño *et al.* (2006) define que um sistema de direitos sobre a água subterrânea (permissões para explorar e usar água subterrânea) é primeiramente introduzido com a finalidade de reduzir interferências entre poços, evitar conflitos contraproducentes e resolver disputas entre usuários vizinhos. Contudo, os benefícios do desenvolvimento de um sistema estável de direitos sobre os recursos hídricos são muito mais abrangentes, desde que providenciam um sólido embasamento para o desenvolvimento e proteção dos recursos hídricos.

Além desse fator, a definição de direitos adequados em relação ao uso das águas subterrâneas viabiliza objetivos para um gerenciamento integrado dos recursos hídricos:

- Estabelece a participação dos usuários na gestão hídrica subterrânea;
- Implementa programas de gerenciamento de demandas visando reduzir a exploração de água subterrânea;
- Estipulação e coleta sistemática de taxas de exploração e uso do recurso visando a aplicação dessa verba na melhoria e ampliação de sua gestão;
- Possibilidade de incremento dos direitos de exploração a fim de promover o uso mais eficiente do recurso;
- Desenvolvimento de uma gestão conjunta de uso do recurso hídrico superficial e subterrâneo.

Um sistema de direitos hídricos deve possuir os seguintes atributos chave:

- Exigências para o uso benéfico e eficiente da água, tais quais não permitam que esse recurso hídrico seja obtido através de especulação e etc.;
- Segurança racional para o usuário do recurso, incluindo definições de compensação sob determinadas circunstâncias quando reduzido ou prejudicado, considerando ainda a exigência para uso benéfico e eficiente;
- Flexibilidade de realocar a distribuição da água visando usos mais sociais, econômicos e ecológicos, através de revisão periódica de usos e necessidades.

5.4 Recursos hídricos subterrâneos não renováveis

De acordo com Foster *et al.* (2006), os recursos hídricos subterrâneos nunca são estritamente não renováveis. Contudo, em alguns casos, o período necessário para a recarga do aquífero é muito grande (entre centenas a milhares de anos) se comparado à escala temporal da atividade humana, em particular do gerenciamento dos recursos hídricos. Por esse motivo, é válido afirmar que nesses casos a água subterrânea é um recurso não renovável, sendo esta “lavrada” das reservas do aquífero.

Como exemplos dessa situação peculiar, temos as situações dos aquíferos não confinados em regiões onde a recarga atual é pouco frequente e de pequeno volume, o que praticamente resulta que o recurso hídrico seja limitado essencialmente pelas reservas de armazenamento do aquífero. Outra situação, a qual refere-se diretamente ao objeto dessa dissertação, é a de seções confinadas de sistemas aquíferos muito extensos, onde a exploração da água subterrânea induz pouca ou nula recarga ativa, e a superfície potenciométrica é abatida constantemente em resposta à exploração.

Ambos os casos implicam na exploração da denominada “paleo-água subterrânea” (ou fóssil), que provém da recarga de regimes climáticos mais úmidos no passado da região.

Em termos da gestão adequada desse tipo de recurso, o termo “sustentabilidade” deve ser aplicado com ressalvas, basicamente atribuído ao

caráter social, e não físico, uma vez que implica que, dentro de um horizonte de tempo de centenas a milhares de anos, devem ser ponderados os benefícios imediatos contra os impactos negativos dessa exploração, visando considerar alternativas futuras para o gerenciamento dessa situação de abastecimento.

5.5 Condições para exploração desses recursos

Existem diversas situações para a utilização de um recurso não renovável de água subterrânea. Segundo Foster *et al.* (2006), uma delas é quando é planejado explorar as reservas do aquífero, especificamente visando um projeto de exploração em uma zona árida com baixa recarga contemporânea de água subterrânea. Outra situação possível é quando, sem qualquer tipo de planejamento, ocorre a exploração das reservas do aquífero como resultado da exploração intensiva em áreas onde a recarga atual é insuficiente e/ou onde há uma limitada continuidade hidráulica entre aquíferos profundos e suas zonas de recarga. Essa segunda situação citada abrange as condições do SAG na área de estudo.

Na situação de “exploração planejada” do recurso, a meta da gestão é utilizar ordenadamente as reservas do aquífero (partindo de uma situação do sistema com pouca exploração pré-existente), com benefícios esperados e impactos avaliados em um período de tempo específico. Nesse caso, devem ser identificadas, elaboradas e implementadas “estratégias de saída” apropriadas para quando o aquífero se encontrar praticamente vazio. Essa situação deve incluir opções socioeconômicas equilibradas sobre o uso das reservas de armazenamento do aquífero e da transição para uma economia futura que dependa menos dessa água. Uma consideração chave para definir essa “estratégia de saída” é a identificação e avaliação de um recurso hídrico substituto para esse abastecimento.

Na situação “não planejada” de exploração, é necessária a mudança e a implementação em certo momento para um “cenário de racionalização” da exploração, que tenha como metas principais a (1) estabilização hidráulica (ou excepcionalmente, a recuperação) do aquífero, ou (2) a utilização ordenada das reservas do aquífero, minimizando a deterioração de sua qualidade,

maximizando a produtividade da água subterrânea e promovendo a transição social para uma economia menos dependente dessa água.

Em ambos os casos, as taxas de exploração da água subterrânea devem ser reduzidas. Para isso, é necessário introduzir medidas de gestão da demanda hídrica, entre elas, a cobrança apropriada pelo uso da água subterrânea e incentivos para a economia real da água. A longo prazo, deve-se dar prioridade para o abastecimento de água para consumo humano, possivelmente descartando usos poucos produtivos.

5.6 Conhecimentos do sistema para a gestão adequada

Visando o manejo eficaz da utilização da água subterrânea não renovável, Foster *et al.* (2006) estabelece que deve ser realizada uma caracterização correta do sistema aquífero que objetive prognósticos adequados de:

- Disponibilidade da água subterrânea e da distribuição ordenada de poços que é proposta para explorá-la durante certo período de tempo;
- Impactos da exploração sobre o próprio sistema aquífero, sobre os usuários e/ou qualquer ecossistema terrestre e aquático relacionado;
- Mudança da qualidade da água subterrânea durante o período de exploração intensa do aquífero.

Essa caracterização requer uma investigação hidrogeológica que avalie certos fatores chave. Em contraste à caracterização de recursos renováveis de água subterrânea, um componente vital é a avaliação do armazenamento das seções do aquífero que serão drenadas futuramente (ou que sejam drenadas atualmente) por bombeamento.

No cenário de “exploração planejada”, os impactos da exploração devem ser avaliados, sobretudo nos usuários tradicionais da água subterrânea na região. Caso seja verificado que por conta desses impactos eles sofram uma diminuição de seus direitos ao uso, deve ser provido algum tipo de indenização. O conceito fundamental desse cenário deve ser assegurar que ao final do período proposto de exploração intensa existam reservas suficiente de água subterrânea passível de extração e com qualidade aceitável no sistema aquífero para atender às atividade pré-existente (mesmo que a um custo maior). Outra maneira de obter sucesso na gestão desse cenário é restringir o

“abatimento meta” da exploração intensa para que a médio prazo esta seja menor que um determinado valor após certo tempo, por exemplo uma condição de 20 m de abatimento após 20 anos de exploração.

5.7 Considerações socioeconômicas para a gestão

Para a gestão de águas subterrâneas não renováveis, a avaliação socioeconômica das opções para explorar as reservas do aquífero e determinar seus impactos inclui os usuários potenciais (atuais e futuros) das reservas do aquífero, o valor do uso proposto em relação ao valor da água subterrânea, e a avaliação e previsões da situação futura de esgotamento das reservas do aquífero, considerando o cálculo dos custos preliminares da possível “estratégia de saída”.

É vital que a água subterrânea seja utilizada com máxima eficiência hidráulica e produtividade econômica, o que implica no reuso intenso para fins urbanos, industriais e minerais, assim como um controle minucioso da irrigação agrícola. Adicionalmente, tanto para a taxa de uma cobrança realista pelo uso como para embasar a aplicação da regulamentação, é necessário um sistema aceitável para se medir ou estimar os volumes explorados visando desestimular usos ineficientes e improdutivos.

Com o objetivo de criar condições sociais que conduzam a uma verdadeira gestão participativa do aquífero, é essencial realizar campanhas públicas de comunicação sobre a natureza, o caráter único e o valor da água subterrânea não renovável. Nesse contexto, toda a informação sobre a água subterrânea (sintetizada de maneira confiável e independente), deve estar a disposição dos grupos interessados e das comunidades locais.

É importante salientar que a água subterrânea não renovável deve ser tratada com um recurso de propriedade pública (bem comum). Também é importante estabelecer o nível governamental para a tomada de decisões sobre a exploração das reservas do aquífero. De acordo com a escala territorial do aquífero, as decisões tendem a estar a cargo níveis políticos mais altos, como governadores, vice-presidentes ou presidente, com a assessoria de um comitê composto por diversos setores da sociedade. É desejável que o nível político

mais alto encarregado seja atribuído da elaboração de um “plano de racionalização do recurso hídrico não renovável” (Foster *et al.*, 2006).

5.8 Arranjo institucional para o uso socialmente sustentável

O arranjo institucional preferível é aquele em que todas as funções da gestão da água subterrânea estão a cargo de uma só agência governamental, cujo âmbito de competência territorial seja apropriado ao aquífero em questão. Se isso não for possível, deve-se reunir todos os órgãos e agências que tenham a ver com a exploração da água subterrânea e com a gestão ambiental através de um comitê coordenador. Em ambos os casos, a administração dos recursos hídricos deve ter autoridade para:

- Declarar “zona especial” à região do aquífero que será objeto da exploração dos recursos não renováveis, sujeito a programas específicos para a gestão da demanda;
- Estabelecer, de acordo com o órgão governamental (estadual ou federal), uma unidade especial para coordenar a gestão do recurso do aquífero em questão.

A participação plena dos usuários da água subterrânea é chave para a implantação bem sucedida das medidas de gestão. Para isso, o melhor enfoque é estabelecer uma organização para a gestão dos aquíferos, que inclua representantes tanto dos principais grupos de usuários em nível setorial e geográfico, como de agências governamentais, autoridades locais e outros grupos interessados.

A legislação nacional de águas subterrâneas por si só, se existente, geralmente não proporciona uma base sólida para proporcionar a gestão adequada de recursos hídricos não renováveis. Devem ser estabelecidas disposições especiais para o manejo das reservas de um aquífero específico por meio de regulamentos, que estejam embasados administrativamente e tecnicamente. Também é importante não abordar a legislação sobre água subterrânea de forma distinta das legislações de outros setores, que possam ter um impacto direto sobre os recursos da água subterrânea.

O estabelecimento de um sistema de direitos de exploração de água subterrânea (denominado de permissão, licença ou concessão) possui alta

prioridade. Esses direitos devem ser consistentes com a realidade hidrogeológica dos níveis de água subterrânea em contínuo abatimento, com poços cujo rendimento possa estar subdimensionado e com uma qualidade de água que possivelmente se deteriore. Em consequência, as permissões, para vazões especificadas de exploração, devem ter um limite de tempo de longo prazo, mas também devem estar sujeitas a revisões iniciais e modificações depois de 5 ou 10 anos, para quando, por meio de monitoramento, tenha-se maior conhecimento sobre a resposta do aquífero à exploração da água. Na prática, é possível que a regulamentação sobre o uso da água implementada com base comunitária e poder suficiente (verdadeira valia) seja mais efetiva que as permissões de extração legalmente formalizadas.

A existência de permissões com limite de tempo sujeito a revisão normalmente estimulam os empreendedores detentores dessas licenças a proporcionar informações periódicas sobre os poços. Corresponderá ao órgão responsável pela administração do recurso hídrico estipular os arranjos institucionais apropriados, através de um tipo de banco de dados do aquífero, para arquivar, processar, interpretar e difundir essas informações.

Em relação a aquíferos que contém grandes reservas de água subterrânea não renovável em condições transfronteiriças, seja entre países (como por exemplo, o SAG), províncias e/ou estados autônomos dentro de um mesmo país, pode-se obter grandes benefícios mútuos por meio de:

- Operação de programas de monitoramento de água subterrânea conjuntos e coordenados;
- Criação de uma base de dados comuns sobre a água subterrânea ou um mecanismo comum para a troca de informações;
- Adoção de políticas coordenadas para o planejamento, utilização e gestão de recursos de água subterrânea, e procedimentos para a resolução de conflitos;

Estabelecimento de legislações e regulamentos relevantes de forma equivalente entre as unidades abrangidas pelo sistema aquífero.

6 MODELO CONCEITUAL DE FLUXO

Cinco camadas com comportamentos hidrogeológicos distintos foram definidas para a área de estudos: (i) Grupo Bauru; (ii) Formação Serra Geral; (iii) Formação Botucatu; (iv) Formação Pirambóia; e (v) Formação Corumbataí. O empilhamento estratigráfico pode ser verificado na Figura 6, que representa uma compilação das seções produzidas e suas respectivas orientações espaciais na área de estudo.

Figura 6: Compilação das seções geológicas da área de estudo.

A camada referente às formações do Grupo Bauru é pouco espessa, composta por arenitos continentais quartzosos, com espessuras em torno de 150 m, recobrando o basalto. A Formação Serra Geral apresenta maior espessura, média de 700 m, e é considerada como um aquífero basáltico que atribui uma recarga vertical nula ao SAG.

A camada correspondente ao SAG é subdividida em duas, devido às diferentes características hidrogeológicas das formações que as compõem, sendo a

camada da Formação Botucatu, com espessuras de cerca de 150 m, composta por arenitos eólicos bem selecionados, o que confere maiores valores de condutividade hidráulica. Já a camada da Formação Pirambóia, com espessuras de cerca de 200 m, é composta por arenitos com sedimentos mais finos e níveis pelíticos, e possui menores valores de condutividade hidráulica. O estudo de Silva (1983) que revela valores de espessura das formações que compõem o SAG encontra-se na ordem de 150 a 400 m. Esses valores estão de acordo com os levantados no presente trabalho.

A última camada, definida pelo aquitarde silto-argiloso das formações Rio do Rasto e Corumbataí (Grupo Passa Dois), possui média de 120 m de espessura e baixo valor de condutividade hidráulica. Na área de estudo, os poços selecionados não alcançam profundidade considerável nessa camada.

É importante ressaltar a utilidade dos perfis geofísicos na diferenciação das camadas do Botucatu e do Pirambóia dentro do SAG na área de estudo. A perfilagem geofísica permite, através de uma simples análise visual, a identificação do ponto de contato entre as duas camadas aquíferas, pois o Pirambóia tem um conteúdo de argila maior que o Botucatu. Essa variação granulométrica torna-se evidente no comportamento da perfilagem de raios gama, que foi realizado em 7 dos 14 poços selecionados para o modelo conceitual (Figura 7).

Figura 7: Perfil Geofísico em Gama (Coluna 1), R (Coluna 2) e SP (Coluna 3) do poço Palácio das Águas (destaque quadriculado para as zonas com maior porção argilosa).

Na Figura 7, referente ao perfil geofísico do poço Palácio das Águas, destaca-se o intervalo entre 900 e 950 m de profundidade com visíveis picos de maiores valores de raios gama, indicando intercalações de argila em um pacote arenoso, que se relaciona ao contato entre as formações Botucatu e Pirambóia. A Figura 8 apresenta o mapa potenciométrico do SAG na área de estudo, com base nos dados de níveis estáticos dos 8 poços selecionados. Observa-se o sentido de fluxo predominante de NE para SW, com direção para SW. As cargas hidráulicas principais na área oscilam de 450 a 350 m.

Figura 8: Mapa Potenciométrico do SAG na área de estudo.

Com relação à recarga lenta, advinda da zona de afloramento do SAG a leste, Hirata *et al.* (2011) definiu, a partir da lei de Darcy, utilizando-se de linhas equipotenciais e um valor médio de condutividade hidráulica para as duas formações, valores da ordem 10 a 20 mm/ano. Esse resultado corrobora com os valores obtidos por Wendland *et al.*, (2007), que determinaram um valor estimado de recarga do aquífero profundo de 40 mm/ano, baseado no balanço hídrico da Bacia do Ribeirão da Onça, em São Carlos.

Para a estimativa das velocidades reais médias no aquífero confinado regional, foi realizado o seguinte procedimento. Primeiramente, a partir do mapa potenciométrico regional do Estado de São Paulo, foram adotadas quatro seções delimitadas em suas extremidades por duas linhas equipotenciais relativamente paralelas. O gradiente hidráulico (i) entre elas foi obtido, e considerando uma condutividade média de 8,7 m/dia para a Formação Botucatu e de 2,5 m/dia para a Formação Pirambóia, obteve-se o fluxo subterrâneo (q). A partir disso, a relação do fluxo com a porosidade efetiva (η_{ef}) de cada formação resultou na obtenção de valores médios de velocidade real

da água subterrânea para a Formação Botucatu (0,0285 m/dia) e para a Formação Pirambóia (0,0137 m/dia) (Tabela 7).

Tabela 7: Velocidade real de fluxo média para o SAG confinado na região norte do Estado de São Paulo (nef Botucatu = 0,25 e nef Pirambóia = 0,15).

Trechos	Curvas equipotenciais (m)		Largura (m)	Gradiente Hidráulico	Velocidade real de fluxo (m/dia)	
	Montante	Jusante			Botucatu	Pirambóia
I	550	500	30000	$1,7 \times 10^{-3}$	0,05916	$28,4 \times 10^{-3}$
II	500	450	75000	$6,7 \times 10^{-4}$	0,02332	$11,2 \times 10^{-3}$
III	450	400	210000	$2,4 \times 10^{-4}$	$8,35 \times 10^{-3}$	$4,0 \times 10^{-3}$
IV	400	350	75000	$1,7 \times 10^{-3}$	0,02332	$28,4 \times 10^{-3}$
MÉDIA	-	-	-	-	$28,5 \times 10^{-3}$	$13,7 \times 10^{-3}$

A atribuição dos parâmetros hidrogeológicos de cada camada do SAG na área de estudo (Tabela 8) se baseou nos dados obtidos no banco de dados do DAEE/Araraquara (testes de bombeamento, perfilagens geofísicas etc.) e em valores encontrados na literatura.

Tabela 8: Parâmetros de cada camada do SAG na área de estudo adotados no Modelo Conceitual.

Camadas	Espessuras Médias (m)	K (m/s)	Transmissividade (m^2/dia)	Armazenamento (S)	n _{ef}	n
Fm. Botucatu	152	$2,98 \times 10^{-2}$ - $1,87 \times 10^{-6}$	241 - 732	1×10^{-3} - 1×10^{-5}	-	0.20 - 0.40
Fm. Pirambóia	156				0.10 - 0.30	0.20 - 0.30

Importante ressaltar que a amplitude dos valores observados, principalmente para os parâmetros de condutividade hidráulica (K) e transmissividade (T), devem-se ao fato de que os testes de bombeamento avaliados pertencem a poços totalmente penetrantes, isto é, que retiram água de todas as camadas aquíferas, não permitindo a maior precisão desses valores.

É possível afirmar que tal aquífero apresenta valores de transmissividade entre 2,7 e 970 m^2/dia e valores de capacidade específica (Q/s) entre 1,2 e 18,3 $m^3/h/m$. Junto aos valores de condutividade hidráulica (k) expressos na Tabela 8, esses parâmetros atribuem ao sistema uma boa produtividade aquífera.

De acordo com os dados de capacidade específica (Q/s) e transmissividade (T) apresentados no Anexo A, referentes aos poços em São José do Rio Preto, foi

elaborado um gráfico de correlação entre esses dois parâmetros, apresentado na Figura 9.

Figura 9: Relação entre capacidade específica (Q/s) e transmissividade (T) dos poços tubulares do SAG em São José do Rio Preto.

No gráfico apresentado, fica nítida a moderada correlação entre os parâmetros de 5 poços selecionados na área de estudo: $R^2=0,2823$, em que $T=25,068Q/s+122,1$.

O SAG apresenta comportamento de aquífero granular, confinado, sem recarga direta vertical (sem contribuição hídrica das camadas sotopostas e sobrepostas ao SAG) e recarga indireta proveniente do fluxo da água subterrânea desde as áreas de afloramento, na porção centro-leste do Estado de São Paulo (aproximadamente 200 km de distância) (Figura 10).

7 MODELO NUMÉRICO DE FLUXO

Visando a representação matemática das condições hidrogeológicas naturais da área de estudo, foi elaborado um exercício de modelagem numérica de fluxo utilizando o código MODFLOW.

A modelação foi baseada em observações reais obtidas nos ensaios e estudos que embasaram o modelo conceitual de fluxo (Capítulo 6) e em informações bibliográficas referentes à área analisada.

Primeiramente, o modelo foi elaborado em modo estacionário para 100 anos de tempo de simulação, com o intuito de verificar a adequação dos dados de *input*. A seguir, ele foi simulado em modo transiente, permitindo a retirada da água do armazenamento (S) devido ao bombeamento dos poços.

Para a confecção desse modelo numérico, foram impostas determinadas limitações para a adequação dos dados ao exercício pretendido:

- As camadas do modelo foram dispostas horizontalmente e o gradiente hidráulico regional foi simulado considerando-se condições de contorno conhecidas (Tipo 1) e sem considerar diferenças locais;
- A espessura utilizada foi igualmente de valor médio e não considerada variações locais na espessura, assim como na distribuição da condutividade hidráulica ou armazenamento.

7.1 Desenho da malha do modelo

A malha básica (Figura 11) foi selecionada de acordo com a área de domínio do modelo, sendo esta suficientemente grande para que as condições de contorno não influenciem os resultados do modelo de maneira significativa.

Figura 11: Desenho da malha básica do modelo

A orientação inicial da malha da malha foi definida com uma dimensão representativa de aproximadamente 100 x 100 km, centralizada na área de estudo, e dividida em 50 linhas por 50 colunas (2.500 células). Na área de interesse, o espaçamento da malha foi reduzido (aumento na resolução do modelo com células de 1 km x 1 km) para representar com maior detalhe as variações locais, favorecendo a estabilidade do modelo, resultando em 59 linhas e 58 colunas. Considerando as quatro camadas verticais estabelecidas no modelo, temos 13.688 células.

A elevação e a distribuição da cota das camadas do modelo foram estabelecidas de acordo com as espessuras médias das unidades e a partir da cota topográfica média da cidade de São José do Rio Preto, em 490 msnm. O Sistema Aquífero Bauru não foi considerado no modelo e tampouco as variações na topografia, pois estes não influenciam os resultados do exercício numérico proposto (valores em relação ao nível do mar).

- Camada 1: Aquitarde Serra Geral (de 490 a -300 m);
- Camada 2: Aquífero Botucatu (de -300 a -450 m);
- Camada 3: Aquífero Pirambóia (de -450 a -600 m);
- Camada 4: Aquitarde Passa Dois (de -600 a -720 m).

A Figura 12 representa o empilhamento das camadas na porção central do modelo.

Figura 12: Representação leste-oeste da distribuição das camadas, respectivamente representando o Aquitarde Serra Geral, o Aquífero Botucatu, o Aquífero Pirambóia e o Aquitarde Passa Dois.

7.2 Poços de bombeamento

Oito poços de bombeamento (Santo Antônio, Solo Sagrado, Jardim Eldorado, Bairro Alto Alegre, Bairro Campo Verde, Palácio das Águas, Córrego do Borá e Palácio das Águas) foram identificados na área de estudo (Figura 13).

Figura 13: Poços de bombeamento localizados na área (detalhe do modelo).

As informações inseridas desses poços (Anexo A) para a validação no modelo foram: coordenadas UTM através de X(m) e Y(m), intervalo de filtros dos poços, período de bombeamento (horas) e vazão (m^3/dia).

7.3 Atribuição e distribuição das propriedades hidráulicas

As seguintes propriedades hidráulicas foram atribuídas ao modelo: condutividade hidráulica, armazenamento, porosidade e carga hidráulica.

7.3.1 Condutividade hidráulica

A atribuição da condutividade hidráulica às camadas do modelo é feita por meio da consideração dessa propriedade nas três direções de fluxo avaliadas pelo código de modelagem: Kx, Ky e Kz, sendo a unidade em m/dia.

Figura 14: Representação leste-oeste da distribuição das condutividades hidráulicas (k) nas camadas.

Os valores para essas propriedades foram estabelecidos por meio da comparação entre os dados dos testes de bombeamento e a variação dos valores obtidos de K, T e S, de acordo com o Modelo Conceitual.

A condutividade hidráulica da camada 1, referente ao Aquitarde Serra Geral, foi atribuída com valores da ordem de 10^{-7} m/dia, na tentativa de representar o fluxo vertical nulo entre as camadas.

7.3.2 Armazenamento e porosidade

Em simulações transientes, o armazenamento (S) é uma das condições iniciais para a modelagem. No caso do presente modelo numérico, o armazenamento é uma propriedade importante, haja visto que se pretende modelar um aquífero ideal do tipo Theis, onde a água provem exclusivamente do rearranjo do arcabouço geológico, ademais da expansão (mínima) da água.

A Figura 15 apresenta as quatro zonas de armazenamento e porosidade do modelo numérico em perfil e os respectivos valores adotados. Essas quatro zonas são representadas numericamente por armazenamento específico S_s (1/m), S_y (adimensional), porosidade efetiva e porosidade total. Apesar da atribuição de valores para S_y , o modelo não utiliza esses dados nas suas rotinas, pois o aquífero nunca apresenta comportamento livre e drenante durante todo o período simulado.

Figura 15: Zonas de armazenamento e porosidade do modelo.

7.4 Carga hidráulica inicial

A carga hidráulica inicial representa a carga simulada em condição estacionária, sem bombeamento e de acordo com o imaginado pelo modelo conceitual. As linhas equipotenciais resultantes calculadas nesse modo foram avaliadas, e as cargas hidráulicas dos poços atribuídas a eles no modo

transiente. Isso permitiu que o mapa de linhas equipotenciais resultantes do modelo no modo estacionário fosse equivalente ao mapa de cargas hidráulicas iniciais no modo transiente.

7.5 Condições de contorno

As principais condições de contorno para um modelo numérico de fluxo são as atribuições de rios/lagos, canais/drenos, divisores de água e dados variáveis com o tempo, além de cargas hidráulicas constantes ou de tipo 3. No presente modelo, as influências do uso do solo e das feições hídricas superficiais sobre o SAG confinado na área de estudo são praticamente nulas. Portanto, a representação de corpos d'água superficiais foram descartadas.

As principais condições representadas para o modelo foram as cargas constantes nas extremidades da área, a recarga nula e os meios de descarga do aquífero confinado profundo.

As condições de contorno de borda do modelo foram configuradas por meio de cargas constantes admitidas para todas as quatro camadas (Figura 16). No limite leste da área foi aplicada uma carga constante de 650m. No limite oeste da área foi aplicada uma carga constante de 150m. Esses valores foram obtidos obedecendo ao gradiente hidráulico de 0,005 m/m atribuído ao SAG confinado no Estado de São Paulo (OEA, 2009). Nos limites norte e sul da área modelada, foram aplicadas cargas constantes com variação linear de 600 a 200 m no sentido de leste para oeste.

Figura 16: Representação das cargas constantes de borda. Poços de bombeamento ao centro.

Para representar a recarga vertical nula do SAG na área de estudo, foi adotada uma zona de recarga 1 (*Recharge Zone 1*), com período de duração equivalente ao tempo modelado (100 anos) e valor igual a 0 mm/ano. Essa condição permite que toda a água do SAG profundo no modelo seja proveniente do fluxo horizontal natural e do próprio armazenamento (condição de Theis).

A descarga principal do modelo foi definida pela saída da água subterrânea através das taxas de vazão dos poços de bombeamento e do próprio fluxo horizontal regional do aquífero.

7.6 Calibração

O processo de calibração do modelo numérico considera observações específicas da área de estudo e estão sujeitas a incertezas e subjetividades nas interpretações. Além disso, são necessários critérios qualitativos e quantitativos para a calibração, que por sua vez, não é única.

Para a calibração do modelo, deve-se considerar que as cargas equipotenciais resultantes deveriam se assemelhar ao desenho das linhas equipotenciais do Modelo Conceitual.

No entanto, o presente modelo numérico, devido às limitações impostas para o exercício, é um modelo geral que simula uma área equivalente à área de estudo em condições de confinamento, visando entender o quanto se pode explorar o aquífero. Assim, este não foi acompanhado pelo processo de calibração. É importante ressaltar a ausência de dados para toda a área que se pretendeu modelar, configurando uma limitação ao exercício.

7.7 Resultados obtidos

O primeiro resultado obtido foi a simulação do modelo numérico em modo estacionário. A Figura 17 apresenta as linhas equipotenciais da camada 2 (Aquífero Botucatu) obtidas na simulação do modelo em estado estacionário para um período de 100 anos.

Figura 17: Linhas equipotenciais resultantes no modo estacionário (à esquerda sem bombeamento e à direita com bombeamento).

Importante salientar o balanço de massa obtido na situação de exploração de água no modo estacionário (Figura 18). Ela mostra que todo o volume bombeado é retirado das cargas constantes do modelo.

Figura 18: Balanço de massa no modo estacionário para um período de 100 anos.

Para modelar a exploração de água do armazenamento, o modelo foi então simulado no modo transiente. Esse configura o objetivo do trabalho, visando o entendimento de uma situação de exploração de lavra da água do aquífero confinado. A Figura 19 mostra o comportamento das cargas equipotenciais na camada 2, em modo transiente, para o período de 100 anos.

Figura 19: Mapa de cargas equipotenciais resultantes no modo transiente em 100 anos simulados.

A Figura 20 mostra a evolução do balanço de massa do modelo em modo transiente ao longo do período simulado de 100 anos. É importante notar que o volume de água do modelo entra e sai da carga constante, o que é esperado,

mas que o volume de água explotado pelos poços é muito similar àquele que sai pelo armazenamento, evidenciando a situação de exploração de lavra de água do aquífero.

Figura 20: Evolução do balanço de massa ao longo do tempo com o bombeamento.

7.7.1 Simulação de cenário de exploração até 500 anos

Visando o gerenciamento adequado das reservas de um recurso hídrico, é importante estabelecer os limites de extração de água de um aquífero. Considerando-se que o aquífero é confinado do tipo Theis e a água deveria vir somente do armazenamento, espera-se que a extração será sempre acompanhada por quedas constantes do nível de água até a sua exaustão. O limite de extração considerada foi aquele definido por Foster *et al.* (2006), que a partir de 400 m de nível dinâmico, não há equipamentos de bombeamento hoje que permita a extração de água em valores competitivos e econômicos. Portanto, foi considerado um cenário de exploração em tempos longos, buscando quando a queda do nível alcançaria esse valor de 400 m (ou 90 msnm), com as mesmas vazões dos poços de bombeamento atuais. O tempo de até 500 anos foi considerado adequado para simular um tempo muito distante.

A Figura 21 apresenta a evolução dos mapas de cargas equipotenciais para a camada 2 sob bombeamento em quatro cenários: 200, 300, 400 e 500 anos. Ela retrata claramente a boa resposta do aquífero ao bombeamento permanente, com as vazões de exploração atuais, ao longo de todo o período modelado.

Figura 21: Evolução das cargas equipotenciais para bombeamento de até 500 anos.

Adicionalmente, é verificado que a carga resultante desse bombeamento prolongado sob condições atuais alcança valores de carga em torno de 350 msnm, permanecendo longe da premissa técnica limitante adotada de 90 m (valor estimado para o modelo de acordo com a cota topográfica superficial de 490 m). Assim, conclui-se que a extração atual poderá ser realizada sem problemas por um tempo muito prolongado de tempo.

7.7.2 Simulação de cenário de exploração com mais poços de bombeamento

Com o objetivo de entender a capacidade de exploração a qual o aquífero pode ser submetido, foram simulados cenários com a instalação de mais poços, com vazões equivalentes ao dos atuais ($10.000 \text{ m}^3/\text{dia}$), dispostos no centro da área de interesse (mancha urbana de São José do Rio Preto).

As Figuras Figura 22, Figura 23 e Figura 24 apresentam os cenários com o dobro, triplo e quádruplo de poços de bombeamento simulados, respectivamente. Elas mostram que mesmo com cinco vezes mais poços de bombeamento na área de interesse, o nível d'água crítico (carga de 90 m) não é atingido após 100 anos, evidenciando a disponibilidade de água do aquífero.

Figura 22: Cenário de exploração com 16 poços em 100 anos de bombeamento.

Figura 23: Cenário de exploração com 24 poços em 100 anos de bombeamento.

Figura 24: Cenário de exploração com 40 poços em 100 anos de bombeamento.

7.7.3 Testes de sensibilidade do modelo

Com o objetivo de avaliar a sensibilidade do modelo numérico a alterações de seus parâmetros de entrada, foram simulados cenários com a variação dos valores de condutividade hidráulica (K) e armazenamento (S) em uma ordem de magnitude para mais e para menos e analisar a reação do modelo..

Para facilitar a observação dos resultados desses testes, foi aplicada ao modelo uma situação de stress hídrico de exploração, com a vazão dos 8 poços de bombeamento atuais aumentada em quatro vezes (40.000 m³/dia).

7.7.3.1 Sensibilidade às alterações nos valores de condutividade hidráulica

As Figuras Figura 25 e Figura 26 mostram cenários de variação dos valores de condutividade hidráulica das camadas 2 e 3 em situação de bombeamento de até 100 anos. Na Figura 25, os valores de condutividade hidráulica considerados para as camadas 2 e 3 são: Kx e Ky de 35 m/dia e Kz de 3,5 m/dia para a camada 2; Kx e Ky de 25 m/dia e Kz de 2,5 m/dia para a camada 3.

Na Figura 26, os valores de condutividade hidráulica considerados para as camadas 2 e 3 são: Kx e Ky de 0,35 m/dia e Kz de 0,035 m/dia para a camada 2; Kx e Ky de 0,25 m/dia e Kz de 0,025 m/dia para a camada 3.

Figura 25: Cenário de aumento dos valores da condutividade hidráulica das camadas 2 e 3 em uma ordem de magnitude.

Figura 26: Cenário de redução dos valores da condutividade hidráulica das camadas 2 e 3 em uma ordem de magnitude.

Essas figuras mostram que, principalmente na análise da Figura 26, o modelo é muito sensível a variações do valor de condutividade hidráulica. Portanto, a

caracterização adequada do aquífero é fundamental, por meio de corretos testes de bombeamento.

7.7.3.2 Sensibilidade às alterações nos valores de armazenamento

As Figuras Figura 27 e Figura 29 mostram cenários de variação dos valores de armazenamento das camadas 2 e 3 em situação de bombeamento de até 100 anos. Na Figura 27, o valor de armazenamento considerado para as camadas 2 e 3 são: S_s de 0,01/m para a camada 2; S_s de 0,001/m para a camada 3.

Figura 27: Cenário de aumento dos valores do armazenamento das camadas 2 e 3 em uma ordem de magnitude.

De acordo com a Figura 28, é observado que a água retirada pelos poços ao longo do tempo vem predominantemente do armazenamento. Portanto, o aumento do valor de S em uma ordem de magnitude não alterou a característica de lavra da água do aquífero, originada do armazenamento.

Figura 28: Balanço de massa em três intervalos modelados (10, 50 e 100 anos) considerando cenário de aumento no valor de S.

Na Figura 29, os valor de armazenamento considerado para as camadas 2 e 3 são: Ss de 0,0001/m para a camada 2; Ss de 0,00001/m para a camada 3.

Figura 29: Cenário de diminuição dos valores do armazenamento das camadas 2 e 3 em uma ordem de magnitude.

Figura 30: Balanço de massa em dois intervalos modelados (10 e 100 anos) considerando cenário de diminuição no valor de S.

A Figura 30 mostra a considerável diferença no balanço de massa causada pela diminuição em uma ordem de grandeza dos valores de S para as camadas aquíferas. Nessa situação, a depauperação dos valores de saída de água pelo armazenamento é visível, sendo o volume de água captado originado majoritariamente nas cargas constantes.

Essa análise mostrou que as alterações dos valores de armazenamento das camadas 2 e 3 implicam alta sensibilidade ao modelo. Com isso, é fundamental que os valores dessa propriedade sejam muito bem obtidos quando da caracterização do aquífero. A obtenção desse valor real em campo é sempre muito mais difícil, pois exige que o teste de bombeamento envolva um poço de monitoramento para acompanhar a queda dos níveis potenciométricos no tempo.

8 ANÁLISE DOS CENÁRIOS DE MANEJO

Quando avalia-se o manejo da exploração das águas do SAG, duas questões principais emergem:

- Qual é o tempo máximo que o aquífero poderá ser bombeado, considerando-se as vazões atuais?
- Qual é a vazão máxima que se pode extrair, considerando mais poços sendo perfurados na área urbana?

Os resultados do exercício de modelagem mostraram que, para um tempo simulado de até 500 anos, a situação atual de exploração de água do SAG em São José do Rio Preto não oferece risco às suas reservas, pois os maiores níveis dinâmicos ainda estão longe dos 400 m, considerado como limitação técnica para os equipamentos de bombeamento. Assim, a empresa concessionária e mesmo o próprio Comitê de Bacia da região não precisam se preocupar com as extrações hoje em curso. Entretanto, embora o armazenamento possa sustentar as extrações atuais por mais de 500 anos, é importante verificar que as interferências entre poços pode resultar em aumentos de gastos com energia elétrica, que a longo prazo podem ser significativos.

Da mesma forma, a simulação de instalação de mais poços no modelo numérico mostrou que, até um aumento considerável da extração de cinco vezes mais poços, o aquífero é capaz de suprir tal demanda, mostrando a alta disponibilidade hídrica do recurso. Esse cenário permitiria ao gestor público transferir todo o abastecimento de água da cidade de São José do Rio Preto para o SAG, hoje com contribuições do Sistema Aquífero Bauru (principal manancial) e águas do rio Preto.

O aumento da cidade e da sua importância econômica são notáveis, o que tem mostrado a necessidade de aumentar a disponibilidade de água para a população e dos serviços econômicos associados a ela. Entre as alternativas, há de se considerar pelo menos três delas:

- Captação e transporte de água do rio Grande, no norte do município;
- Aumento da exploração de água do Sistema Aquífero Bauru; e
- Aumento da exploração de água do Sistema Aquífero Guarani.

Sem entrar no mérito técnico e econômico da primeira alternativa, que foge ao escopo desta dissertação, e mesmo da segunda, que em estudos recentes têm mostrado que o Sistema Aquífero Bauru apresenta uma das maiores densidades de poços tubulares no país, com nítidos problemas de interferência, resultando em comprometimento de sua sustentabilidade econômica (Servmar, 2010), tem-se que dizer que os resultados da modelação fazem do SAG uma alternativa bastante atrativa para o abastecimento público, pois:

- a) é um recurso bastante protegido de contaminação, pois as camadas de basalto da Formação Serra Geral impedem qualquer possibilidade de contaminação antrópica, ademais dos fluxos ascendentes de água do SAG em relação às unidades superiores;
- b) é um recurso abundante para os cenários modelados de 100 e 500 anos, mostrando disponibilidade, com rebaixamentos não muito pronunciados;
- c) tem acesso bastante limitado. Devido ao custo e tempo de perfuração, o SAG é um aquífero pouco explotado por outros usuários privados. Assim, o controle, através de permissões de perfuração e outorga, é bastante facilitado, mantendo-se assim o manejo do aquífero.

Entretanto, tem-se que considerar que os resultados são extremamente dependentes dos valores hidráulicos do aquífero e de suas incertezas, como mostrado no teste de sensibilidade. Variações de uma ordem de magnitude da condutividade hidráulica e/ou do armazenamento poderiam comprometer esses resultados obtidos.

Assim, muito embora não haja risco de desabastecimento devido às atuais extrações do SAG na cidade, um programa de manejo deveria ser proposto, com reais vantagens tanto para a concessionária pública de água, como para o Comitê da Bacia Hidrográfica. Este programa deveria conter, minimamente, os seguintes pontos:

- a) melhorar o conhecimento dos aquíferos da região e particularmente do SAG, com valores mais precisos e confiáveis de transmissividade (espessura saturada e condutividade hidráulica) e de coeficiente de armazenamento. Estes valores deveriam ser obtidos em testes de bombeamento de longa duração utilizando-se de outros poços de

produção para monitorar os níveis hidráulicos, tendo-se obviamente que paralisá-los por longos períodos;

- b) instalar sistemas de medição contínua de níveis de água em todos os poços de produção, com uso de transdutores de pressão, para que os dados mostrem as respostas do aquífero ao stress do bombeamento e de sua interrupção no tempo;
- c) criar um modelo numérico de fluxo, com melhor definição e mais próximo às condições locais, que seria alimentado pelos novos dados obtidos no campo (níveis de água no tempo e de geologia, caso novos poços sejam construídos no local);
- d) acompanhar a perfuração e o uso da água do SAG em outros municípios, e proceder com o mesmo acompanhamento detalhado no item (b); e
- e) avaliar com regularidade de um ano, os resultados da modelação numérica, verificando a evolução dos níveis hidráulicos do SAG, e indicando alguma alteração na sua forma de exploração. Esse procedimento permitiria corrigir eventuais problemas detectados (devido a incertezas inerentes a todos os estudos hidrogeológicos) e estabelecer melhores práticas de manejo. O procedimento seria muito útil também na avaliação de novas captações no SAG, identificando as melhores condições de exploração e locação da obra. Igualmente, esses novos poços forneceriam mais dados que seriam utilizados para melhorar a modelação numérica e os processos decisórios futuros.

Finalmente, o resultado desse estudo mostra que o gerenciamento do SAG não deve ser restrito a um só município, mas sim, a toda uma região, incluindo os outros municípios usuários, pois o conjunto da extração poderá interferir no planejamento de sua exploração. Assim, entende-se que caberia ao Comitê de Bacia estar a frente de um programa de avaliação e decisão da exploração do SAG, dando um cunho de manejo e não apenas permitindo que as decisões de uso do SAG se restrinjam à operação de poços tubulares, a cargo das concessionárias.

9 CONCLUSÕES

O Sistema Aquífero Guarani confinado em São José do Rio Preto, constituído pelas formações Botucatu e Pirambóia, apresenta uma excelente capacidade de produção. Os poços avaliados de acordo com a descrição de seus perfis apresentam vazões médias de 454 m³/h (máxima de 700 m³/h), com capacidade específica entre 1,205 e 18,338 m³/h/m. A espessura máxima medida do SAG na área de estudo é de 336 m (poço Solo Sagrado), mas possivelmente alcança até 350 m na região.

O SAG na área de estudo é explotado por 8 poços. O SEMAE é responsável por uma exploração total informada de 68.704 m³/dia, a qual atende basicamente ao abastecimento público. Contudo, essa extração é preocupante, uma vez que na área de estudo, o aquífero não possui recarga vertical originada das camadas superiores, configurando uma exploração em regime de lavra que resulta no constante abatimento dos níveis potenciométricos.

Atualmente no Brasil, e especialmente no Estado de São Paulo, existe uma política institucional específica voltada à gestão sustentável dos recursos hídricos, que incorpora princípios sobre o uso das águas, tendo como base a descentralização e a participação da sociedade. Contudo, essa política não contempla adequadamente o uso da água subterrânea, recurso este que necessita de uma abordagem diferente da das águas superficiais. Essa lacuna torna-se ainda mais evidente quando considerados os recursos hídricos não renováveis em regime de exploração atual de lavra, como o SAG na área de estudo.

Nesta dissertação, o modelo conceitual definiu que: as espessuras médias das formações Botucatu e Pirambóia são em torno de 150 metros cada, com condutividades hidráulicas (K) da ordem de 3×10^{-2} a 2×10^{-6} m/s, valores de transmissividade (T) entre 241 e 732 m²/dia e armazenamento (S) da ordem de 10^{-3} a 10^{-5} . As porosidades efetivas oscilam entre 0,10 e 0,30 e os valores de porosidade total entre 0,20 e 0,40. Importante ressaltar que a amplitude dos valores observados, principalmente para os parâmetros de condutividade hidráulica (K) e transmissividade (T), devem-se ao fato de que os testes de bombeamento avaliados pertencem a poços parcial e outros totalmente penetrantes, dificultando chegar-se aos reais valores em toda a área de estudo.

Portanto, o SAG apresenta comportamento de aquífero granular, confinado, sem recarga direta e a sua área de recarga mais próxima encontra-se a mais de 200 km de distância.

Em relação aos resultados obtidos na modelagem numérica de fluxo, é possível afirmar que o SAG é capaz de suprir a demanda atual de exploração dos poços de São José do Rio Preto por um período de pelo menos 500 anos. Adicionalmente, foi possível estimar que o SAG seja capaz de atender ao aumento considerável da demanda hídrica até cinco vezes maior que a atual, necessária ao abastecimento público em franca expansão por um período de no mínimo 100 anos.

Contudo, os testes de sensibilidade do modelo a alterações dos coeficientes de condutividade hidráulica e armazenamento mostraram que a caracterização adequada do aquífero é essencial para a confiabilidade do resultado, por meio de dados bem embasados e testes de bombeamento confiáveis e que os bons resultados da modelação são fortemente relacionados aos dados de condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEY, W.M. 2007. *Another budget myth: the significance of recoverable ground water in storage*. *Groundwater*, v. 45, nº 3, p. 251.
- 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*, v. 7, p. 317 – 336.
- ARAVENA, R. 2009. Estudio de la dinámica del agua subterránea em el Sistema Acuífero Guaraní (SAG) mediante técnicas isotópicas. *Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní*. Informe Técnico – Consórcio Guaraní. Montevideo, 54p.
- BEAR, J. 1972. Dynamics of fluids in porous media. *Elsevier*, New York, USA.
- CAMPOS, H.C.N.S. 2000. Modelación conceptual y matematica del Acuífero Guaraní, Cono Sur. Estudios Tecnológicos. *Acta Geológica Leopoldensia – Série Mapas*, v. 23, n. 4, p. 03 – 50.
- CHANG, H.K. 2001. Uso atual e potencial do Aquífero Guaraní – Brasil. *In: Proteção ambiental e gerenciamento sustentável integrado do Aquífero Guaraní*. Banco Mundial e OEA, Atividade 3b: Relatório Final. 54p.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB, 1997. Uso das águas subterrâneas para abastecimento público no Estado de São Paulo. CETESB, São Paulo, 48p.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (DAEE); INSTITUTO GEOLÓGICO (IG); INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT); SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM); 2005. Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo – Escala 1:1.000.000. Governo do Estado de São Paulo, Conselho Estadual de Recursos Hídricos, v.3. 119p.
- FERNANDES, A.J.; MALDANER, C.H.; PRESSINOTTI, M.N.; WAHNFRIED, I.; FERREIRA, L.; VARNIER, C.L.; IRITANI, M.A.; HIRATA, R. 2006. Modelo conceitual preliminar do Aquífero Serra Geral, Ribeirão Preto, SP. *Anais do Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, Curitiba – PR. 16p.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; VIDAL, A.; SCHMIDT, G.; GARDUÑO, H. 2009. A Iniciativa do Programa Sistema Aquífero Guaraní – Rumo à Gestão Prática

- da Água Subterrânea em um Contexto Transfronteiriço. *Coleção de Perfis de Caso nº 9*. GW-MATE, Banco Mundial. 28p.
- FOSTER, S.; NANNI, M.; KEMPER, K.; GARDUÑO, H.; TUINHOF, A. 2006. Utilización de agua subterránea no renovable: um enfoque socialmente sustentable para La gestión del recurso. *Série de Notas Informativas – Nota 11*. GW-MATE, Banco Mundial. 6p.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; VIDAL, A.; SCHMIDT, G.; GARDUÑO, H. 2009. A Iniciativa do Programa Sistema Aquífero Guarani – Rumo à Gestão Prática da Água Subterrânea em um Contexto Transfronteiriço. *Coleção de Perfis de Caso – Número 9*. GW-MATE, Banco Mundial. 28p.
- FRANK, H.T.; GOMES, M.E.B.; FORMOSO, M.L.L.; GARCIA, G.G. 2007. Contaminação de flúor dos aquíferos da Bacia do Paraná derivada da degaseificação de intrusivas da Formação Serra Geral: nova hipótese. *XV Encontro Nacional de Perfuradores de Poços – I Simpósio de Hidrogeologia do Sul-Sudeste*, Gramado – RS, Brasil. 12p.
- FUNDAÇÃO SISTEMA ESTADUAL DE ANÁLISE DE DADOS – SEADE. 2011. Demografia: população do estado supera 40 milhões. SEADE, São Paulo – SP. Disponível em: <http://www.seade.gov.br/>.
- GASTMANS, D. 2007. Hidrogeologia e Hidrogeoquímica do Sistema Aquífero Guarani na porção ocidental da Bacia Sedimentar do Paraná. Tese (Doutoramento em Geociências). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade do Estado de São Paulo, Rio Claro – SP. 194p.
- GASTMANS, D.; CHANG, H.K.; HUTCHEON, I. 2010. Groundwater geochemical evolution in the northern portion of the Guarani Aquifer System (Brazil) and its relationship to diagenetic features. *Applied Geochemistry*, v. 25, p. 16 – 33.
- GASTMANS, D.; VEROSLAVSKY, G.; CHANG, H.K.; MARMISOLLE, J.; OLEAGA, A. 2010. Influência do arcabouço hidroestratigráfico nas ocorrências de arsênio em águas subterrâneas ao longo do corredor termal do Rio Uruguai (Argentina – Brasil – Uruguai). *Geociências*, v. 29, n. 1. UNESP, São Paulo – SP. p. 105 – 120.
- GASTMANS, D.; VEROSLAVSKY, G.; CHANG, H.K.; CHANG, M.R.C.; PRESSINOTTI, M.M.N. 2012. Modelo Hidrogeológico Conceptual del

- Sistema Acuífero Guarani (SAG): una herramienta para la gestión. *Boletín Geológico y Minero*, v. 123, n. 3, p. 249 – 265.
- GESICKI, A.L.D. 2007. Evolução diagenética das Formações Pirambóia e Botucatu (Sistema Aquífero Guarani) no Estado de São Paulo. Tese de doutoramento. Universidade de São Paulo, São Paulo – SP. 158p.
- GILBOA, Y.; MERO, F.; MARIANO, I.B. 1976. The Botucatu Aquifer of South America: Model of an untapped continental aquifer. *Journal of Hydrology*, v. 29, p. 165 – 179.
- GLEICK, P.H.; PALANIAPPAN, M. 2010. *Peak water limits to freshwater withdrawal and use*. *PNAS*, v. 107, nº 25, p. 11155 – 11162.
- GÓMEZ, A.A. 2007. Análisis del comportamiento hidrológico subterráneo de las Formaciones Tacuarembó – Arapey del Sistema Acuífero Guarani, en el norte de Uruguay. Dissertação de Mestrado. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fé, Argentina. 149p.
- GÓMEZ, A.A.; RODRÍGUEZ, L.B.; VIVES, L.S. 2010. The Guarani Aquifer System: estimation of recharge along the Uruguay-Brazil border. *Hydrogeology Journal*, v. 18, p. 1667 – 1684.
- GÓMEZ, A.; VIVES, L.; RODRÍGUEZ, L.; COTA, S.D.S. 2012. Importancia de la formulación del régimen temporal de flujo en el modelo numérico del Sistema Acuífero Guarani. *Boletín Geológico y Minero*, v. 123, n. 3, p. 267 – 280.
- GOUVÊA, T.H.; WENDLAND, E.C. 2011. Influência de características do solo na variação do nível d'água em região de recarga do Aquífero Guarani. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 16, n. 1, p. 55 – 65.
- GUIGUER, N.; FRANZ, T. 1996. Visual Modflow, User's Manual. Waterloo hydrogeologic Inc., Waterloo, Canadá. 176p.
- HABERMEHL, M.A. 2006. The Great Artesian Basin, Australia. *In: Non-renewable groundwater resources – A guidebook on socially-sustainable management for water-policy makers*. Editado por Foster, S.; Loucks, D.P. UNESCO, IHP-VI, *Series on Groundwater*, n.10, p. 82 – 88.
- HARBAUGH, A.W.; BANTA, E.R.; HILL, M.C.; MACDONALD, M.G. 2000. Modflow 2000, The U.S. Geological Survey modular groundwater model –

- User guide to modularization concepts and the groundwater flow process. United States Geological Survey, Report 00-92. Reston, Virginia, USA. 121p.
- HIRATA, R.; GESICKI, A.; SRACEK, O.; BERTOLO, R.; GIANNINI, P.C.; ARAVENA, R. 2011. Relation between sedimentary framework and hydrogeology in the Guarani Aquifer System in São Paulo state, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 31, p. 444 – 456.
- HUANG, Y.; SCANLON, B.R.; NICOT, J.P.; REEDY, R.C.; DUTTON, A.R.; KELLEY, V.A.; DEEDS, N.E. 2012. *Sources of groundwater pumpage in a layered aquifer system in the Upper Gulf Coastal Plain, USA. Hydrogeology Journal*, v. 20, p. 783 – 796.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT) 1981. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo – Escala 1:1.000.000. IPT, São Paulo – SP, v.2.
- IRITANI, M.A.; EZAKI, S. 2009. As águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Secretaria de Estado do Meio Ambiente – SMA. São Paulo, e. 2, 104p.
- JOHNSTON, R.H. 1997. *Sources of water supplying pumpage from regional aquifer systems of the United States. Hydrogeology Journal*, v. 5, nº 2, p. 54 – 63.
- KONIKOW, L.F.; NEUZIL, C.E. 2007. *A mehod to estimate groundwater depletion from confining layers. Water Resources Research*, v. 43, W07417, 15p.
- LLOYD, J.W.; PIM, R.H. 1990. The Hydrogeology and groundwater resources development of the cambro-ordovician sandstone aquifer in Saudi Arabia and Jordan. *Journal of Hydrology*, v. 121, p. 01 – 20.
- LOPEZ, S.; HAMM, V.; LE BRUN, M.; SCHAPER, L.; BOISSIER, F.; COTICHE, C.; GIUGLARIS, E. 2010. *40 years of Dogger aquifer management in the Ile-de-France, Paris Basin, France. Geothermics*, v. 39, p. 339 – 356.
- MANZIONE, R.L.; TANIKAWA, D.H.; WENDLAND, E.C. 2011. Análise de tendências nos níveis freáticos de uma bacia hidrográfica em área de recarga do Sistema Aquífero Guarani (SAG) auxiliado por imagens de sensoriamento remoto. *Anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Curitiba – PR, Brasil. p. 5380 – 5385.

- MCDONALD, M.G.; HARBAUGH, A.W. 1988. A modular tree dimensional finite-difference groundwater flow model. Techniques of Water Resources Investigations of U.S. Geological Survey, book 06, chapter A1. Washington, USGS, 576p.
- MILANI, E.J.; FRANÇA, A.B.; SCHNEIDER, R.L. 1994. Bacia do Paraná. Boletim de Geociências PETROBRÁS, v. 8, n.1, p. 69 – 82.
- MURILO, C.L.; GUANABARA, R.C.; WENDLAND, E.C. 2012. Estimativas de recarga subterrânea em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani. *Boletín Geológico y Minero*, v. 123, n. 3, p. 311 – 323.
- NATIV, R.; SMITH, D.A. 1987. Hydrogeology and geochemistry of the Ogallala Aquifer, Southern High Plains. *Journal of Hydrology*, v. 91, p. 217 – 253.
- OKI, T.; KANAE, S. 2006. *Global Hydrological Cycles and World Water Resources. Science*, v. 313, p. 1068 – 1072.
- OLIVEIRA, L.A.; VIEIRA, A.S. 2010. Estado da arte do Sistema Aquífero Guaraní. *Caminhos da Geografia*, Uberlândia, v.11, n. 34, p. 174 – 189.
- ORGANIZAÇÃO DOS ESTADOS AMERICANOS – OEA 2009. Aquífero Guarani: programa estratégico de ação = Acuífero Guaraní: programa estatégico de acción. Edição bilíngue. Brasil; Argentina; Paraguai; Uruguai: Organização dos Estados Americanos (OEA). Janeiro, 2009. 424p.
- REBOUÇAS, A.C. 1976. Recursos Hídricos Subterrâneos da Bacia do Paraná – Análise de Pré-Viabilidade. Tese de Livre Docência. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo – SP. 143p.
- ROCHA, G.A. 1997. O grande manancial do Cone Sul. *Estudos Avançados*, v. 11, n. 30, p. 191 – 212.
- SANTOS, M.M. 2009. Gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos: Uso atual e potencial do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo (SP). Tese de doutoramento. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual de São Paulo, Rio Claro – SP. 223p.
- SERVIÇOS TÉCNICOS E AMBIENTAIS LTDA. – SERVMAR. 2010. *Delimitação de áreas de restrição e controle de captação e uso de águas subterrâneas no município de São José do Rio Preto*. Bloco A: Aquífero Sedimentar: relatório final. In: FEHIDRO, São Paulo.

- SILVA, R.B.G. da. 1983. Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas do aquífero Botucatu no Estado de São Paulo. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo. São Paulo – SP. 133p.
- SILVA, J.L.S.; HIRATA, R.C.A.; FLORES, E.L.M.; DRESSLER, V.L. 2002. Novas hipóteses sobre a origem do flúor no Sistema Aquífero Guarani na depressão central gaúcha, Brasil. *XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, Florianópolis – SC, Brasil. 21p.
- SRACEK, O.; HIRATA, R. 2002. Geochemical and stable isotopic evolution of the Guarani Aquifer System in the state of São Paulo, Brazil. *Hydrogeology Journal*, v. 10, p. 643 – 655.
- STRUGALE, M.; ROSTIROLLA, S.P.; MANCINI, F.; FILHO, C.V.P. 2004. Compartimentação estrutural das formações Pirambóia e Botucatu na região de São Jerônimo da Serra, estado do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 34, n. 3, p. 303 – 316.
- TUINHOF, A.; DUMARS, C.; FOSTER, S.; KEMPER, K.; GARDUÑO, H.; NANNI, M. 2006. Groundwater Resource Management – an introduction to its scope and practice. *Briefing Note Series – Note 01*. GW-MATE, Banco Mundial. 06p.
- VIVES, L.; CAMPOS, H.; CANDELA, L.; GUARRACINO, L. 2001. Modelación del Acuífero Guaraní. *Boletín Geológico y Minero*, v. 112, n. Especial, p. 51 – 64.
- VIVES, L.; RODRÍGUEZ, L.; GOMÉZ, A. 2008. Modelación numérica regional del Sistema Acuífero Guarani. Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guarani. Consórcio Guarani – Informe Técnico. Montevideo, 144p.
- WEEKS, J.B.; GUTENTAG, E.D.; HEIMES, F.J.; LUCKEY, R.R. 1988. Summary of the High Plains Regional Aquifer-System Analysis in parts of Colorado, Kansas, Nebraska, New Mexico, Oklahoma, South Dakota, Texas and Wyoming. U.S. Geological Survey Professional Paper 1400-A. Washington, USA. 30p.

- WENDLAND, E.; BARRETO, C.; GOMES, L. 2007. Water balance in the Guarani Aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring. *Journal of Hydrology*, v. 342, p. 21 – 269.
- ZUQUETTE, L.V.; PALMA, J.B.; PEJON, O.J. 2006. Initial assessment of the infiltration and overland flow for different rainfall events in land constituted of sandstones of the Botucatu Formation (Guarani Aquifer), State of São Paulo, Brazil. *Environmental Geology*, v. 50, p. 371 – 387.

ANEXO A

Tabela dos dados de poços da área de estudo.

PONTO	Município	Proprietário	Profundidade (m)	Identificação do poço	Tipo de poço	Cota (m)
Bairro Alto Alegre	São José do Rio Preto	DAEE	1391	SF-22-X-B-IV-3/2	Tubular Profundo	520
Bairro Campo Verde	São José do Rio Preto	DAEE/Prefeitura	1120	-	Tubular Profundo	520
Córrego do Borá	São José do Rio Preto	DAEE	1024	SF-22-X-B-IV-3/220	Tubular Profundo	510
Jardim Eldorado	São José do Rio Preto	DAEE	1136.57	SF-22-X-B-IV-3/216	Tubular Profundo	490
Jardim Urano	São José do Rio Preto	DAEE/Prefeitura	1152	SF-22-X-B-IV-3/219	Tubular Profundo	545
Palácio das Águas	São José do Rio Preto	DAEE	1100	SF-22-X-B-IV-3/215	Tubular Profundo	467
Santo Antônio	São José do Rio Preto	Prefeitura	1301	SRP-03-SP	Tubular Profundo	532
Solo Sagrado	São José do Rio Preto	Prefeitura	1188.7	SF-22-X-B-IV-3/1	Tubular Profundo	540
Alto da Boa Vista	Catanduva	SAEC	754	SAEC P.1	Tubular Profundo	-
Jardim Bela Vista	Catanduva	DAEE	770	SF-22-X-D-II-1/121	Tubular Profundo	500
Parque Iracema	Catanduva	SAEC	860	SAEC POÇO - 09	Tubular Profundo	495
ETA	Mirassol	DAEE	1123	SF-22-X-A-IV-4/1	Tubular Profundo	565
Petrobras	Olímpia	Petrobrás/Prefeitura	2557	PTP.01 - Petrobras	Tubular Profundo	-
Termas dos Laranjais	Olímpia	Particular	1080	Fonte Margarida Benatti	Tubular Profundo	-

Tabela dos dados de poços da área de estudo

PONTO	Cota (m) GE	N.E. (m)	Cota do N.E. (m)	Latitude UTM S (m)	Longitude UTM E (m)	Data de Perfuração	Perfuradora
Bairro Alto Alegre	535	70.74	449.29	7700.00	670.95	1991	CONTEP
Bairro Campo Verde	488	171.4	348.6	7694.80	671.80	1996	CONTEP
Córrego do Borá	545	100.36	409.64	7695.00	666.10	1987	CPRM
Jardim Eldorado	479	41.35	448.65	7700.36	669.10	1979	CPRM
Jardim Urano	549	138.47	406.53	7695.65	669.32	1986	CPRM
Palácio das Águas	485	24.8	442.2	7698.30	669.30	1978	CPRM
Santo Antônio	516	91.4	440.6	7703.75	667.50	1996	Hidrogesp
Solo Sagrado	548	160	380	7701.40	665.80	1990	CONTEP
Alto da Boa Vista	569	97.32	471.68	7658.30	711.50	-	-
Jardim Bela Vista	530	140	360	7662.80	710.70	1986	CPRM
Parque Iracema	497	138	357	7660.85	711.05	-	-
ETA	566	181.15	383.85	7697.15	653.90	1991	CONTEP
Petrobras	490	15	475	7710.21	716.42	1969	Petrobras
Termas dos Laranjais	480	-	-	7707.53	716.81	-	-

Tabela dos dados de poços da área de estudo (continuação)

PONTO	FORMAÇÕES GEOLÓGICAS							
	Bauru		Serra Geral		Botucatu/Pirambóia		Passa Dois	
	De (m)	A (m)	De (m)	A (m)	De (m)	A (m)	De (m)	A (m)
Bairro Alto Alegre	0.0	143.0	143.0	1085.5	1085.5	1389.0	1389.0	1391.0
Bairro Campo Verde	0.0	120.0	120.0	795.0	795.0	1120.0	-	-
Córrego do Borá	0.0	157.0	157.0	771.0	771.0	1024.0	-	-
Jardim Eldorado	0.0	122.0	122.0	834.0	834.0	1122.0	1122.0	1136.6
Jardim Urano	0.0	199.0	199.0	825.0	825.0	1152.0	-	-
Palácio das Águas	0.0	108.0	108.0	793.0	793.0	1100.0	-	-
Santo Antônio	0.0	166.0	166.0	965.0	965.0	1292.0	1292.0	1301.0
Solo Sagrado	0.0	184.0	184.0	850.0	850.0	1186.0	1186.0	1188.7
Alto da Boa Vista	0.0	172.0	172.0	497.0	497.0	754.0	-	-
Jardim Bela Vista	0.0	98.0	98.0	460.0	460.0	770.0	-	-
Parque Iracema	0.0	82.0	82.0	457.0	457.0	860.0	-	-
ETA	0.0	207.0	207.0	866.0	866.0	1120.0	1120.0	1123.0
Petrobras	0.0	62.0	62.0	864.0	864.0	1275.0	1275.0	2557.0
Termas dos Laranjais	0.0	34.0	34.0	875.0	875.0	1080.0	-	-

Tabela dos dados de poços da área de estudo (continuação)

PONTO	PARÂMETROS HIDRÁULICOS		
	Vazão Específica Q/s (m ³ /h/m)	Rebaixamento Específico s/Q (m/m ³ /h)	Transmissividade T (m ² /dia)
Bairro Alto Alegre	4.8573	0.2059	325
Bairro Campo Verde	15.81	0.0632	321
Córrego do Borá	18.33	0.055	-
Jardim Eldorado	14.9	0.0671	-
Jardim Urano	18.74	0.0533	-
Palácio das Águas	10.4	0.09	732
Santo Antônio	12.551	0.0797	-
Solo Sagrado	8.2697	0.1209	241.08
Alto da Boa Vista	1.205	0.8299	7.7
Jardim Bela Vista	14.633	0.068	2.678
Parque Iracema	16.736	0.06	3.063
ETA	18.3381	0.0545	970
Petrobras	3.4458	0.2964	-
Termas dos Laranjais	-	-	-

Tabela dos dados de poços da área de estudo (continuação)

PONTO	EXPLORAÇÃO				TESTES DE BOMBEAMENTO	
	Tipo de Aquífero	Vazão (m3/h)	N.D. (m)	Período (horas/dia)	Vazão Máxima (h)	Vazão Escalonada (h)
Bairro Alto Alegre	Confinado	500	176	20	24	3
Bairro Campo Verde	Confinado	251	187.27	4	-	-
Córrego do Borá	Confinado	440	124.71	20	24	4
Jardim Eldorado	Confinado	500	74.9	20	46	4
Jardim Urano	Confinado	500	170	20	24	-
Palácio das Águas	Confinado	500	75	20	24	-
Santo Antônio	Confinado	245	111.6	20	24	3
Solo Sagrado	Confinado	700	254	20	24	4
Alto da Boa Vista	Confinado	199.4	262.81	20	24	9
Jardim Bela Vista	Confinado	458	171.3	24	-	-
Parque Iracema	Confinado	283	154.85	18	-	-
ETA	Confinado	192	191.62	-	-	-
Petrobras	Confinado	100	40	20	-	-
Termas dos Laranjais	Confinado	80	-	24	-	-

Tabela dos dados de poços da área de estudo (continuação)

ANEXO B

Dados das perfilagens geofísicas completas dos poços.

PONTO	Espessura do SAG					
	Botucatu			Pirambóia		
	De (m)	A (m)	Espessura (m)	De (m)	A (m)	Espessura (m)
Bairro Alto Alegre	1085.5	1200.0	114.5	1200.0	1389.0	189.0
Bairro Campo Verde	795.0	1045.0	250.0	1045.0	1120.0	75.0
Córrego do Borá	771.0	950.0	179.0	950.0	1024.0	74.0
Jardim Eldorado	834.0	1000.0	166.0	1000.0	1122.0	122.0
Jardim Urano	825.0	980.0	155.0	980.0	1152.0	172.0
Palácio das Águas	793.0	950.0	157.0	950.0	1100.0	150.0
Santo Antônio	965.0	1100.0	135.0	1100.0	1292.0	192.0
Solo Sagrado	850.0	910.0	60.0	910.0	1186.0	276.0

Tabela de espessuras das formações Botucatu e Pirambóia reconhecidas através da análise das perfilagens geofísicas

Schlumberger		PERFIL GEOMETRICO (1/600)	
CAMPO ALTO ALEGRE LOGACAO POCO S.J. RIO PRETO #2 COMPANHIA CONTEP		COMPANHIA CONTEP POCO S.J. RIO PRETO #2 CAMPO ALTO ALEGRE PAIS BRASIL ESTADO SAO PAULO	
COORDENADAS NIVEL DO MAR: 520.0 M acima do datum NIVEL Ref. Perfil: SOLO NIVEL Ref. Perfil: SOLO		Elev. K.M.: 3.9 M M.R.: 3.6 M BAP: 0.0 M	
Data 10 OCT 91 Ordem No. 1 Prof. Perfuracao 1385.0 M Prof. Perfuragem (ROM) Primeira Leitura 1380.0 M Ultima Leitura 318.0 M Segunda Perfuracao 20" @ 320.0 M Segunda Perfuragem 24" 14 3/4" 12 1/4" 17 1/2" Diagnostico de lama POLIMERIZADO CMC/2000 Dens. 8.00 LB/G Viscosidade Origem da Amostra Rm @ Temp. Rm @ Temp. Rm @ Temp. Origem: Rm Rm @ Temp. Fundo Temp. Circulacao 22:00 07-OCT-91 Ferramenta No. Fundo 10:15 08 OCT 91 Temp. Max. Registro Unidade 474 MACAE Operador ENRIQUE TABORA Testemunhas ANDRE		Outras servicoes Bf-BNC-01	
DOBRE AQUI O nome do poço, sua posicao e os dados referentes ao mesmo foram fornecidos pelo cliente.			
Todas as interpretações são opiniões baseadas em inferências relativas a medidas elétricas e/ou de outra natureza. Não podemos dar, e não damos, qualquer garantia sobre a precisão ou correção de qualquer interpretação. E não podemos ser considerados, salvo em caso de negligência dolosa ou culpa lata de nosso parte, como responsáveis por quaisquer perdas, custos, danos ou despesas, incorridas ou pagas por quem quer que seja, resultante de qualquer interpretação feita por qualquer um de nossos operadores, agentes ou empregados. Tais interpretações estão também sujeitas a nossos termos gerais e condições presentes em nossa lista de preços.			
Ordem No. 1 Ordem de servico No. Nivel de fluido de perfuracao Salinidade da lama Rm @ temp. de fundo 0 Rm @ temp. de fundo 0 Velocidade de perfuragem		0 0	
EQUIPAMENTO UTILIZADO			
Ferramenta Numero 1 BGS Ferramenta Numero 2 BGIC Ferramenta Numero 3 TCCB Ferramenta Numero 4 Ferramenta Numero 5 Ferramenta Numero 6 Ferramenta Numero 7 Ferramenta Numero 8 Ferramenta Numero 9 Ferramenta Numero 10 Ferramenta Numero 11 Ferramenta Numero 12		 	
REMARKS:			

Perfilagem geofísica do poço Bairro Alto Alegre (Parte 1)

1088 ATE 755 FEITO COM BROCA DE 12 1/4"
755 ATE 318 FEITO COM BROCA DE 14 3/4"

ACCUMULATED INTEGRATION VALUES SUMMARY:

IHV: 141.412 M3 FROM 1386.00 M TO 318.000 M
ICV: 86.3973 M3 FROM 1386.00 M TO 318.000 M

CHANGED PARAMETERS

NAME	VALUE	UNIT	DEPTH (M)	NAME	VALUE	UNIT	DEPTH (M)
FCD	10.7500	IN	738.8	BS	12.2500	IN	1088.0
BS	14.7500	IN	755.0				

C1 (IN)		BS (IN)		BS (IN)
10.000	20.000	25.000	5.0000	5.0000
BS (IN)		C1 (IN)		C2 (IN)
10.000	20.000	25.000	5.0000	5.0000
C2 (IN)		FCD (IN)		FCD (IN)
10.000	20.000	25.000	5.0000	5.0000

CP 32.4 FILE 12 10-OCT-1991 07:28

INPUT FILE(S)
10

DATA ACQUIRED
10-OCT-1991 06:08

Perfilagem geofísica do poço Bairro Alto Alegre (Parte 2)

Perfilagem geofísica do poço Bairro Alto Alegre (Parte 3)

Perfilagem geofísica do poço Bairro Alto Alegre (Parte 4)

Perfilagem geofísica do poço Bairro Alto Alegre (Parte 5)

Perfilagem geofísica do poço Bairro Alto Alegre (Parte 6)

Perfilagem geofísica do poço Bairro Alto Alegre (Parte 7)

Perfilagem geofísica do poço Bairro Alto Alegre (Parte 8)

Perfilagem geofísica do poço Bairro Alto Alegre (Parte 9)

Perfilagem geofísica do poço Jardim Eldorado (Parte 3)

Perfilagem geofísica do poço Jardim Eldorado (Parte 4)

Perfilagem geofísica do poço Jardim Eldorado (Parte 5)

Perfilagem geofísica do poço Jardim Eldorado (Parte 6)

Perfilagem geofísica do poço Jardim Eldorado (Parte 7)

Perfilagem geofísica do poço Jardim Eldorado (Parte 8)

Perfilagem geofísica do poço Palácio das Águas (Parte 3)

Perfilagem geofísica do poço Palácio das Águas (Parte 4)

Perfilagem geofísica do poço Palácio das Águas (Parte 5)

Perfilagem geofísica do poço Palácio das Águas (Parte 6)

HYDROLOG		HIDRO-LOG	
Companhia CONTEP Poço SANTO ANTÔNIO Cidade S. JOSÉ DO RIO PRETO País BRASIL Estado SP		Companhia CONTEP Poço SANTO ANTÔNIO Cidade S. JOSÉ DO RIO PRETO País BRASIL Estado SP	
Locação		Outros Serviços	
Nível de Ref. Topográfica Nível de Ref. do Perfil Nível de Ref. do Sondador		Elevação K.B. M.R. 3.95m C. Bat.	
Carta No.		Elevação	
Data		1	
Primeira Leitura		5/7/96	
Última Leitura		1284.5m	
Prof. Medida		700m	
Prof. Alcançada		1284.5m	
Prof. Sondador		1284.5m	
Revest. Sondador		1302m	
Revest. HYDROLOG			
Diam. da broca		380 - 1302m 14 3/4"	
Tipo de lama		bentonita	
Densidade/Viscosidade		9.8/48	
Rm @ 1'amb		9 ohm-m 25°C	
Unidade No.		Alfa-1	
Registrado por		Sérgio	
Observado por		Gláucio	
<p>Interpretações de perfis são opiniões baseadas sobre medidas elétricas, acústicas, radioativas ou outras, cujas respostas dependem de muitos fatores e variáveis, inclusive da própria experiência do intérprete e do seu conhecimento geológico das formações perfiladas. Devido a esses imponderáveis, a HYDROLOG SERVIÇOS DE PERFILAGENS LTDA não se responsabiliza por interpretações baseadas nos seus perfis.</p>			
COMENTÁRIOS			
ESCALA 1/500 Valores de salinidade sujeitos a alterações devido a falta de parâmetros regionais HYDROLOG Rua Antônio Gobetti, 5-37 17.028-000 - Bauru - SP - fone/fax (0142) 30 -3559			

Perfilagem geofísica do poço Santo Antônio (Parte 1)

Perfilagem geofísica do poço Santo Antônio (Parte 2)

Perfilagem geofísica do poço Santo Antônio (Parte 3)

Perfilagem geofísica do poço Santo Antônio (Parte 4)