

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

BRUNO TAMBELLINI
SCALVI

ARCABOUÇO HIDROESTRATIGRÁFICO E EVOLUÇÃO
TEMPORAL DOS NÍVEIS D'ÁGUA NO SISTEMA AQUÍFERO
GUARANI NA CIDADE DE ARARAQUARA - SP

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
do Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”,
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Geociências e Meio
Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Didier Gastmans

Rio Claro - SP

2016

BRUNO TAMBELLINI SCALVI

ARCABOUÇO HIDROESTRATIGRÁFICO E EVOLUÇÃO
TEMPORAL DOS NÍVEIS D'ÁGUA NO SISTEMA AQUÍFERO
GUARANI NA CIDADE DE ARARAQUARA - SP

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
do Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho",
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Geociências e Meio
Ambiente.

Comissão Examinadora

Rio Claro, SP ____ de ____ de ____

551.49 Scalvi, Bruno
S282a Arcabouço hidroestratigráfico e evolução temporal dos
níveis d'água no sistema aquífero Guarani na cidade de
Araraquara - SP / Bruno Scalvi. - Rio Claro, 2016
70 f. : il., figs., gráfs., tabs., mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Didier Gastmans

1. Águas subterrâneas. 2. Hidrogeologia. 3.
Monitoramento de nível d'água. I. Título.

Dedicatória

“Só sei que nada sei, e o fato de saber isso, me coloca
em vantagem sobre aqueles que acham que sabem
alguma coisa.” (Sócrates)

Agradecimentos

Gostaria de deixar aqui os meus mais sinceros agradecimentos a todos que, direta ou indiretamente, me ajudaram na confecção desta dissertação de mestrado.

Primeiramente gostaria de agradecer a minha esposa Karina Silva Scalvi por todo apoio e paciência que teve comigo. Esteve ao meu lado o tempo todo a me auxiliar em ultrapassar as barreiras que apareceram no caminho. Realmente é uma pessoa companheira e amorosa e eu agradeço demais por isso.

Ao meu orientador Prof. Dr. Didier Gastmans pela confiança depositada em mim e determinação em fazer as coisas darem certo. Com certeza absoluta que sem sua ajuda não teria conseguido este feito. Sou muito grato por todos os ensinamentos que obtive através de nossas conversas e ideias.

Ao meu pai Luis Fernando Scalvi e minha mãe Eliana Maria Tambellini Scalvi que sempre me apoiaram muito durante toda a minha caminhada e um dia deram toda a base para que o caminho fosse traçado com a maior tranquilidade possível. Aos meus irmãos, Renata e Lucca, que sempre se fizeram presente em minha vida e me auxiliaram quando necessário. Agradeço também às minhas avós Neuza e Maria por todo o suporte que um dia puderam dar. Somos mais fortes quando estamos em família.

A família que se somou a minha durante esta caminhada: Antonio, Geni, Bruno, Lais e Roberta e a todo o pessoal. Ao pequeno Toni que está crescendo a cada dia mais. Muito obrigado pelo apoio desta maravilhosa família.

Queria registrar aqui meu agradecimento ao DAEE de Araraquara-SP por disponibilizar grande parte dos dados que foram base fundamental para o início e andamento do trabalho.

Agradecimento especial a empresa Hydrolog, que disponibilizou os dados de perfilagem que foram utilizados nas interpretações geológicas.

A Direção da Faculdade de Odontologia – UNESP – Araraquara-SP por cooperar com o trabalho cedendo total acesso ao poço de observação utilizado.

Por fim agradeço a todos que passaram em minha vida e agregaram o mínimo que seja para que este trabalho evoluísse. Meu muito obrigado.

RESUMO

O Sistema Aquífero Guarani (SAG) constitui uma das maiores unidades hidroestratigráficas do continente sul-americano e está entre os aquíferos mais explorados no estado de São Paulo. No município de Araraquara cumpre um importante papel no abastecimento de água, sendo responsável por mais de 65% de toda água distribuída à população. Nesse contexto o presente trabalho teve como objetivo a caracterização do arcabouço hidroestratigráfico do SAG na cidade de Araraquara, bem como a avaliação do rebaixamento dos níveis d'água no aquífero, decorrente da extração atual, por meio do monitoramento automatizado e contínuo dos níveis d'água em poço tubular abandonado situado na região central da cidade. Na área de estudo foram reconhecidas três formações geológicas: Formação Pirambóia; Formação Botucatu e a Formação Serra Geral. Foram caracterizadas quatro hidrofácies: A, B e C, que representam a Formação Piramboia e D constituída pela Formação Botucatu. As unidades estão separadas por descontinuidades geológicas, reconhecidas nos perfis, e foram diferenciadas em função do conteúdo argiloso presente nos arenitos, que condicionam as propriedades hidráulicas do reservatório. Ao longo de 435 dias de monitoramento contínuo, foi observado um rebaixamento total de 4,5 m no poço monitorado, decorrentes do bombeamento realizado na cidade. A contribuição de cada um dos poços, para o rebaixamento total, foi estimada utilizando-se a equação de Cooper-Jacob. Utilizando as vazões médias históricas para cada poço de bombeamento o rebaixamento calculado foi de 4,2 metros. Observou-se que poços mais próximos ao poço de observação, em um raio de 3000 metros, apresentaram contribuições significativas no rebaixamento observado. Com esses dados é possível avaliar e, com base em projeções de demanda futura do recurso hídrico e de crescimento populacional projetado, indicar locais para a perfuração de novos poços e seu impacto nos níveis d'água.

Palavras Chave: Sistema Aquífero Guarani, Águas Subterrâneas, Arcabouço Hidroestratigráfico, Monitoramento de Nível D'água, Araraquara.

ABSTRACT

The Guarani Aquifer System (GAS) is one of the biggest hydrostratigraphic units of the sul-american continent and it is highly explored in the São Paulo State - Brazil. In the city of Araraquara the unit plays a very important role in water supply and it is responsible for over than 65% of all water distributed to the population. This current study aimed to characterize the hydrostratigraphic framework of GAS in the city of Araraquara, also to evaluate the lowering of water levels in the aquifer through the automated and continuous monitoring in an abandoned well located in the central region of the city. In the study area were recognized three geological formations : Pirambóia Formation, Botucatu Formation and Serra Geral Formation. Four Hydrofacies were characterized : A, B and C , representing the Piramboia Formation and D the Botucatu Formation. The units have been separated by the clay content in the sandstone and by the presence of discontinuities in the rock package, which determine hydraulic properties of the reservoir using geophysical wireline curves and tray sampling reports. Over 435 days, was observed a total drawdown of 4.5 m on the monitored well, resulting from the pumping to supply the city. The contribution of each well in the total observed drawdown was estimated using the Cooper-Jacob equation. When used the historical average flow rates for each pumping well, the calculated drawdown was 4.2 meters. It was observed that the wells at a distance of maximum 3000 meters had significant contributions in the observed drawdown. With this data is possible to evaluate future projections of water demand, based on the projected population growth, and to indicate potencial locals for drilling new wells and their impact on water levels.

Keywords: Guarani Aquifer System, Groundwater, Hydrostratigraphic Framework, Water Level Monitoring, Araraquara.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	3
2. O SISTEMA AQUÍFERO GUARANI	3
2.1 Aspectos Geológicos do Sistema Aquífero Guarani (SAG)	5
2.2 Aspectos Geológicos do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo	8
2.2.1 Formação Pirambóia	9
2.2.2 Formação Botucatu	10
2.2.3 Formação Serra Geral	11
3. PROPRIEDADES DE AQUÍFEROS	11
3.1 Porosidade	12
3.2 Condutividade Hidráulica	13
3.3 Transmissividade	13
3.4 Coeficiente de Armazenamento	13
3.5 Tipos de Aquíferos	14
3.6 Hidráulica de Poços	15
4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	18
Aspectos Geológicos e Hidrogeológicos da Área de Estudo	19
5. MATERIAIS E MÉTODOS	23
5.1 Revisão Bibliográfica e Levantamento de Dados	23
5.2 Perfis Geofísicos e sua Aplicação na Caracterização Geológica de Subsuperfície	25
5.2.1 Resistividade	26
5.2.2 Raios Gama	26
5.2.3 Perfil Sônico	27

5.2.4 Aplicação na Caracterização Geológica de Subsuperfície	28
5.3 Monitoramento das Variações dos Níveis	30
6. RESULTADOS OBTIDOS	30
6.1 Arcabouço Hidrogeológico do SAG com base de dados de subsuperfície.....	30
6.1.1 Aspectos Geológicos	31
6.1.2 Caracterização das Unidades Hidrofaciológicas	41
6.2 Aspectos hidrogeológicos do SAG na cidade de Araraquara	44
6.2.1 Rebaixamento medido no Poço de Observação	46
6.2.2 Calculo do Rebaixamento com influência de Bombeamento no Poço Odonto	48
6.3 Considerações sobre o Rebaixamento Futuro em Araraquara - SP	51
7. CONCLUSÕES.....	53
8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização do SAG em continente Sul-americano (Modificado de LEBAC, 2008b).....	4
Figura 2 - Mapa de isópacas e estruturas do SAG (Retirado de LEBAC, 2008a).	7
Figura 3 - Sequência estratigráfica constituinte do SAG na Bacia do Paraná, Estado de São Paulo – Destaque, em vermelho, constitui as rochas do SAG (Modificado de PAULA e SILVA et al., 2005).	9
Figura 4 – Perfil esquemático de poço em bombeamento e de observação (Modificado de KRUSEMAN et al., 1994).....	16
Figura 5 – Esquema de bombeamento com três poços e poço de observação (Retirado de Bedient , 2010).....	17
Figura 6 – Mapa de localização da área de estudo no Estado de São Paulo. Em verde a UGRHI-13.	18
Figura 7 – Gráfico da média mensal das chuvas (mm) em Araraquara de 2011 a 2014(Retirado de http://www.hidrologia.daee.sp.gov.br/).....	19
Figura 8 – Mapa geológico do município de Araraquara e adjacências (Modificado de Convênio DAEE/UNESP, 1980).....	20
Figura 9 – Mapa Potenciométrico do Sistema Aquífero Guarani na cidade de Araraquara – SP (Retirado de Hirata et al, 2012).....	22
Figura 10 – Localização dos poços utilizados combinado com o mapa potenciométrico da área de estudo (Modificado de HIRATA et al., 2012). Destaque, em vermelho, para o poço localizado na Faculdade de Odontologia da UNESP – Campus de Araraquara....	25
Figura 11 – Mapa geológico destacando as seções geológicas elaboradas e utilizadas no estudo.....	29
Figura 12 – Perfil demonstrativo da espessura da Formação Pirambóia no poço ETA – Paiol e da Formação Botucatu no poço Standard III. Linha vermelha indica topo e base das respectivas formações.	32
Figura 13 – Seção de correlação de poços D-B (E-W). As letras representam as hidrofacies caracterizadas no trabalho. A superfície superior da unidade C é o contato entre o topo da formação Pirambóia e a base da formação Botucatu. A superfície superior à unidade D representa o contato entre o topo da formação Botucatu e a base da formação Serra Geral (representada por E).	34
Figura 14 – Seção de correlação de poços A-C (SW-NE). As letras representam as hidrofacies caracterizadas no trabalho. A superfície superior da unidade C é o contato entre o topo da formação Pirambóia e a base da formação Botucatu. A superfície superior à unidade D representa o contato entre o topo da formação Botucatu e a base da formação Serra Geral (representada por E).	35
Figura 15 – Mapas de contorno estrutural da superfície de contato entre as formações Pirambóia e Botucatu (Datum Estratigráfico).	36
Figura 16 – Mapa de Isópacas da Formação Botucatu.....	37
Figura 17 –Mapa de isópacas do basalto Serra Geral.....	39

Figura 18 – Perfil esquemático de poço interpretado por Raios Gama (curva da esquerda) e Resistividade (curva da direita). Destaque em vermelho para superfície superior da hidrofície C (contato entre as Formações Pirambóia e Botucatu).	41
Figura 19 - Teste de bombeamento – Etapa de Recuperação – com linha de tendência e fórmula da reta utilizada para um dos cálculos de Transmissividade	45
Figura 20 - a) Gráfico com todos os dados adquiridos no monitoramento do nível d'água; b) Gráfico quinzenal do rebaixamento; c) Gráfico Semanal do rebaixamento; d) Gráfico diário do rebaixamento no poço UNESP - ODONTO	47
Figura 21 - Grafico de tendência da relação entre rebaixamento causado e distância do ponto de observação	51
Figura 22 – Projeção linear futura de vazão x população em Araraquara-SP. Linha vermelha representa população e linha azul a vazão de bombeamento.	52

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de bombeamento dos poços de captação de Araraquara (Fonte: DAAE-Araraquara)	23
Tabela 2 - Valores de Raio Gama de referência (SCHLUMBERGER, 1989).....	27
Tabela 3 - Valores de referência para perfil sônico (Modificado de SCHLUMBERGER, 1989).....	28
Tabela 4 - Tabela de Porosidades por formações e por hidrofácies (%).	40
Tabela 5 - Dados de transmissividade dos poços de Araraquara-SP.....	45
Tabela 6 - Dados hidráulicos dos poços utilizados no cálculo do rebaixamento teórico no Poço Odonto	50

1. INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas representam uma importante fonte de água, utilizada tanto no abastecimento público quanto como insumo para o desenvolvimento da atividade econômica. Dentre os aquíferos explorados na porção oeste do estado de São Paulo, destaca-se o Sistema Aquífero Guarani (SAG), que constitui uma das mais importantes unidades hidroestratigráficas do continente sul-americano, e que vem sendo utilizado para o abastecimento público, além de outros usos relacionados principalmente à atividade agroindustrial por importantes centros urbanos, como Ribeirão Preto, São José do Rio Preto, Bauru, São Carlos, Araraquara, Marília e Araçatuba.

No município de Araraquara, que se localiza na porção central do estado de São Paulo na área da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Tietê/Jacaré (UGRHI-13), as águas subterrâneas cumprem um importante papel no abastecimento público e privado. Dados oficiais indicam que existem cerca de 245 poços perfurados no município, que extraem conjuntamente uma vazão superior a $70.000 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$. Desses, doze deles são operados pelo Departamento Autônomo de Água e Esgoto (DAAE), contribuindo com cerca de 50% do volume de água potável consumido pela população local, e o restante é provido por captações superficiais. Devido a sua grande produtividade, aliada à excelente qualidade natural de suas águas nesta região, o SAG se apresenta como uma opção atrativa, continuamente procurada por usuários públicos e privados (HIRATA et al., 2012).

A utilização de recursos hídricos subterrâneos necessita do aperfeiçoamento de políticas públicas para sua gestão, sendo fundamental o conhecimento do arcabouço geológico de sub superfície. A partir da análise e interpretação de perfis geofísicos calibrados de poços, e de descrições geológicas de amostras provenientes da perfuração de poços, é possível o estabelecimento de um arcabouço geológico coerente, facilitando a elaboração de modelos numéricos de fluxo das águas subterrâneas. Estes modelos podem auxiliar na decisão de futuros investimentos em abastecimento e, conseqüentemente, em locações estratégicas para perfuração de poços de captação, requeridos pelos órgãos do poder público e privado.

O monitoramento quali-quantitativo de águas subterrâneas representa um dos mais importantes instrumentos para o estabelecimento de estratégias, ações preventivas e políticas de uso, proteção e conservação do recurso hídrico subterrâneo, pois permite,

além da ampliação da base do conhecimento hidrogeológico dos aquíferos, o acompanhamento de alterações espaciais e temporais na qualidade e quantidade (disponibilidade) das águas subterrâneas, com foco essencialmente na gestão integrada dos recursos hídricos.

Nesse sentido, extenso programa de monitoramento qualitativo das águas subterrâneas vem sendo desenvolvido no estado de São Paulo, por meio do “Programa de Monitoramento da Qualidade das Águas Subterrâneas”, desenvolvido pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) desde 1990, e que conta atualmente com o monitoramento de mais de 170 poços tubulares no estado de São Paulo (CETESB, 2013).

Entretanto, em relação ao monitoramento quantitativo em áreas onde existe extensa exploração de águas subterrâneas, que pode ser avaliado por variações temporais dos níveis d'água, apenas a partir de 2009 uma rede piezométrica iniciou sua operação no estado, operada de forma integrada pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE), Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e CETESB. Essa rede conta atualmente com cerca de 60 poços em operação, abrangendo apenas os sistemas aquíferos Guarani e Bauru, com a finalidade de avaliar de forma integrada as águas superficiais e subterrâneas e desta maneira permitir tomada de decisões na gestão do recurso hídrico (LOBO et al., 2013).

Por representar a principal unidade hidroestratigráfica na porção centro-sul do continente sul-americano, cujos recursos são compartilhados por Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai, além da sua importância ao abastecimento público no estado de São Paulo, atenção especial deve ser dada à ampliação do conhecimento a respeito das condições de extração das águas subterrâneas no SAG, especialmente em regiões de intensa exploração. O cenário de exploração das águas subterrâneas na cidade de Araraquara (SP), cujo abastecimento público é dependente de poços perfurados no SAG, e que o presente projeto tem como área de estudo, indica um rebaixamento contínuo dos níveis d'água (HIRATA et al., 2012). Entretanto ainda é necessário um maior detalhamento na observação desses rebaixamentos, com a finalidade de auxiliar gestão do recurso.

O conhecimento a respeito do arcabouço geológico no município de Araraquara, a partir de modelos estabelecidos em estudos prévios, propicia um produto com forte base teórica, que aliado ao monitoramento contínuo dos níveis d'água, possibilita a predição de seu comportamento futuro. Constituem-se em ferramentas eficazes no

auxílio à gestão integrada de recursos hídricos, pois possibilitam a elaboração de modelos numéricos de fluxo de águas subterrâneas, embasados em um modelo hidrogeológico robusto, construído sob forte base de conhecimento geológico. (SAPRIZA et al., 2011).

1.1 Objetivos

O presente trabalho teve como objetivos: a caracterização hidrogeológica do SAG no município de Araraquara, com base na utilização de perfis geofísicos, descrições litológicas de poços perfurados na cidade que corroboraram para a identificação e distribuição espacial das hidrofácies e suas características principais; e o monitoramento contínuo dos níveis d'água em um poço abandonado perfurado na Faculdade de Odontologia da UNESP, na região central da cidade.

Como consequência do desenvolvimento do trabalho também foram explorados objetivos secundários como: caracterização do arcabouço hidrogeológico de subsuperfície da área estudada; rebaixamento dos níveis d'água nos poços de abastecimento e determinação empírica dos parâmetros hidrodinâmicos do SAG que fornecem contribuições para futuras modelagens de fluxo na área de estudo.

Os objetivos propostos pelo trabalho fornecem subsídios que podem ser utilizados em novos modelos de gestão do recurso hídrico subterrâneo da cidade. Desta maneira podem auxiliar na elaboração de novos projetos de gestão e futuras locações para os novos poços de captação e abastecimento da cidade.

2. O SISTEMA AQUÍFERO GUARANI

O SAG constitui a unidade hidroestratigráfica mais importante da porção meridional do continente sul-americano, ocupando uma área de 1.087.879,15 km², que se estende pelos territórios de Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai (Figura 1).

Está inserido no arcabouço geológico das bacias sedimentares do Paraná e Chacoparanaense, que apresentam extensão aproximada de 1.400.000 km² e pacote rochoso constituído por conjunto de rochas sedimentares e ígneas que podem alcançar até 7000 m de espessura. Com formato ovalado ou de sinéclise, a Bacia do Paraná apresenta eixo maior de direção aproximadamente N-S, o qual reflete os fenômenos

erosivos instalados no pós-paleozoico do continente sul-americano. A borda leste da bacia foi erodida em função do rifteamento sul-atlântico que soergueu e expôs as rochas do embasamento (MILANI, 2004).

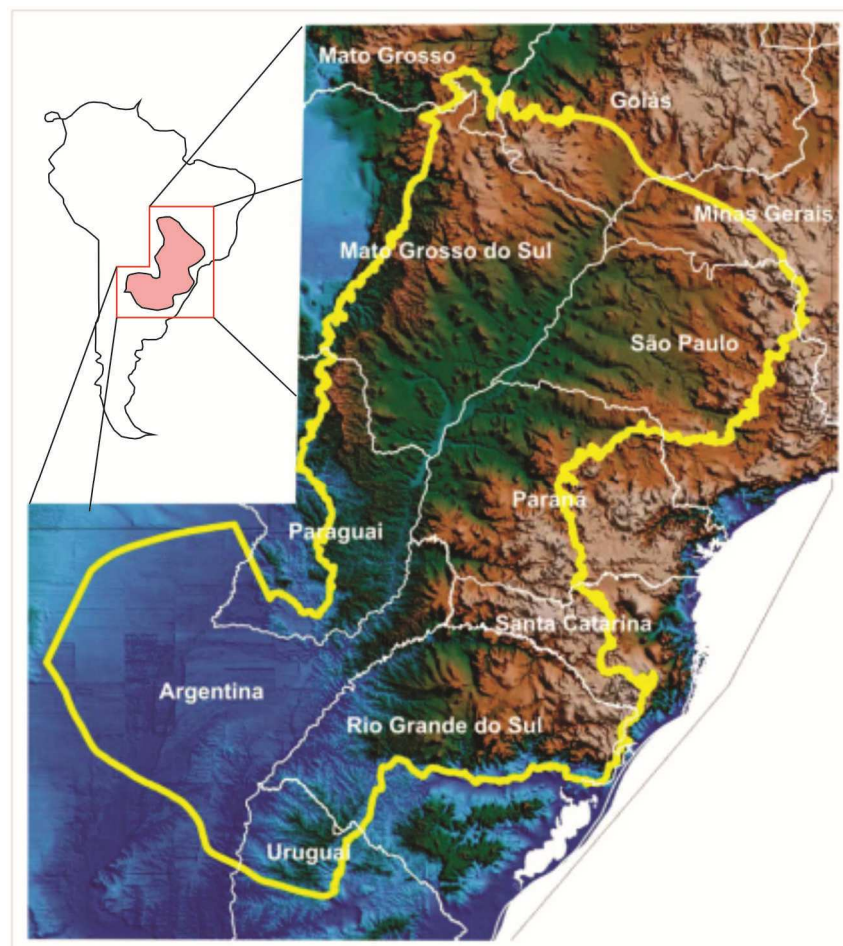


Figura 1– Mapa de localização do SAG em continente Sul-americano (Modificado de LEBAC, 2008b).

Segundo Milani (1997), a partir de inúmeros ciclos de sedimentação e erosão estabeleceu-se o arcabouço estratigráfico na bacia, constituído por seis sequências de segunda ordem, denominadas pelo autor de: Supersequência Rio Ivaí (Caradociano-Llandovertiano), Supersequência Rio Paraná (Lockoviano-Frasiano), Supersequência Gondwana I (Westphaliano-Scythiano), Supersequência Gondwana II (Neoanisiano-Eonoriano), Sequência Gondwana III (Neojurássico-Berriasiano) e Supersequência Bauru (Senoniano). Entre essas sequências o autor reconhece importantes lacunas no registro estratigráfico.

A evolução geológica da Bacia do Paraná durante o Mesozoico tem como característica principal a implantação de sistema continental, com climas quentes

úmidos a desérticos e presença de áreas onde se preservaram depósitos fluviais e eólicos associados, além de atividades tectônicas praticamente nulas. Nesse ambiente de sedimentação foram depositadas as rochas que constituem o Sistema Aquífero Guarani.

Conhecida como “Reativação Waeldaniana”, a grande reativação tectônica, responsável pela ruptura da Pangea que promoveu a reativação de antigas falhas e levantamento de blocos e Arcos, como Arco de Ponta Grossa. Agiu também para a formação de bacias marginais, intensificando a subsidência no interior da Bacia do Paraná e consequentemente deposição sedimentar mais abundante, gerando as maiores espessuras da sinéclise.

Os sedimentos do Grupo São Bento, são compostos pelas formações arenosas triássicas e jurássicas de origem eólica e subordinadamente lacustre, sobrepostas por uma camada relativamente espessa de derrames basálticos. Este pacote de arenitos apresenta espessuras médias de 300 a 400m, com exposição em áreas reduzidas (LEBAC, 2008b).

2.1 Aspectos Geológicos do Sistema Aquífero Guarani (SAG)

As unidades geológicas que constituem o SAG estão associadas ao pacote mesozoico de rochas sedimentares siliciclásticas continentais da Bacia do Paraná (Brasil e Paraguai), Chacoparanense (Argentina) e Bacia do Norte (Uruguai). Este pacote é limitado em sua base por uma discordância regional permo-eotriássica, representada no estado de São Paulo pela Formação Corumbataí, e no topo pelos derrames basálticos da Formação Serra Geral (SANGRAM et al., 2008; LEBAC 2008 a,b; GASTMANS et al., 2012).

Em todas as bacias mencionadas anteriormente, o cenário deposicional e estratigráfico é semelhante. O substrato do SAG é constituído por rochas de idade Permiana, denominadas de Pré-SAG. Em territórios argentino e uruguaio o substrato do aquífero é constituído pelos sedimentos da Formação Buena Vista, no Paraguai Formação Tacuary e no Brasil, ao sul, Formação Sanga do Cabral, na região central, Formação Rio do Rasto e na porção Norte, Formação Corumbataí e Grupo Estrada Nova.

As unidades que constituem o SAG, depositadas sobre essa discordância regional, são: formações Caturrita e Santa Maria na porção sul da bacia e Formação Pirambóia, a norte. As rochas Juro-Cretáceas estão presentes em todas as bacias citadas

e também fazem parte do SAG. Tais rochas são caracterizadas na Formação Tacuarembó no Uruguai, Formação Guará (sul) e Botucatu (norte) no Brasil e Formação Misiones na Argentina e Paraguai. A deposição posterior às rochas do SAG, de idade Neo-Cretáceo, foi atribuída à Formação Arapey no Uruguai, Formação Alto Paraná no Paraguai e Formação Serra Geral no Brasil (GASTMANS et al., 2012).

A geometria do SAG, sua compartimentação, preenchimento sedimentar e fluxo são controlados pelos principais elementos estruturais dessas bacias: ao norte, os arcos da Canastra e São Vicente; a oeste, os arcos de Assunção e Pampeano/Puna; e, ao sul, o Arco do Rio da Prata. Na porção interior da bacia, são reconhecidos importantes elementos estruturais como o Arco de Ponta Grossa, o Arco do Rio Grande e o Sinclinal de Torres, alguns já definidos por Zalán et al. (1990).

Os limites do SAG são definidos com base em critérios estratigráficos, sendo caracterizados a norte pela diminuição das espessuras das formações Botucatu e Pirambóia em direção à zona de borda da Bacia do Paraná. Já a definição do limite da unidade em território argentino, foi feita com base em perfis de poços perfurados para a pesquisa petroleira, que possibilitaram o reconhecimento de associações litológicas similares às da Formação Serra Geral e dos arenitos do SAG, bem como as estruturas que controlaram a deposição das unidades mesozoicas da bacia (LEBAC, 2008 a,b).

Segundo Araújo et al. (1995), as maiores espessuras do SAG ocorrem subparalelamente aos rios Paraná e Uruguai, sendo praticamente concordante com o eixo deposicional da Bacia do Paraná. Ainda segundo esses autores, os depocentros dessa unidade podem chegar a 500 m. Segundo estudos do LEBAC (2008a, b), as estruturas presentes na bacia tiveram grande influência nas continuidades observadas desses depocentros, como o Arco de Ponta Grossa e a Dorsal Assunção-Rio Grande, este último considerado por Rossello et al. (2006), como um alto estrutural ativo entre o Permiano/Eo-Triássico e o início dos derrames basálticos no Eo-Cretáceo que subdivide os arenitos do SAG em duas bacias de sedimentação distintas, a norte e a sul (Figura 2).

As variações de espessura do SAG estão associadas ao controle estrutural ocorrido durante a deposição e à variação faciológica, uma vez que a ocorrência de ambiente flúvio-lacustre possibilita a implantação de superfícies erosivas, diminuindo a espessura do SAG na porção sul, e ao controle erosional característico do ambiente desértico (ARAÚJO et al., 1995).

borda oeste da Bacia do Paraná e do SAG, em Campo Grande, a avaliação da porosidade através do perfil sônico mostram médias de porosidade para a Formação Botucatu (30%) e para a Formação Pirambóia (20%).

Regionalmente, a partir das zonas de recarga até as áreas de descarga, o fluxo das águas subterrâneas do SAG apresenta uma tendência regional que direciona o fluxo de norte para sul, acompanhando o eixo da Bacia do Paraná. A partir da confluência entre os estados de Paraná e Mato Grosso do Sul (BR) e o território paraguaio, onde podem ser reconhecidos quatro grandes domínios hidrodinâmicos para o SAG, que apresentam relações diretas com as grandes feições estruturais da bacia. Por outro lado, o aquífero na região do Estado de São Paulo, onde está inserida a área de estudo, apresenta fluxo de água subterrânea para Oeste, em direção ao Rio Paraná. As zonas de recarga estão associadas às zonas de afloramentos, locais em que os gradientes hidráulicos encontrados estão entre 3 e 5 m km⁻¹, enquanto que nas áreas confinadas o parâmetro cai consideravelmente para 0,1 m km⁻¹ (GASTMANS et al., 2012).

2.2 Aspectos Geológicos do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo

Apesar de o conhecimento geológico atual ser bastante convergente no que tange às unidades constituintes do SAG em território brasileiro, ao longo do tempo a sua definição foi tema controverso. Nesse contexto já ocorreram incorporações e retiradas de unidades estratigráficas relativas ao SAG foram incorporadas ou retiradas do aquífero por vários autores (REBOUÇAS, 1976; ARAÚJO et al., 1995; CAMPOS, 2000; LEBAC, 2008a). Entretanto, no estado de São Paulo, o quadro estratigráfico da unidade é simples e existe consenso entre os autores, que associam ao aquífero nessa região às formações Botucatu e Pirambóia de idade mesozoica (SÃO PAULO, 2005) (Figura 3).

A Formação Corumbataí, unidade que representa o substrato geológico do SAG, possui idade Permiana, e foi depositada em um ambiente de sedimentação essencialmente marinho; é limitada, no topo, por uma discordância regional que marca o início de um processo de continentalização dos depósitos sedimentares da Bacia do Paraná. A Formação Pirambóia, situada em posição estratigráfica inferior do SAG, insere-se na Supersequência Gondwana II, enquanto a Formação Botucatu, superior, insere-se na Supersequência Gondwana III, juntamente com os basaltos do derrame Serra Geral que a recobre.

Período	Grupo	Formação
Cretáceo		Fm. Serra Geral
Jurássico	São Bento SAG	Fm. Botucatu
Triássico		Fm. Pirambóia
Permiano	Passa Dois	Fm. Corumbataí

Figura 3 - Sequência estratigráfica constituinte do SAG na Bacia do Paraná, Estado de São Paulo – Destaque, em vermelho, constitui as rochas do SAG (Modificado de PAULA e SILVA et al., 2005).

2.2.1 Formação Pirambóia

Assentada, em contato erosivo representado pela discordância regional de idade Permo-Eotriássica, sobre a Formação Corumbataí está a Formação Pirambóia. Originalmente esta unidade foi caracterizada a partir de deposição em ambiente fluvial meandrante psamítico (SOARES, 1973); posteriormente, sua gênese foi revista por Caetano-Chang (1997) que demonstrou a predominância da deposição eólica sobre a deposição fluvial, caracterizada por diferentes associações de fácies de duna, interduna e de lençóis de areia que por vezes apresentam interação com depósitos de canais fluviais e planícies de inundação.

Esta formação é caracterizada pela ocorrência de sucessivas camadas arenosas, geralmente avermelhadas e de granulação média a fina, de idade Triássico-Jurássico. A unidade possui maior fração argilosa na base quando comparada às camadas superiores onde, localmente, podem ocorrer arenitos conglomeráticos. Localmente é possível evidenciar presença de camadas horizontais de pequena espessura de lamitos. Os arenitos desta unidade geralmente apresentam estratificações plano-paralelas e cruzadas de médio e grande porte.

A porosidade observada para a unidade varia de 12 a 35% e é associada à processos de dissolução de cimento na meso e telodiagênese que geraram poros de grandes dimensões (CAETANO-CHANG,1997; CAETANOCHANG; WU, 2006). Gesicki (2007) observa no horizonte abaixo do contato com os arenitos da Formação Botucatu, cimentação intersticial preferencial de calcita, que resulta em baixa porosidade (2 a 10%).

2.2.2 Formação Botucatu

A erosão causada pela abrasão eólica do Mesozoico foi responsável pela formação de uma superfície sobre a qual se depositaram extensos campos de dunas da Formação Botucatu (MILANI et al., 2007). Essa unidade é caracterizada pela presença predominante de arenitos finos a médios, friáveis, quartzosos, bem arredondados, bem selecionados, com estratificações cruzadas de grande e médio porte, relacionados ao ambiente de sedimentação do tipo desértico através de processos eólicos; fácies de depósitos torrenciais e provenientes de ambientes lacustres. Arenitos conglomeráticos depositados por *wadis* são mais comuns na parte basal da unidade. Já a sequência lacustre é caracterizada por lamitos arenosos, siltitos e arenitos lamíticos, ocorrendo mais frequentemente na parte superior da formação e entre os primeiros derrames de basalto (PAULA e SILVA et al., 2008).

De acordo com Caetano-Chang (1997), nesta unidade predominam as fácies de *foresets* de dunas eólicas, de interdunas secas e de lençóis de areia.

A espessura desta formação é bastante variável de acordo com inúmeros autores (PAULA e SILVA, 2008; SOARES, 1975; ASSINE et al., 2004). De acordo com Soares (1975), as espessuras dessa unidade não ultrapassam os 150 metros. Segundo Assine et al. (2005), a variação de espessura da Formação Botucatu é, em grande parte, função da distribuição dos campos de dunas e de seu recobrimento pelos derrames basálticos da Formação Serra Geral.

Em alguns casos observam-se os campos de dunas recobertas concordantemente pelos derrames basálticos da Fm. Serra Geral, fato este que preservou a forma original das construções eólicas (ALMEIDA, 1953).

O contato basal com a Formação Pirambóia representa uma discordância regional, segundo vários autores (ZALÁN et al, 1990; MILANI, 1997; CAETANO-CHANG, 1997), marcado por brusca mudança textural e de coloração.

2.2.3 Formação Serra Geral

A Formação Serra Geral é constituída por basaltos toleíticos e andesitos basálticos com quantidades subordinadas de riolitos e riodacitos (PEATE et al, 1992). Essas rochas tem gênese relacionada ao conjunto de derrames de rochas basálticas com associações de magmatitos intrusivos. Na região sudoeste do Estado de São Paulo esta unidade se apresenta com a máxima espessura, com cerca de 2000 metros. Tais números foram atestados com perfurações de poços visando acumulações petrolíferas e de água subterrânea.

O contato basal com a Formação Botucatu, localmente abrupto, mostra regionalmente relações de interdigitamento entre os primeiros derrames basálticos e os arenitos eólicos desta unidade. Para Soares (1973), a continuidade do processo eólico durante as primeiras manifestações vulcânicas deu origem a numerosos corpos arenosos intertrapeados com espessura de até 40 metros. No entanto, Soares (1975) reconheceu que é difícil precisar se os magmatitos, aos quais se intercalam corpos arenosos, são intrusivos ou extrusivos. Assim, este contato é geralmente colocado na base do primeiro derrame basáltico. A recorrência de arenitos nas camadas inferiores dos basaltos da Formação Serra Geral assinala a contemporaneidade entre a sedimentação eólica e os primeiros derrames de lavas.

A porção não aflorante está recoberta pelos sedimentos do Grupo Bauru e formações cenozóicas. Regionalmente, sua espessura aumenta de leste para oeste, até atingir valores da ordem de 1.500 metros na confluência dos rios Paraná e Paranapanema (PAULA e SILVA & CAVAGUTI, 1994).

3. PROPRIEDADES DE AQUÍFEROS

Aquíferos são formações geológicas caracterizadas por sua capacidade de armazenar água em seus poros e transmiti-la, possibilitando a exploração econômica da água. A velocidade de fluxo da água subterrânea é condicionada pelas propriedades hidráulicas do reservatório, e algumas de suas propriedades básicas são importantes para o melhor entendimento dos procedimentos utilizados e resultados obtidos pelo trabalho.

3.1 Porosidade

As rochas, especialmente as sedimentares, apresentam espaços vazios em sua estrutura, denominados poros. A porosidade de uma rocha ou de um solo/sedimento inconsolidado, pode ser definida como o volume percentual da rocha ou solo que apresenta espaços e pode ser calculada matematicamente pela equação 1.

$$n = \frac{100V_v}{V} \quad (1)$$

Onde:

n é a porosidade (porcentagem)

V_v é o volume de espaço vazio (poros) em uma unidade de material (L^3)

V é o volume de rocha total, incluindo o volume de poros

Em hidrogeologia, a *porosidade efetiva* é mais importante, pois indica a quantidade de poros interconectados que possuem capacidade de transmitir o fluido no meio poroso, definida através da equação 2. Deste modo, rochas com pequena quantidade de cimento preenchendo os poros possuem valores próximos para as porosidades total e efetiva. Por outro lado, rochas com elevadas quantidades de cimento preenchendo seus poros, possuem porosidades efetivas muito menores.

$$n_e = \frac{V_D}{V_T} \quad (2)$$

Onde:

n_e – porosidade efetiva

V_D – volume de água drenado por gravidade

V_T – volume total

3.2 Condutividade Hidráulica

Parâmetro relacionado ao tipo de material que constitui um reservatório, a Condutividade Hidráulica (K) foi empiricamente determinado por Darcy (1856), e determina numericamente a capacidade de um material em permitir a passagem de fluido pelos poros. Os estudos realizados por Darcy mostraram que a condutividade hidráulica é dependente do gradiente hidráulico e da vazão de água que percola um corpo rochoso de seção com área “A”. Variações são relacionadas à porosidade do pacote rochoso, e a equação 3 ilustra o cálculo da vazão por Darcy para determinação de fluxo de água subterrânea.

$$Q = -K A \frac{dh}{dL} \quad (3)$$

Onde:

Q – é a vazão (m³/s)

K – condutividade hidráulica (m/s)

A – é a área (m²)

h – é a carga (m)

L – é a distância (m)

3.3 Transmissividade

A transmissividade é definida como a quantidade de água que pode ser transmitida, horizontalmente, através de uma unidade de largura, multiplicada pela espessura da porção saturada do aquífero com gradiente hidráulico de valor 1. (FETTER, 2000). Este parâmetro pode ser calculado a partir da condutividade hidráulica (K) e da espessura do aquífero (b).

3.4 Coeficiente de Armazenamento

O coeficiente de armazenamento específico (Ss) é representado pelo volume de água que uma unidade volumétrica do aquífero é capaz de produzir, a partir da compactação sofrida pelo mesmo, devido ao aumento do stress efetivo e variação da carga hidráulica. A equação 4 demonstra Ss:

$$S_s = p g (\alpha + n \beta) \quad (4)$$

Onde:

S_s – é o armazenamento específico

p – é a densidade da água

g – é a aceleração da gravidade

α - compressibilidade do arcabouço o aquífero

n – é a porosidade

β - é a compressibilidade da água

O coeficiente de armazenamento (S) de um aquífero confinado é uma unidade adimensional e representa o volume de água permeável que pode ser retirada ou absorvida, por área de superfícies unitária, por unidade de declínio no componente normal e carga hidráulica, ilustrado na equação 5 (KRUSEMAN et al. 1994).

$$S = S_s D \quad (5)$$

Onde:

S – é o coeficiente de armazenamento

S_s – é o armazenamento específico

D – é a espessura do aquífero confinado

3.5 Tipos de Aquíferos

No presente trabalho são estudados aquíferos em meios porosos. Tais aquíferos podem se divididos em dois tipos: confinados e livres. Os aquíferos chamados livres ocorrem próximos à superfície e apresentam materiais geológicos permeáveis desde a sua base até a superfície. A recarga desse tipo de aquífero se dá pela da infiltração da água de superfície para o aquífero, através da zona insaturada (FETTER, 2000).

Por outro lado, os aquíferos confinados, são recobertos por uma camada impermeável. Sua recarga se dá através de uma parte do aquífero que aflora em superfície, chamada de área de recarga, ou ainda, através de vazamentos provindos da camada superior ao aquífero (FETTER, 2000).

A superfície piezométrica nos aquíferos confinados encontra-se acima do topo do aquífero. Isso ocorre devido ao confinamento da camada saturada pela presença de camadas impermeáveis sobrejacentes, que geram uma pressão interna, forçando a água para cima. Em casos onde o aquífero se encontra sobre grande pressão e um poço é perfurado na camada pressurizada, a água pode subir dentro do poço a grandes distâncias do topo do aquífero. Se este nível for encontrado acima do nível de superfície, o poço é considerado artesianos (FETTER, 2000).

Em regiões com captação de águas subterrâneas por meio de poços de bombeamento, o comportamento do rebaixamento dos dois tipos de aquíferos serão distintos.

No caso de bombeamento em aquíferos confinados, o rebaixamento irá afetar a superfície piezométrica do aquífero, mantendo o mesmo sempre saturado. Por outro lado, nos aquíferos livres o rebaixamento se dá diretamente na profundidade do nível d'água. Deste modo pode-se concluir que poços inteiramente penetrados na camada saturada em aquíferos confinados apresentam somente fluxo de entrada de água horizontal, diferentemente dos aquíferos livres que apresentam fluxo em todas as direções (KRUSEMAN et al, 1994).

3.6 Hidráulica de Poços

O regime de fluxo da água subterrânea é um assunto bastante abordado no que tange ao fluxo radial quando do bombeamento de poços, e pode ocorrer em dois diferentes regimes de fluxo: estacionário (ou permanente) e não estacionário (variável). Quando o fluxo principal se apresenta constante com o tempo, o mesmo é considerado em regime permanente, por outro lado, quando o fluxo é variável em função do tempo, é denominado variável (FETTER, 2000).

Como comentado no item anterior, o rebaixamento em aquíferos confinados a partir de bombeamentos ocorre na superfície piezométrica, gerando um cone de rebaixamento a partir do poço bombeado (Figura 4).

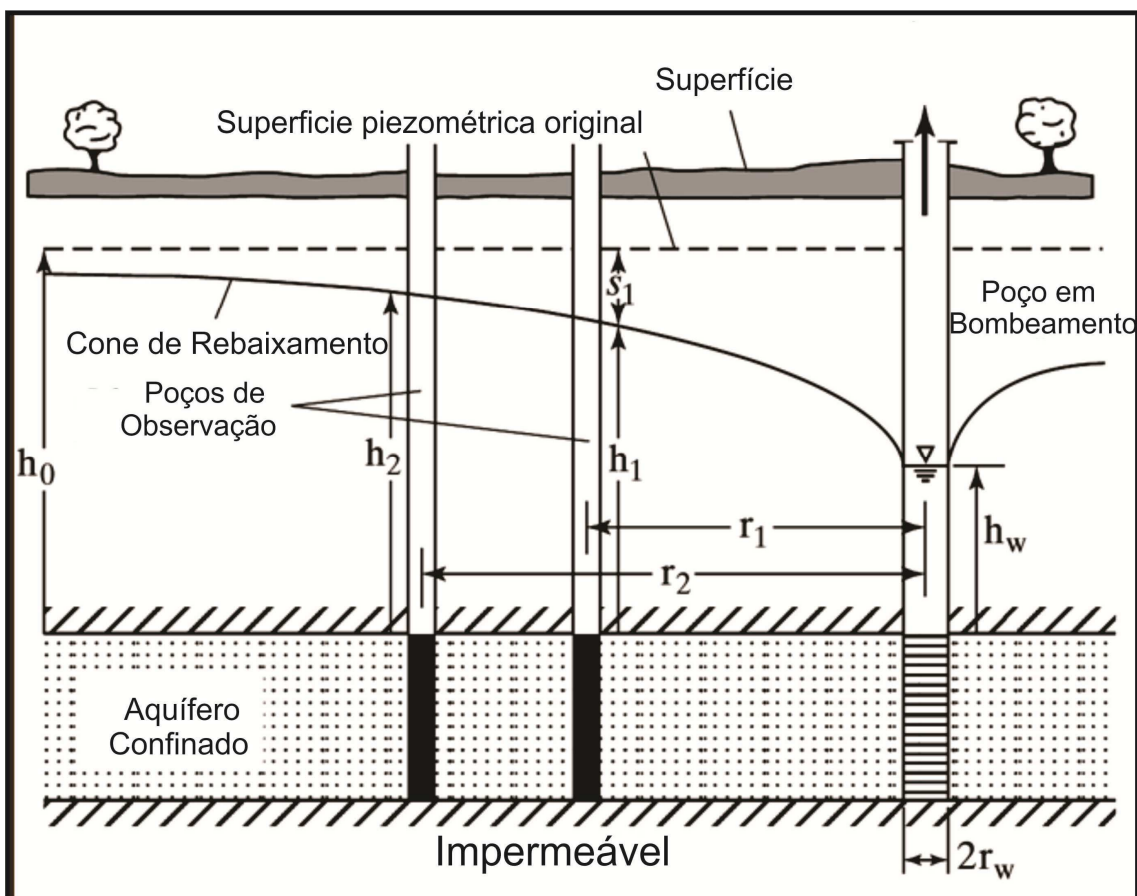


Figura 4– Perfil esquemático de poço em bombeamento e de observação (Modificado de KRUSEMAN et al., 1994)

O cone de rebaixamento gera uma zona de influência de raio “ r ” a partir do poço em bombeamento, portanto, sistemas com variados poços em bombeamento se tornam cenários complexos. Na figura 5 apresenta-se um exemplo com três poços em bombeamento com vazões Q_1 , Q_2 e Q_3 e um poço de observação em A. O rebaixamento em A será a somatória do rebaixamento dos outros três poços.

Com o intuito de resolver problemas como o da figura 5, com múltiplos poços de bombeamentos, algumas simplificações foram criadas ao longo do tempo. Dentre elas destacam-se duas mais utilizadas: a solução de Theis (THEIS, 1935) e a simplificação de Cooper-Jacob (COOPER et al., 1946).

Theis (1935) propôs a equação de rebaixamento (equação 6), descrita abaixo, assumindo que o aquífero seja homogêneo, isotrópico e com espessura uniforme. Também assumiu que a superfície piezométrica é inicialmente horizontal e o poço é completamente penetrante na camada aquífera e que, por isso, apresenta somente fluxo horizontal.

$$s' = (Q/4\pi T)W(u)$$

(6)

Onde:

s' - rebaixamento

Q – vazão de bombeamento

T – transmissividade

$W(u)$ – solução de Theis = $-0.5772 - \ln(u)$

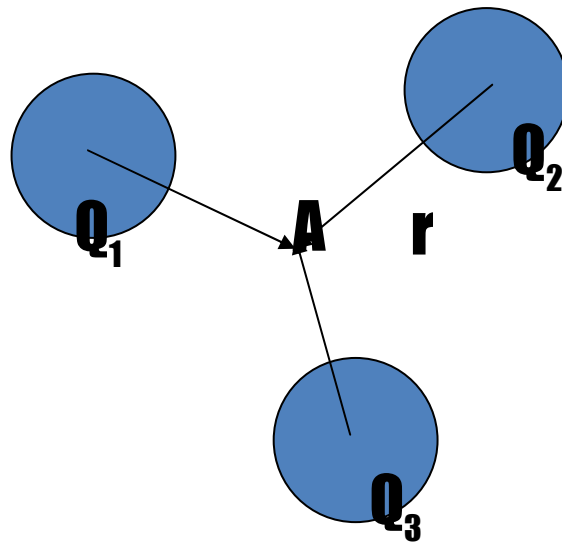


Figura 5 – Esquema de bombeamento com três poços e poço de observação (Retirado de Bedient , 2010)

Cooper & Jacob (1946) notaram que com valores muito baixo de “ r ” e altos valores de “ t ”, o parâmetro “ u ” pode ser aproximado para $r^2S/4Tt$ e ser aplicado na solução de Theis. Deste modo foi criada uma simplificação ilustrada na equação 7.

$$s = (2.3Q/4\pi T) \cdot \log[(2.25Tt)/(r^2S)]$$

(7)

Onde:

s – rebaixamento observado no poço de observação

Q – vazão no poço de bombeamento

T – Transmissividade

t – Tempo de observação no poço de observação

r – Distância entre o poço de observação e de bombeio

S – Coeficiente de armazenamento estimado do aquífero

4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O presente estudo foi realizado no município de Araraquara, que se encontra na porção central do Estado de São Paulo, a 277 quilômetros da capital do Estado. O município compreende uma área total de 1.006 Km², dos quais 77,37 Km² são ocupados pela área urbana. Localiza-se a 21°47'40" de latitude sul e 48°10'32" de longitude oeste, a uma altitude média de 664 metros e está inserida na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos UGRHI 13 – Tietê/Jacaré (Figura 06). Possui uma população estimada em 226.508 habitantes, sendo considerada uma das 20 cidades com melhor IDH (índice de Desenvolvimento Humano) do país (<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=350320>).

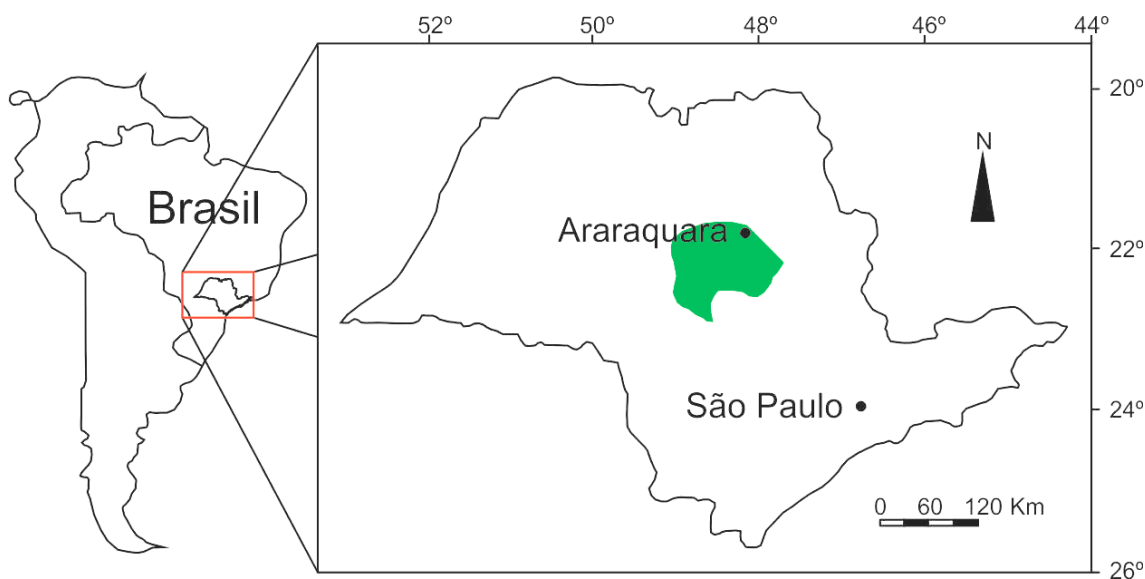


Figura 6 – Mapa de localização da área de estudo no Estado de São Paulo. Em verde a UGRHI-13.

A área do município é cortada por seis rios (Rio Anhumas, Rio Chibarro, Rio Cabaceiras, Rio Araraquara, Ribeirão das Cruzes e Córrego Ouro), que estão inseridos em duas bacias hidrográficas: Mogi-Guaçu e Jacaré-Guaçu. O Sistema Aquífero Guarani é uma importante fonte de recursos hídricos para a população de Araraquara que, somado às águas superficiais, abastece toda a região.

O clima de Araraquara é considerado tropical de altitude com invernos secos e registra temperaturas médias anuais na casa dos 20°C, e os índices pluviométricos

podem ser observados na figura 07 que apresenta as médias mensais dos anos entre 2011 e 2014. Os períodos com maiores volumes de chuva estão concentrados entre outubro e março. Os outros meses, com exceção de maio, apresentam menores volumes de chuva registrados. Os meses de julho e agosto são os que apresentam os menores índices.

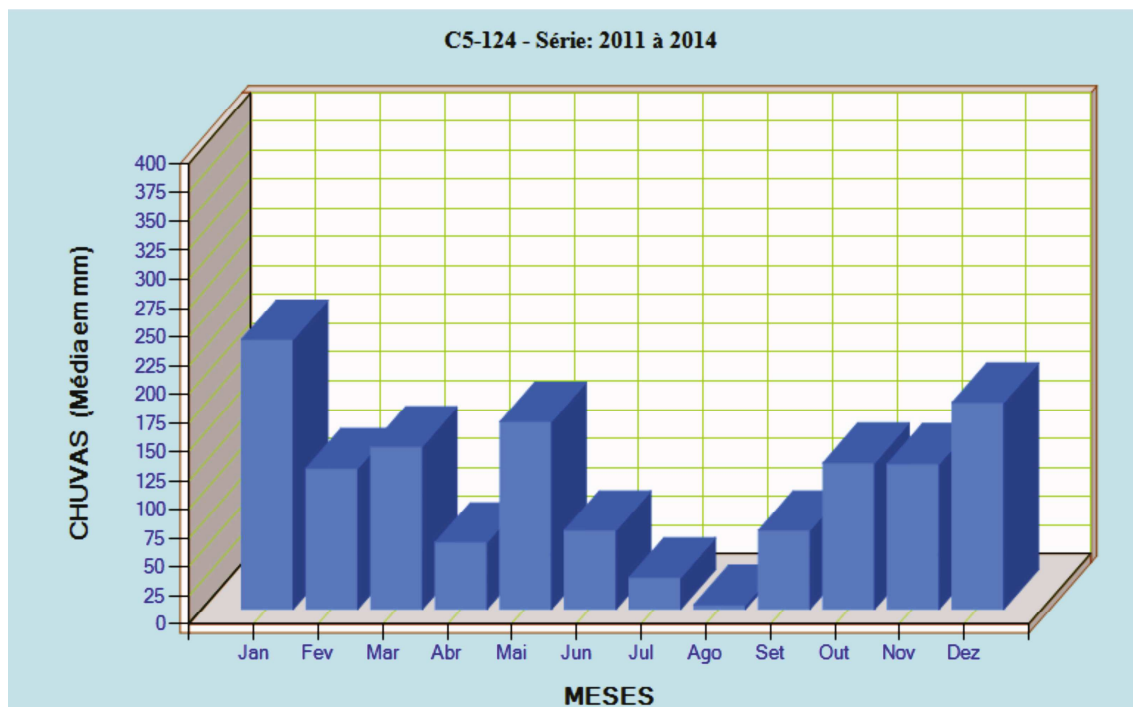


Figura 7 – Gráfico da média mensal das chuvas (mm) em Araraquara de 2011 a 2014(Retirado de <http://www.hidrologia.daee.sp.gov.br/>)

Aspectos Geológicos e Hidrogeológicos da Área de Estudo

A área urbana do município de Araraquara encontra-se em sua maior parte assentada sobre sedimentos da Formação Adamantina (Grupo Bauru), do Cretáceo Superior, enquanto basaltos da Formação Serra Geral afloram na porção noroeste do município, e os sedimentos das formações Botucatu e Piramboia ocorrem na porção leste do município (PIUCI & CAMPOS, 1984) (Figura 08).

A Formação Adamantina é caracterizada pela presença de arenitos finos e lamitos silticos com coloração rósea a acastanhada, de origem flúvio-lacustre, com estratificação cruzada, intercalados a pacotes de argilitos de coloração avermelhada e concreções carbonáticas (GOLDBERG & GARCIA, 2000). Esta unidade assenta-se de

forma direta e discordante, sobre os basaltos da Formação Serra Geral, de idade Juro-Cretácea.

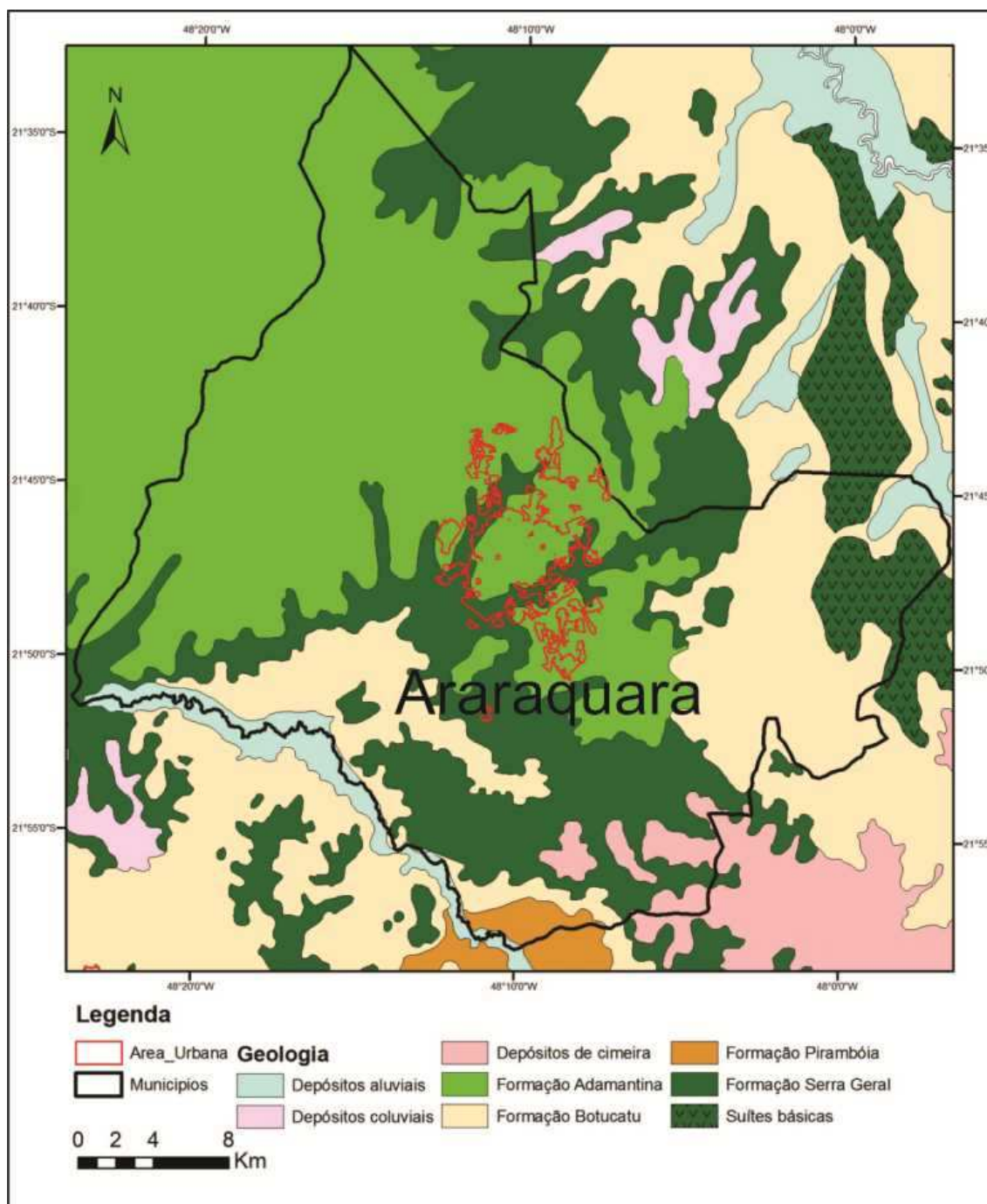


Figura 8 – Mapa geológico do município de Araraquara e adjacências (Modificado de Convênio DAEE/UNESP, 1980)

Na área de estudo, a Formação Serra Geral é caracterizada por um conjunto de derrames de lavas basálticas, de coloração cinza-escuro a negra, afaníticas e de natureza toleítica. Dados de subsuperfície, obtidos a partir de poços perfurados na cidade de Araraquara, indicam que a unidade apresenta grande variação de espessura, podendo

atingir até 266 m, com valores médios próximos dos 110 metros. Essas variações estão associadas a um sistema de falhas ou às irregularidades do paleorelevo dos arenitos eólicos da Formação Botucatu (HIRATA et al, 2012). Nos locais onde a Formação Serra Geral aflora, nota-se um manto de intemperismo, formado por solo vermelho argiloso.

O SAG é considerado o principal aquífero da cidade e cocorrem sotopostos à Formação Serra Geral. O aquífero é composto pelas formações Botucatu e Piramboia, com idades Eotriássica e Juro-Cretácea, respectivamente, cujos litotipos foram depositados em ambientes de sedimentação continentais.

A Formação Pirambóia é constituída por duas porções distintas em termos faciológicos, uma superior e outra inferior. A superior mais arenosa e a inferior apresentando intercalações entre as areias finas e rochas com maior conteúdo de argila. Por outro lado, a Formação Botucatu está assentada em uma superfície de discordância gerada através de abrasão eólica e tem característica de ambiente desértico com deposição de campos de dunas.

O SAG na cidade de Araraquara é considerado por Hirata et al. (2012) como um aquífero confinado pelos basaltos da Formação Serra Geral, entretanto, em algumas áreas afetadas pelo contínuo bombeamento, o nível d'água foi rebaixado para seu interior, passando o aquífero a comportar-se como um aquífero livre. O mesmo autor cita que nas porções onde os sedimentos do SAG estão em contato direto com a Formação Adamantina ou nos locais em que a Formação Botucatu aflora, o aquífero é descrito como livre, e por estarem em situação topográfica mais elevada, são considerados zonas de recarga do SAG, que estão localizadas na porção leste do município, em cotas em torno de 650 metros. Os autores consideram ainda a possibilidade de recarga através das discontinuidades ou fraturas que ocorrem nos basaltos da Formação Serra Geral. Ainda segundo esses autores, a descarga ocorre através de: bombeamento dos poços; descarga na calha do rio Mogi-Guaçu, situado a aproximadamente 7 Km a sudoeste da área de estudo; e escoamento da água subterrânea seguindo o fluxo regional do aquífero, predominantemente para Oeste. Na região de Araraquara o fluxo das águas subterrâneas do SAG apresenta direção predominante SE-NW, e a avaliação temporal das variações dos níveis d'água em poços perfurados na unidade indica que, apesar da intensa retirada de água realizada na cidade, pouca influência na direção regional do fluxo foi observada ao longo do tempo (HIRATA et al., 2012) (Figura 09).

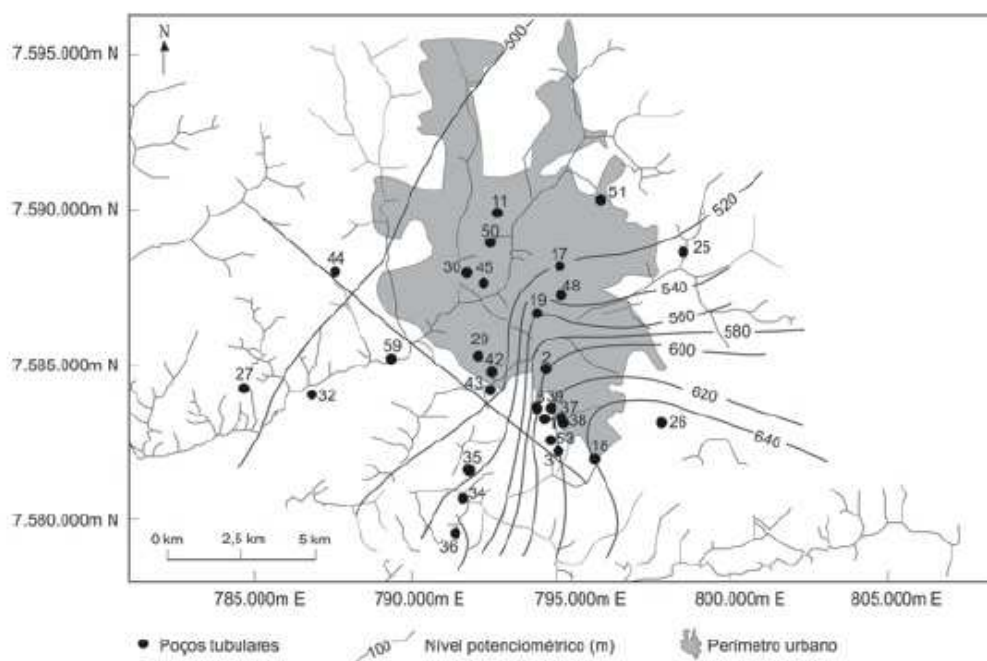


Figura 9 – Mapa Potenciométrico do Sistema Aquífero Guarani na cidade de Araraquara – SP (Retirado de Hirata et al, 2012).

Segundo Hirata et al. (2012), o SAG na cidade de Araraquara apresenta valores de transmissividade (T) que variam entre $2,6 \times 10^{-3}$ e $5,8 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, condutividade hidráulica (K) entre $0,9 \times 10^{-5}$ e $4,1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$, e capacidades específicas ($Q \text{ s}^{-1}$) que variam de 0,1 e 13,0 $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$, valores esses que atribuem ao sistema uma boa produtividade.

A cidade de Araraquara tem 50% do volume da água consumida pela cidade provinda da captação de águas subterrâneas, coletada através do bombeamento de 23 poços espalhados pelo município e os outros 50% provém da captação superficial. No presente trabalho foram disponibilizados 17 poços de abastecimento e o volume de água retirada são apresentados na tabela 1.

Tabela 1- Dados de bombeamento dos poços de captação de Araraquara (Fonte: DAAE-Araraquara)

Poço	Média histórica de bombeamento (m³/h)
Pq. Gramado	171,58
Pinheirinho	193,28
Paio	161,87
Selmi Dei	205,73
Santana	133,46
Rodovia	231,83
Flora	276,75
Lupo	291,48
São Paulo	128,04
Iguatemi	292,59
Fonte	289,30
Santa Lúcia	179,37
Standard	179,88
Ouro	114,69

5. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada para o desenvolvimento do presente projeto é constituída por etapas clássicas em hidrogeologia, especialmente aquelas voltadas à avaliação de aquíferos, envolvendo aspectos hidroestratigráficos e hidrogeológicos. As atividades desenvolvidas são apresentadas a seguir.

5.1 Revisão Bibliográfica e Levantamento de Dados

Foi realizado extenso levantamento bibliográfico, com enfoque principal na revisão de conceitos gerais de hidrogeologia, bem como das principais soluções analíticas e métodos envolvidos em modelagem numérica de fluxo de água subterrâneas, especialmente aqueles relacionados ao fluxo em direção a poços em bombeamento. Além desses aspectos, trabalhos científicos sobre o SAG, englobando a

evolução do conhecimento geológico e hidrogeológico em âmbito regional e local, foram consultados.

Os dados utilizados para a elaboração do presente projeto envolvem informações geológicas de subsuperfície, obtidas a partir de informações de poços perfurados na cidade de Araraquara-SP, bem como dados provenientes dos testes de bombeamento efetuados nos poços. Para tanto, o acervo de dados do escritório do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE), foi consultado.

Após autorização de consulta por parte do DAAE, foram obtidos os dados referentes às perfilagens executadas nos poços, diretamente com a empresa HYDROLOG, em formato LAS. As informações de perfilagens adquiridas e utilizadas no presente trabalho consistem em: Resistividade (RES), Sônico (DT), Potencial Espontâneo (SP) e Raio Gama (GR).

A localização dos poços que foram utilizados no presente trabalho, tanto para caracterização geológica de subsuperfície, quanto para quantificação e utilização de dados de bombeamento do recurso hídrico local do Sistema Aquífero Guarani, pode ser observada na Figura 10. Destacado na mesma figura, também se encontra as curvas do mapa potenciométrico retirado de Hirata et al (2012) e o poço de monitoramento utilizado para monitoramento dos níveis d'água e calibração dos resultados, localizado na Faculdade de Odontologia da Universidade Estadual Paulista – UNESP.

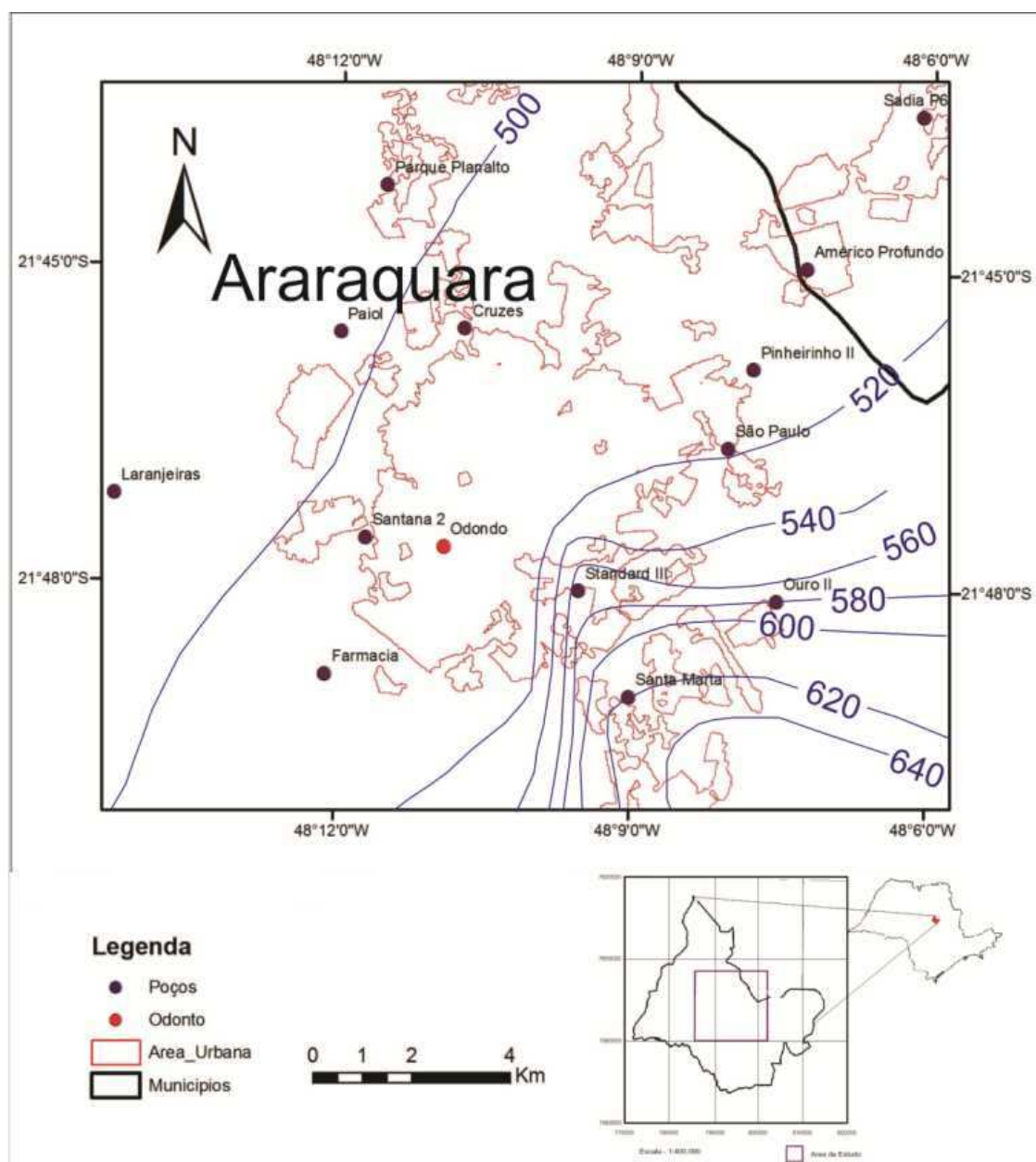


Figura 10– Localização dos poços utilizados combinado com o mapa potenciométrico da área de estudo (Modificado de HIRATA et al., 2012). Destaque, em vermelho, para o poço localizado na Faculdade de Odontologia da UNESP – Campus de Araraquara

5.2 Perfis Geofísicos e sua Aplicação na Caracterização Geológica de Subsuperfície

A perfilagem de poços é o campo das geociências que estuda o registro contínuo de propriedades geológicas e petrofísicas das rochas, medidas com a utilização de diversos tipos de sensores, ao percorrer um poço (SCHLUMBERGER, 1989).

A primeira perfilagem foi efetuada em 5 de setembro de 1927, quando Henri Doll, Charles Scheibli e Roger Jost, liderados pelos irmãos Conrad e Marcel Schlumberger, realizaram medidas elétricas semi-contínuas em um poço no campo de

Pelchebronn, em Alsade – França (Ellis & Singer, 2007). Posteriormente a técnica evoluiu e outros tipos de propriedades físicas começaram a ser investigadas e utilizadas nas interpretações, principalmente na indústria petrolífera e na prospecção de água subterrânea, tais como propriedades elétricas, radioativas, acústicas, térmicas, magnéticas e texturais/estruturais. Ferramentas de perfilagem foram desenhadas especificamente para a medição dessas propriedades, e que adquirem os estímulos gerados pela resposta geofísica das rochas nas proximidades da parede do poço.

Na prospecção de águas subterrâneas os perfis mais comumente empregados são os perfis de: Resistividade, Raio Gama, Sônico e Potencial Espontâneo.

5.2.1 Resistividade

A resistividade elétrica representa a capacidade de uma substância ou meio de dificultar ou impedir o fluxo da corrente elétrica através dela. A grande maioria dos materiais geológicos é formada por rochas que, quando secas, não conduzem corrente elétrica, fazendo com que o valor da resistividade seja elevado. Por outro lado, se uma rocha com matriz porosa, saturada em água, é estimulada eletricamente, irá responder de outra maneira. O fluxo da corrente elétrica irá atravessar o pacote mais facilmente, diminuindo a resistividade do pacote rochoso que, por consequência, irá apresentar alta condutividade elétrica (SCHLUMBERGER, 1989). A resistividade é o único em que é possível fazer a investigação da rocha sã, no interior do maciço rochoso, sem a influência do fluido de perfuração contido no poço (SCHLUMBERGER, 1989).

5.2.2 Raios Gama

Perfis de Raios Gama medem a radioatividade natural de um material geológico, registrada continuamente por meio de pulsos de ondas eletromagnéticas de alta energia, emitidas por uma fonte de algum material radioativo, como Urânio (U^{235}), Tório (Th^{232}) e Potássio (K^{40}). O perfil de raios gama normalmente reflete o conteúdo de material argiloso, devido à presença de K^{40} em grande parte dos argilo-minerais, feldspatos potássicos e biotita (SCHLUMBERGER, 1989).

Segundo Schulumberger (1989), no caso de materiais com mesmo conteúdo radioativo, os níveis de radiação gama podem ser divergentes, dependendo da densidade de cada material. Neste caso, o material com menor densidade poderá apresentar uma taxa de emissão ligeiramente maior.

A aquisição dos dados é feita através de ferramentas que registram os estímulos em count per second (cps). Posteriormente devem ser efetuadas correções nos dados brutos adquiridos, de maneira possibilitem as interpretações litológicas e correlações. A unidade utilizada para os dados nos perfis de Raios Gama, após as correções, é o API (SCHLUMBERGER, 1989).

A tabela a seguir ilustra alguns valores-padrão para diferentes tipos de r

ocha.

Tabela 2 - Valores de Raio Gama de referência (SCHLUMBERGER, 1989)

Rocha	RG API
Carvão	0
Halita (NaCl)	0
Gipsita (CaSO ₄)	0
Anidrita (CaSO ₄ +H ₂ O)	0
Calcário	5 – 10
Dolomito	10 – 20
Arenito Limpo	10 – 30
Arenito Argiloso	30 – 45
Folhelho	40 – 140
Silvita (KCl)	~500

5.2.3 Perfil Sônico

O tempo de trânsito é a unidade utilizada para o perfil sônico, e mede o tempo necessário para que um pulso sonoro emitido por um transmissor transpasse 1 pé de uma determinada formação geológica. O intervalo gerado pelo tempo de trânsito para uma determinada formação é influenciado pela litologia, pela porosidade da rocha, presença de matriz nos poros e pela variação lateral da porosidade no maciço rochoso (SCHLUMBERGER, 1989). Alguns valores de referência para o tempo de trânsito de algumas rochas é apresentado na tabela 3.

Tabela 3 - Valores de referência para perfil sônico (Modificado de SCHLUMBERGER, 1989)

Litologia	pé/s	µs/pé	µs/ pé – mais utilizada
Arenitos	18.000 – 19.500	55,5 – 51,0	55,5 – 51,0
Calcários	21.000 – 23.000	47,6 – 43,5	47,5
Dolomitos	23.000	43,5	43,5
Anidrita	20.000	50,0	50,0
Halita	15.000	66,7	67+,0
Revestimento	17.500	57,0	57+,0

A porosidade da rocha pode ser calculada a partir de dados do perfil sônico de um poço. Para tal, deve ser considerada uma camada limpa e com os poros uniformemente distribuídos pela rocha. A partir destas condições é possível utilizar a fórmula desenvolvida por M.R.J. Wyllie (SCHLUMBERGER, 1989):

$$\phi = \frac{t_{LOG} - t_{ma}}{t_f - t_{ma}}$$

Onde:

t_{LOG} – leitura do perfil sônico

t_{ma} – tempo de trânsito na matriz do material, obtido através da tabela 2.

t_f - tempo de trânsito do fluido saturado

Em função dos fluídos existentes nos poros, tempos de trânsito distintos podem ser observados, como exemplo, o tempo de trânsito médio para água salgada é de 620,1 $\mu s m^{-1}$, para água doce é de 656,2 $\mu s m^{-1}$ e para óleo é de 774,3 $\mu s m^{-1}$.

5.2.4 Aplicação na Caracterização Geológica de Subsuperfície

Por serem corridos de forma contínua dentro do poço, de baixo para cima, até a superfície, perfis geofísicos podem ser utilizados para análises geológicas, desde que não reflitam propriedades dos fluidos, mas somente os parâmetros físicos das rochas (PAULA e SILVA, 2003), uma vez que variações nos parâmetros físicos das rochas, como granulometria, porosidade e presença de fluido nos poros podem ser medidos. A partir dos dados gerados na perfilagem, somado às informações geológicas providas

das descrições de calha e conhecimento prévio do arcabouço geológico local, é possível interpretar a geologia de subsuperfície com grande nível de certeza.

Geralmente os sedimentos mais finos tendem a ter maior conteúdo argiloso, apresentando respostas características na maioria dos perfis utilizados, as quais são distintas das respostas observadas em pacotes arenosos. Com a finalidade de diferenciar variações litológicas relacionadas a granulometria, a utilização dos perfis de Raio Gama (GR) e de Resistividade (RES) é indicada. Os perfis de Resistividade também indicam a presença e natureza de fluidos presentes nos interstícios das rochas, porém nesta abordagem os valores podem ser considerados basicamente por variações litológicas visto que os poros das rochas, em sua grande maioria, estão saturados com água doce.

Deste modo, utilizando-se de um conjunto de perfis geofísicos, contendo as curvas de Raios Gama e Resistividade, é possível a avaliação de variações faciológicas verticais e laterais, assim como estabelecer a existência de sequencias separadas pela presença de discordâncias erosivas. Para a interpretação geológica de sub superfície do SAG na cidade de Araraquara, foram elaboradas algumas seções geológicas, ilustradas na figura 11.

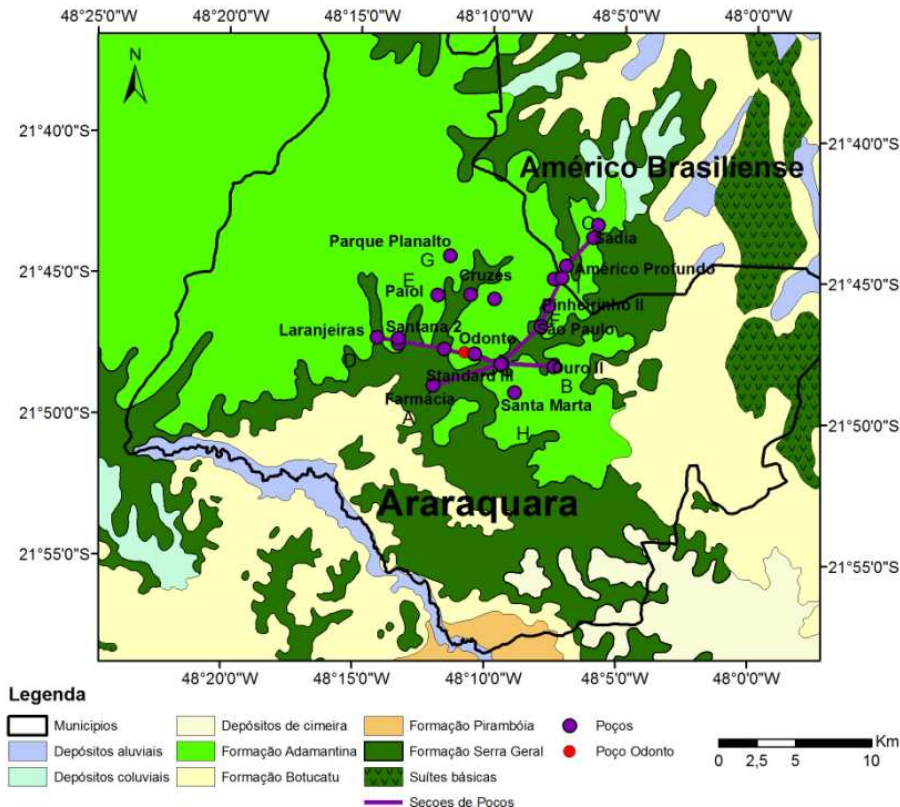


Figura 11– Mapa geológico destacando as seções geológicas elaboradas e utilizadas no estudo.

5.3 Monitoramento das Variações dos Níveis

Com o objetivo de se avaliar a influência da extração de água do SAG na cidade de Araraquara (SP), foi realizado monitoramento contínuo da variação temporal dos níveis d'água em um poço perfurado na Faculdade de Odontologia da UNESP, situado na região central da zona urbana do município, e que seria afetado pelo bombeamento realizado na cidade. Esse poço encontra-se fora de operação desde 2013, e sua localização é apresentada na figura 11.

Para o registro dos níveis d'água foi utilizado um transdutor de pressão do tipo *Level Logger*, marca Schlumberger, sem correção barométrica. Esse equipamento possibilita o monitoramento da variação do nível d'água, por meio da medição da diferença de pressão exercida pela coluna de água situada acima do nível em que foi colocado, portanto ele foi sempre posicionado na mesma cota dentro do poço, para manutenção de referência dos níveis. Como anteriormente mencionado, o transdutor foi configurado para leituras de nível com intervalos de 5 minutos, possibilitando grande flexibilidade temporal para as interpretações. Estes dados foram recolhidos periodicamente e avaliados em escritório, juntamente com as informações de bombeamento disponíveis dos poços de abastecimento junto ao DAAE de Araraquara.

6. RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos pelo presente projeto, divididos em duas partes: na primeira será apresentado o arcabouço hidroestratigráfico do SAG na cidade de Araraquara, com base em informações perfis geofísicos de sub superfície, e na segunda parte, além dos dados referentes à variação temporal do nível d'água do SAG, observados no poço monitorado, além disso, serão discutidos cenários de extração de água subterrânea e as características hidráulicas das diferentes porções dentro do SAG.

6.1 Arcabouço Hidrogeológico do SAG com base de dados de subsuperfície

Uma das etapas de desenvolvimento deste trabalho buscou, a partir de dados de perfilagens geofísicas calibradas, aliado às descrições geológicas de amostras de calha,

caracterizar o arcabouço hidrogeológico para a área de estudo, com ênfase no SAG e nas unidades aquíferas associadas.

6.1.1 Aspectos Geológicos

Em estudos estratigráficos de bacias sedimentares, o reconhecimento de superfícies que representam discordâncias geológicas, ou *Datums*, representa o primeiro passo no entendimento da sucessão deposicional e das relações entre as unidades geológicas. No caso do SAG, a superfície de discordância representada pelo contato entre a Formação Pirambóia e o topo da Formação Corumbataí, que constitui o substrato impermeável do aquífero, é o marco estratigráfico regional mais importante, reconhecido por diversos autores (LEBAC, 2008 a,b; GASTMANS et al, 2012). Entretanto, nenhum dos poços perfurados na cidade de Araraquara, e utilizados no presente trabalho, alcançou essa superfície. Entretanto, uma segunda superfície de discordância pôde ser reconhecida na área, e utilizada como *datum* estratigráfico. Trata-se do contato entre as formações Pirambóia e Botucatu, que foi empregado nas correlações entre os poços.

O arcabouço geológico de superfície do município de Araraquara é constituído pelas formações Botucatu, Serra Geral e Adamantina (Figura 12), porém dentro do perímetro do município podem-se encontrar alguns poucos afloramentos da Formação Pirambóia. Em sub superfície foram reconhecidas as formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral.

A Formação Pirambóia é constituída basicamente por arenitos com matriz argilosa intarcalados com raros estratos de rochas com composição de caráter pelítico em sua parte inferior, alternando para pacotes mais espessos de arenitos com estratificações cruzadas e menor conteúdo de material argiloso nas camadas superiores. A unidade apresenta em sub superfície espessuras parciais que variam entre 60 de 230 m, e estão diretamente relacionadas com a profundidade do poço avaliado. Uma vez que nenhum poço alcançou a unidade subjacente, as espessuras totais não podem ser determinadas com precisão. A máxima espessura foi encontrada no poço ETA – Paiol (Figura 12), localizado na porção oeste da área urbana de Araraquara.

Já a Formação Botucatu é caracterizada pela exclusiva presença de camadas arenosas que apresentam espessuras variáveis, desde os 150 metros no poço Standard III (Figura 12), localizado na região leste da cidade de Araraquara, até a ausência total da unidade observada na porção oeste da cidade no poço Laranjeiras (Figura 13).

Em alguns dos poços avaliados foi possível evidenciar a ocorrência de camadas de arenitos da Formação Botucatu interdigitados aos derrames de basaltos da Formação Serra Geral, como se evidencia nos poços Pinheirinho II e Américo Brasiliense – Profundo (Figura 14). A base do primeiro derrame foi considerada como início das atividades vulcânicas na bacia, e sua profundidade utilizada na definição do contato entre as formações Botucatu e Serra Geral.

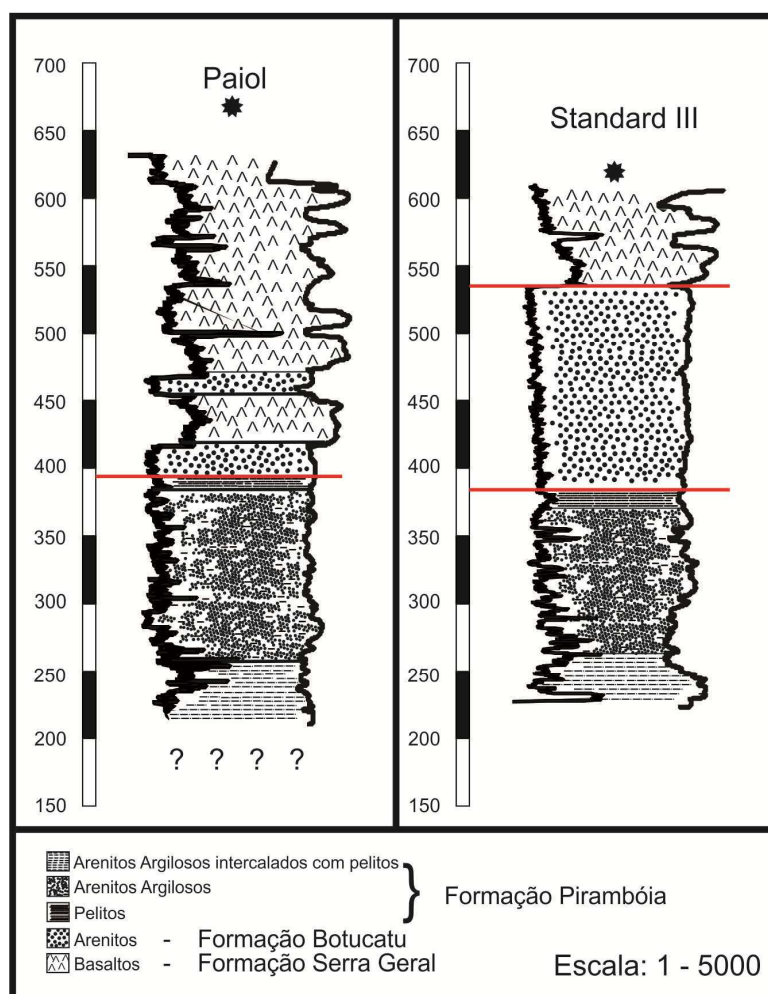


Figura 12– Perfil demonstrativo da espessura da Formação Pirambóia no poço ETA – Paiol e da Formação Botucatu no poço Standard III. Linha vermelha indica topo e base das respectivas formações.

Apesar de aflorar em grande parte da área de estudo deste trabalho, a Formação Adamantina é relativamente pouco espessa. Inexistente nas regiões onde a Formação Serra Geral é aflorante, essa unidade pode alcançar 50 metros de espessura, nas proximidades do poço Paiol, na porção centro-noroeste da área estudada.

Com o intuito de caracterizar o arcabouço geológico de subsuperfície, através da correlação de poços, foram construídas duas seções geológicas cortando a área de

estudo apresentadas nas figuras 13 (Seção D-B) e 14 (Seção A-C), com direções E-W e SW-NE respectivamente. Dessa maneira o arcabouço pode ser observado por diferentes perspectivas, além de que estas seções apresentam grande parte das feições descritas até o momento no trabalho. Além das seções, com o propósito de melhor caracterizar a presença de estruturas na área de estudo, foram elaborados mapas de contorno estrutural da superfície utilizada como *datum* estratigráfico (Figura 15), isópacas da Formação Botucatu (Figura 16) e isópacas da Formação Serra Geral (Figura 17).

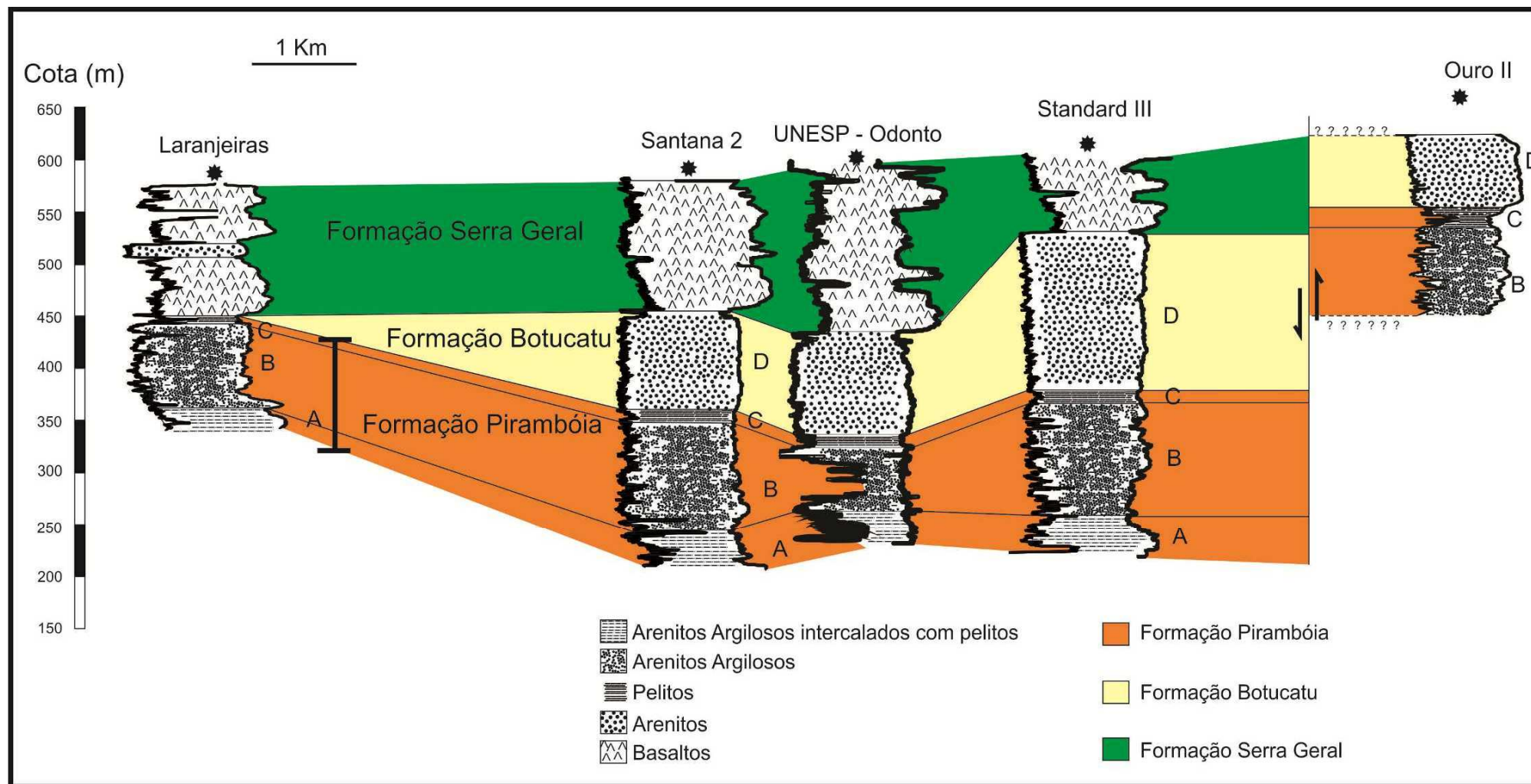


Figura 13– Seção de correlação de poços D-B (E-W). As letras representam as hidrofacies caracterizadas no trabalho. A superfície superior da unidade C é o contato entre o topo da formação Pirambóia e a base da formação Botucatu. A superfície superior à unidade D representa o contato entre o topo da formação Botucatu e a base da formação Serra Geral (representada por E).

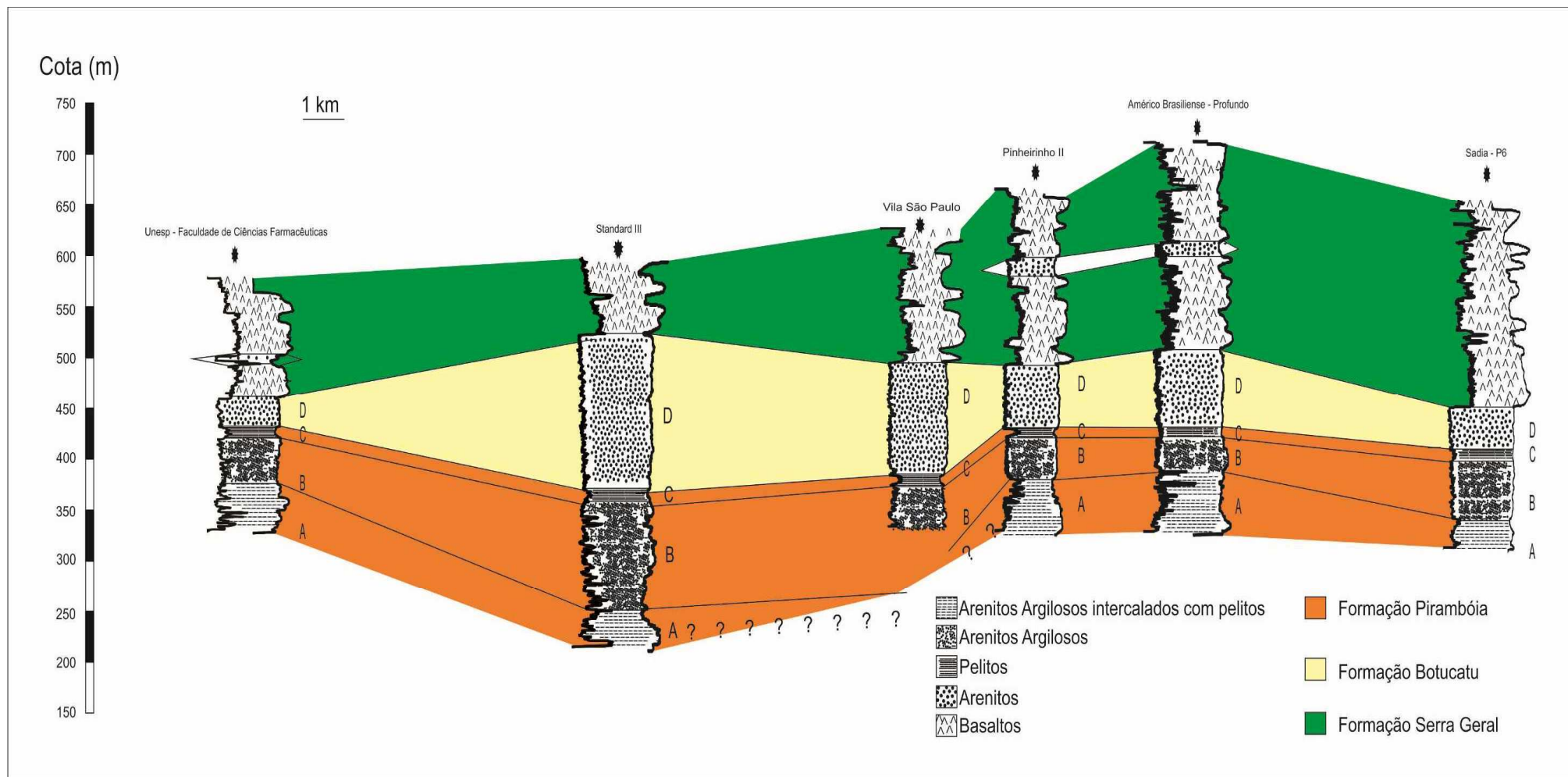


Figura 14– Seção de correlação de poços A-C (SW-NE). As letras representam as hidrofácies caracterizadas no trabalho. A superfície superior da unidade C é o contato entre o topo da formação Pirambóia e a base da formação Botucatu. A superfície superior à unidade D representa o contato entre o topo da formação Botucatu e a base da formação Serra Geral (representada por E).

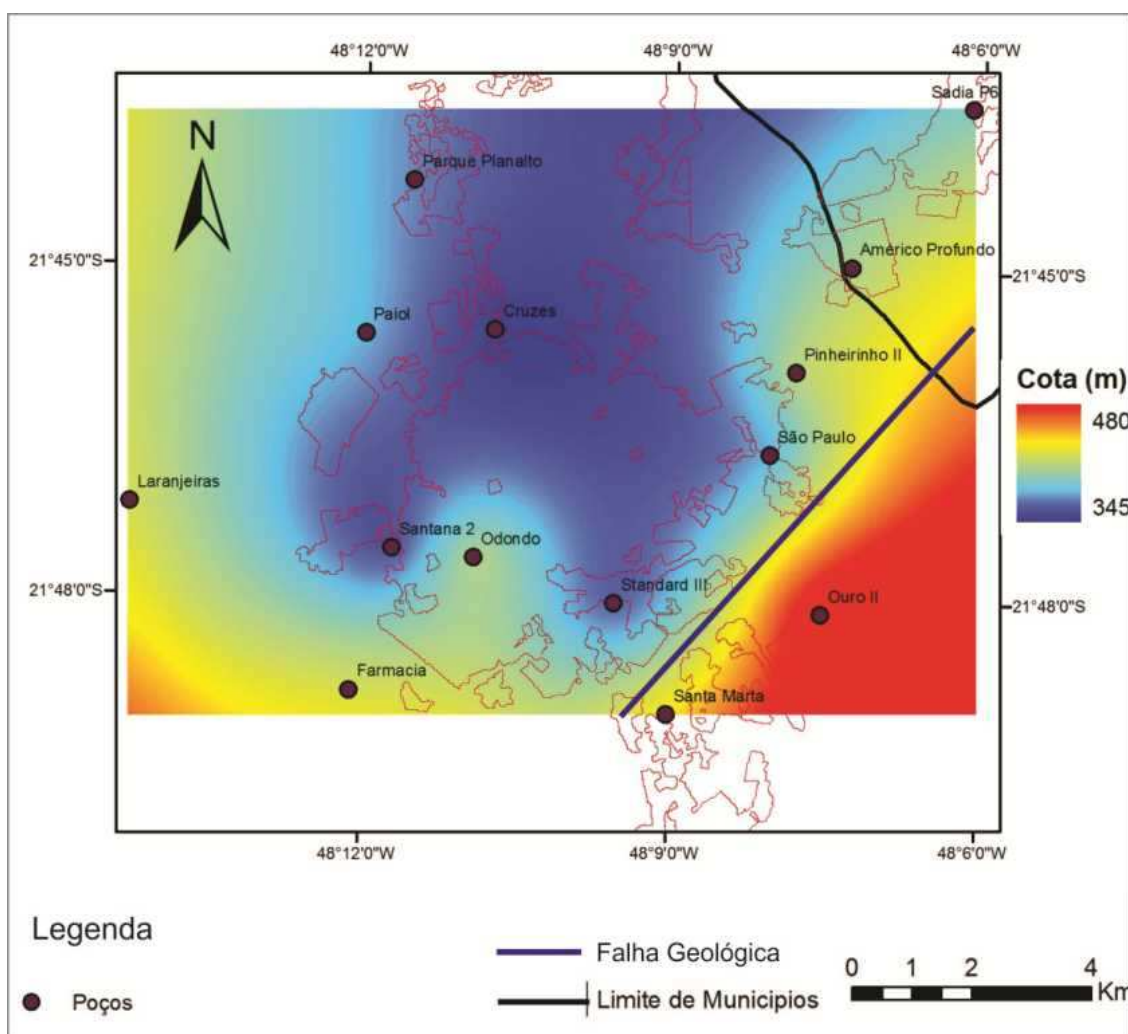


Figura 15– Mapas de contorno estrutural da superfície de contato entre as formações Pirambóia e Botucatu (*Datum Estratigráfico*).

Grande variação de espessura da Formação Botucatu é observada nas figuras citadas, e é possível observar que as maiores espessuras estão na porção central da área urbana. Existem duas regiões na área de estudo onde a espessura da formação Botucatu é bastante reduzida, ou até inexistente: à leste e à oeste da área de estudo (Figura 16). Na região leste da cidade, importante estrutura poderia ter condicionado a deposição das areias localmente, promovendo o soerguimento das unidades, proporcionando um ambiente propício para a erosão da porção superior da Formação Botucatu e todo o pacote de basaltos (Figura 14). No mapa da figura 15, também é possível evidenciar a presença da estrutura SW-NE comentada anteriormente. As variações de espessura dos arenitos da região leste podem ser associadas às condições de deposição da unidade, em ambiente desértico, refletindo a formação de dunas, posteriormente soterradas pelos

derrames basálticos da Formação Serra Geral. Esta última possibilidade se apresenta de forma mais coerente ao analisar a ausência dos arenitos Botucatu na porção oeste da cidade, como evidenciado no poço Laranjeiras, que não tem nenhuma influência tectônica caracterizada.

O contato entre as formações Botucatu e Pirambóia é caracterizado pela presença de uma discordância, evidenciado nos perfis geofísicos pela ocorrência de alterações bruscas nos valores de RG e RES. O mesmo ocorre no contato entre as formações Botucatu e Serra Geral (Figura 13 e Figura 14). Tal superfície serviu como *datum* estratigráfico, e assim como o restante das camadas apresenta leve mergulho, de aproximadamente 1°, no sentido NE (Figura 15).

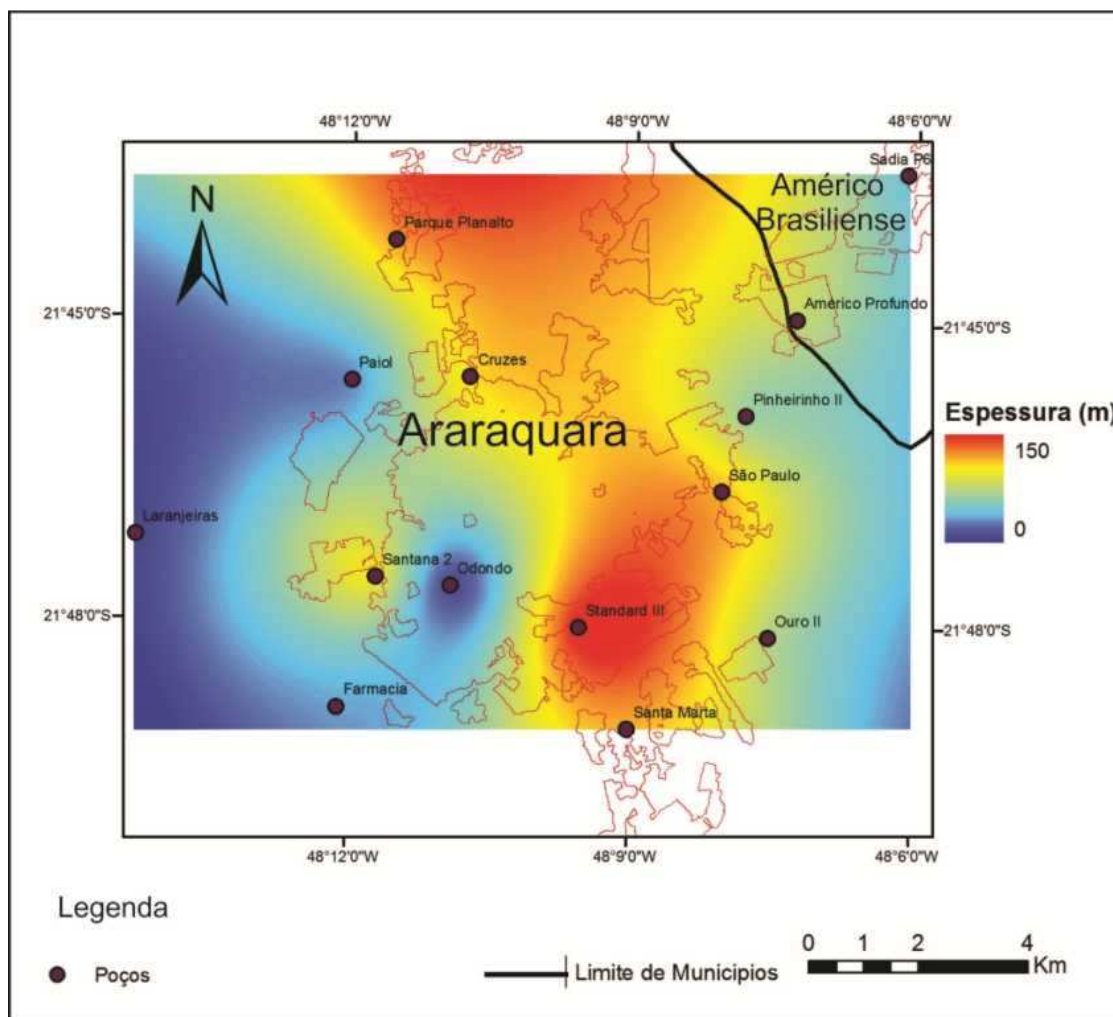


Figura 16– Mapa de Isópacas da Formação Botucatu

As feições observadas nos perfis geofísicos indicam que sedimentação na Formação Pirambóia obedece a um regime de granocrescência ascendente, evidenciado

pela diminuição dos valores de RG da porção inferior do pacote em direção ao topo. A mesma interpretação pode ser feita quando combinado ao perfil de RES, onde a maior compactação ocorre nos sedimentos mais finos que apresentam resistividades menores. As exceções são feitas nas ocorrências de pacotes de arenitos que aparecem interdigitados aos pelitos na Formação Pirambóia e apresentam alguma porosidade, que por consequência aumenta os valores de RES.

O padrão descrito acima ocorre devido à transição do ambiente fluvial, observado nas porções basais da Formação Pirambóia, para deposição de ambiente eólico, nas superiores. Neste caso, os ambientes que contam com transportes de menor energia são substituídos gradualmente por sedimentos oriundos de processos sedimentares de alta energia. Essa condição, previamente descrita por outros autores como Caetano Chang (1997) em um contexto mais regional, é observada em toda a área de estudo do presente trabalho.

As espessuras observadas para os basaltos da Formação Serra Geral (Figura 17) são bastante variáveis na área de estudo. As maiores espessuras são encontradas na porção centro-norte da área, mais precisamente nos poços do município de Américo Brasiliense (Américo Profundo apresenta 235 m e 210 metros são encontrados no poço Sadia P6).

As espessuras dos derrames basálticos aumentam em direção NE possivelmente associadas ao preenchimento do paleorrelevo devido à morfologia das dunas eólicas. As espessuras na cidade de Araraquara alcançam 235 m.

Paula e Silva (2008) obteve resultado semelhante na caracterização do arcabouço geológico de subsuperfície em seu trabalho na região de Ribeirão Preto. É possível observar grande continuidade nas características das camadas e uma continuidade das unidades entre as áreas.

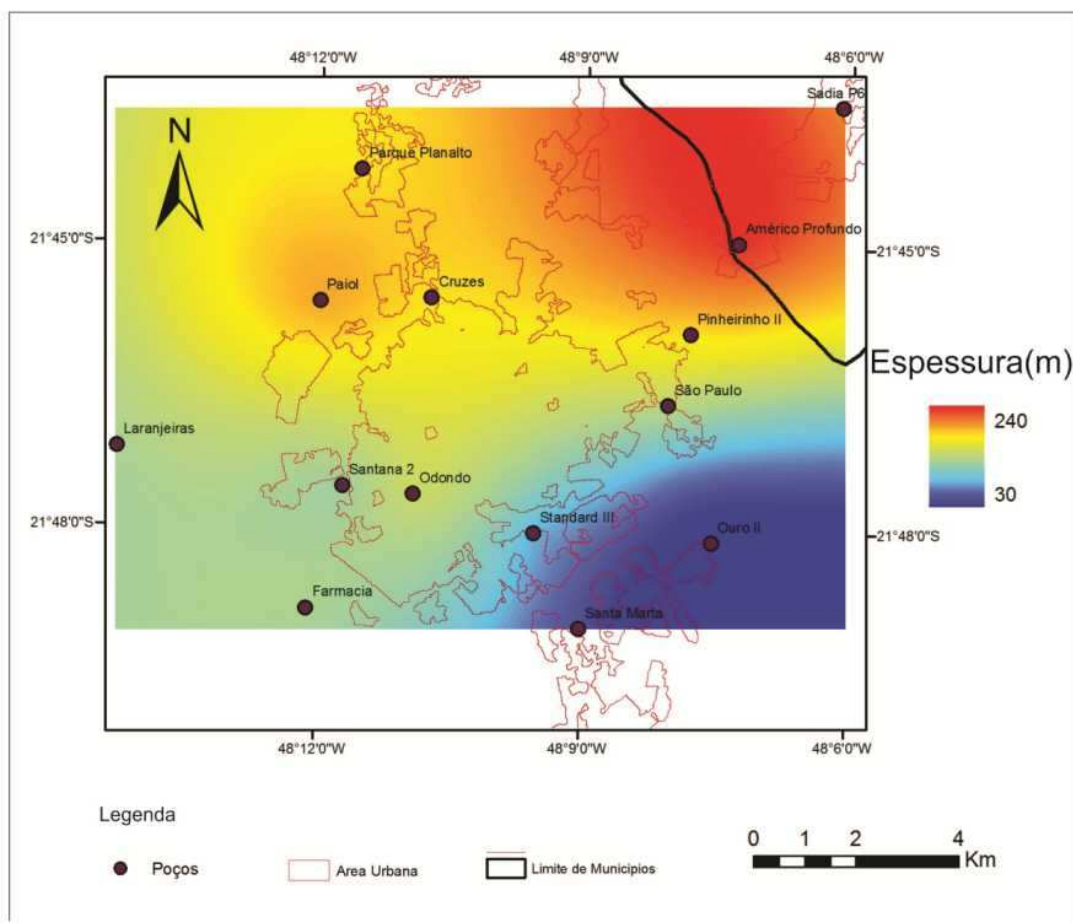


Figura 17–Mapa de isópacas do basalto Serra Geral

A partir da avaliação dos perfis geofísicos foram calculadas as porosidades médias para os arenitos das formações Pirambóia e Botucatu (Tabela 4). Caracterizada por maior conteúdo argiloso em meio aos arenitos, a Formação Pirambóia apresenta valores médios de 24,5% de porosidade, enquanto que a Formação Botucatu, que é constituída por arenitos bem selecionados e com pouca ou nenhuma presença de argila, tem valores médios próximos de 33%.

Tabela 4 - Tabela de Porosidades por formações e por hidrofacies (%).

Poços	Porosidade Média		Porosidade Média			
	Fm. Pirambóia	Fm Botucatu	Hidrofacies A	Hidrofacies B	Hidrofacies C	Hidrofacies D
Santana	22,7	32	13,5	25,6	29,1	32
Santa Marta	28,4	33,4	26,9	28,9	29,4	33,4
Ouro II	16,9	36,8	-	27,9	22,7	36,8
Laranjeiras	12,5	-	-	20,6	17	-
Pinheirinho	23,8	31,5	23,3	28	20,1	31,5
Vila São Paulo	25,0	33,9	24,9	27,8	22,2	33,9
Parque Planalto	26,5	33,5	22,1	28,7	28,6	33,5
Paíol	24,9	31,8	19,1	26,6	29,1	31,8
Cruzes	25,2	31	23,2	27,6	24,8	31
Standard III	24,4	34	21,5	24,8	26,9	34
Porosidade Média	24,5	33,1	21,8	26,7	25	33,1

6.1.2 Caracterização das Unidades Hidrofaciológicas

A partir das análises dos perfis geofísicos foram observadas e discriminadas quatro hidrofacies, constituintes do SAG na área de estudo, diferenciadas em função do seu conteúdo de argila e, conseqüentemente, das propriedades hidráulicas de cada uma delas. As hidrofacies foram designadas por meio das letras: A, B, C e D, e cada uma delas apresentam diferentes padrões nos perfis interpretados. As hidrofacies A, B e C representam variações dentro da Formação Pirambóia, da sua base para o topo respectivamente, enquanto a hidrofacie D representa a Formação Botucatu (Figura 18).

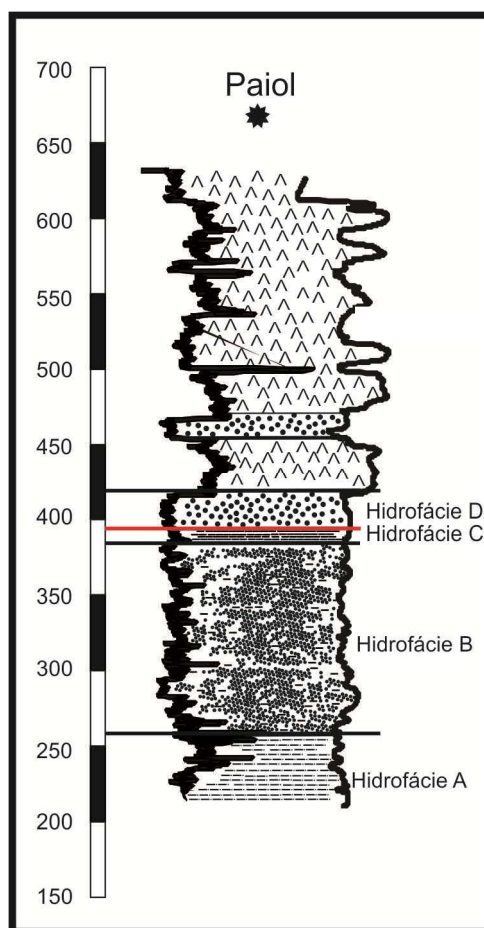


Figura 18– Perfil esquemático de poço interpretado por Raios Gama (curva da esquerda) e Resistividade (curva da direita). Destaque em vermelho para superfície superior da hidrofacie C (contato entre as Formações Pirambóia e Botucatu).

6.1.1.1 Hidrofácies A

Esta unidade representa a base da Formação Pirambóia na área, sendo constituída por intercalações de arenitos com matriz argilosa e rochas pelíticas, conforme observado nos perfis geofísicos e nas descrições das amostras de calha. Os altos valores de RG indicam a presença constante de material argiloso. Seguindo o mesmo raciocínio foi observado que os valores para RES apresentam grande quantidade de variações devido às intercalações, e altos valores no perfil sônico, o que caracteriza baixa porosidade dos arenitos, em função de possível preenchimento dos poros por matriz argilosa. A porosidade média estimada para esta hidrofácies é de aproximadamente 22%, podendo variar entre 13% e 27% (Tabela 3). A espessura da hidrofácies A não pôde ser determinada, pois nenhum dos poços perfurou esta seção por completo. As características hidráulicas dessa hidrofácies não foram consideradas boas, pois existe uma considerável quantidade de argila nos poros dos arenitos que, somada com as intercalações com rochas de menor granulometria, diminui os valores de condutividade hidráulica e consequentemente de transmissividade.

6.1.1.2 Hidrofácies B

Unidade pertencente a porções superiores da Formação Pirambóia, apresenta padrões litológicos distintos da unidade descrita anteriormente. Apesar de apresentar pequenas intercalações entre arenitos e rochas com menor granulometria e arenitos com matriz argilosa, esta hidrofácies tem como característica maior espaçamento entre as camadas visivelmente mais argilosas. A diminuição no *background* dos valores de RG e RES, somada a maior homogeneidade no pacote rochoso, consolidam uma porção mais arenosa, que tem como característica a granocrescência ascendente. A partir da constatação de um caráter menos argiloso e o maior conteúdo de sedimentos arenosos “limpos”, as características hidráulicas e o potencial aquífero desta unidade foram considerados maiores que a da hidrofácies A. A espessura desta hidrofácies varia entre 30 e 125 metros e a porosidade média estimada gira em torno de 27%, com variações entre 20,6% e 28,9% (Tabela 3).

6.1.1.3 Hidrofácies C

A hidrofácies C, também inserida na Formação Pirambóia, é constituída por uma delgada camada de rochas pelíticas que apresentam valores altos de RG e baixos valores de RES, evidenciando o caráter argiloso da unidade. Os limites inferior e superior desta unidade são caracterizados pela presença de discordâncias erosivas. O contato superior dessa hidrofácies representa uma discordância bem marcada e que se estende por toda a região de estudo. A superfície representa o contato entre as hidrofácies C e D, bem como o contato entre o topo da Formação Pirambóia e base da Formação Botucatu, portanto a hidrofácies C, apesar da pouca espessura (varia entre 10 e 15 metros), é de extrema importância, pois com baixa porosidade e permeabilidade, divide o SAG em duas partes com porosidades distintas com base na caracterização geológica dos arenitos das formações Pirambóia e Botucatu. Apesar de apresentar porosidade média de 25%, esta unidade apresenta valores pontuais relativamente altos, na casa dos 29,4%, próximo ao poço Santa Marta (Tabela 3). Ainda que apresente porosidade relativamente elevada esta unidade não apresenta boa permeabilidade por se tratar de rochas com caráter argiloso.

6.1.1.4 Hidrofácies D

A hidrofácies D é basicamente constituída pelos sedimentos arenosos da Formação Botucatu, de modo que as propriedades geofísicas do pacote rochoso confirmam a presença destas rochas. A espessura desta camada varia entre 0 (contato direto entre os Basaltos com a hidrofácies C da Formação Pirambóia) a 150 metros (contato superior com os Basaltos Serra Geral e inferior com a hidrofácies C).

O perfil RG apresenta valores bastante baixos e os valores de RES se apresentam constantemente maiores devido a presença de poros. Apresentando variações entre 31% e 36,8%, a porosidade média desta unidade, na casa dos 33%, é considerada muito boa e com grande potencial aquífero (Tabela 3). A partir dos padrões geofísicos analisados, somado ao conhecimento geológico prévio, esta hidrofácies não apresenta conteúdo de material argiloso em todo o pacote rochoso.

6.1.1.5 Basaltos Serra Geral

Unidade constituída pelos derrames vulcânicos da Formação Serra Geral que apresenta transição para a Hidrofácies D de forma brusca, evidenciada pela grande magnitude das quebras nos perfis RG e RES tanto no contato com a formação Botucatu, representada pela hidrofácies D, quanto diretamente com a Formação Pirambóia, ou hidrofácies C.

É de conhecimento comum que os valores de resistividade para os basaltos são de patamares bastante elevados e os mesmos são encontrados em todos os poços estudados no presente trabalho. Os basaltos apresentam baixa porosidade e praticamente nenhuma permeabilidade.

Em alguns poços esta unidade chega até a superfície, em outros casos ainda é recoberto pela Formação Adamantina, a qual não foi discriminada no presente trabalho, pois não existem perfis que representem esta unidade.

6.2 Aspectos hidrogeológicos do SAG na cidade de Araraquara

A caracterização hidrogeológica foi fator fundamental para a estimativa e controle dos valores calculados de transmissividade (T) e coeficiente de armazenamento (S). Através da aplicação conjunta de diferentes critérios geológicos e hidrogeológicos foi possível obter valores bastante coerentes para as variáveis citadas.

Os valores de transmissividade para os poços foram calculados a partir dos dados dos testes de bombeamentos, mais especificamente da etapa de recuperação (Figura 18) e, para alguns poços, adquiridos junto ao DAEE de Araraquara. Os valores obtidos para cada poço e utilizados nos cálculos de rebaixamento do SAG podem ser observados na tabela 4. Os valores de T para o SAG observados no presente trabalho variam entre $1,2 \times 10^{-3}$ e $2,3 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e são relativamente maiores quando comparados aos valores propostos por Hirata et al. (2012), que variam entre $2,6 \times 10^{-3}$ e $5,8 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Os poços que tiveram T calculados foram: Paiol, Ouro, Standard, Fonte, Rodovia, Lupo e Santa Marta. Os demais foram obtidos através de literatura, pois não foi possível adquirir os testes de bombeamento para efetuar os cálculos.

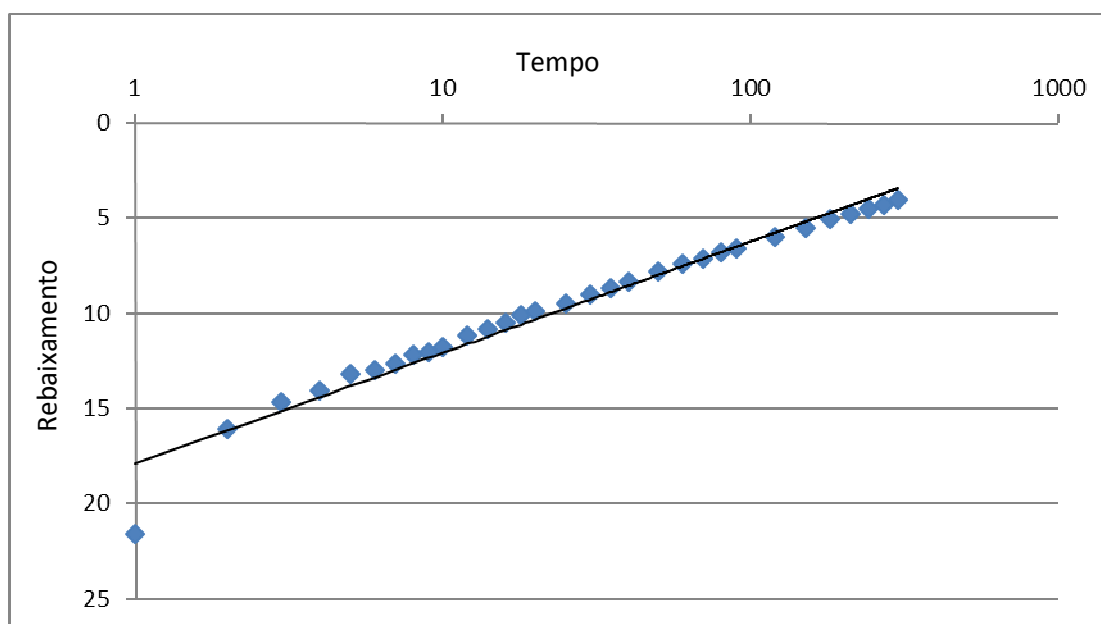


Figura 19 - Teste de bombeamento – Etapa de Recuperação – com linha de tendência e fórmula da reta utilizada para um dos cálculos de Transmissividade

Tabela 5 - Dados de transmissividade dos poços de Araraquara-SP

Poço	Transmissividade ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
Santana	$1,7 \times 10^{-3}$
Santa Lúcia	$1,9 \times 10^{-3}$
Pq Gramado – Vila Vieira	$2,0 \times 10^{-3}$
Standard III	$1,6 \times 10^{-3}$
Fonte	$2,2 \times 10^{-3}$
Cruzes	$1,6 \times 10^{-3}$
Paiol	$2,3 \times 10^{-3}$
Lupo	$1,2 \times 10^{-3}$
Santa Marta	$1,3 \times 10^{-3}$
Ouro	$1,2 \times 10^{-3}$
Pinheirinho	$1,4 \times 10^{-3}$
Selmi Dei	$1,3 \times 10^{-3}$
Iguatemi	$1,7 \times 10^{-3}$
Rodovia – Pq São Paulo	$1,9 \times 10^{-3}$

6.2.1 Rebaixamento medido no Poço de Observação

Durante 435 dias o poço abandonado localizado na Faculdade de Odontologia de Araraquara - UNESP foi monitorado, e os resultados se encontram na figura 20. A partir dos dados de rebaixamento, influenciado pelo bombeamento dos poços na cidade de Araraquara, foi traçado uma linha de tendência, de equação $7.10^{-6}x + 177,92$, que representa a queda do nível d'água no poço de observação em aproximadamente 3,67 metros/ano (Figura 20 A). O rebaixamento total consiste na diferença entre a profundidade inicial do nível d'água (177,30 m) e a profundidade final (181,80 m), que caracterizou um rebaixamento de 4,5 metros durante o período de aquisição.

Flutuações nos níveis d'água são observadas durante todo o período de monitoramento (Figura 20 A a C), provavelmente relacionadas a operação dos poços que exploram o SAG na cidade de Araraquara. A paralisação do bombeamento em algum poço próximo irá provocar a consequente recuperação nos níveis d'água no poço de observação (Figura 20 B e C). Já as variações diárias, apresentadas na figura 20D, estão possivelmente associadas a desligamentos por pequenos períodos dos poços de bombeamento, diretamente relacionado a operação diária do sistema de abastecimento do município, ou mesmo a falta de correção barométrica no sistema de leitura dos níveis d'água.

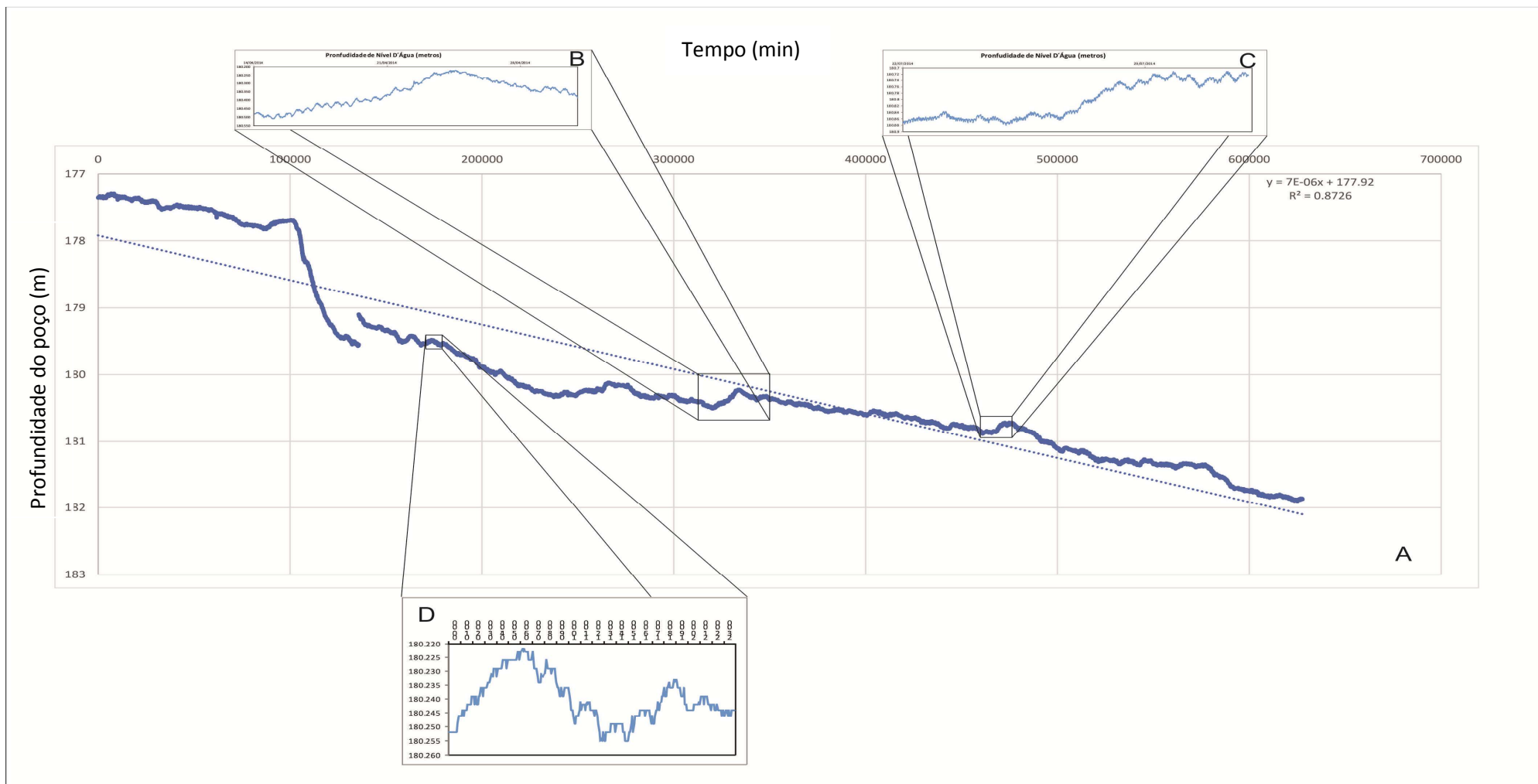


Figura 20 - a) Gráfico com todos os dados adquiridos no monitoramento do nível d'água; b) Gráfico quinzenal do rebaixamento; c) Gráfico Semanal do rebaixamento; d) Gráfico diário do rebaixamento no poço UNESP - ODONTO

6.2.2 Cálculo do Rebaixamento com influência de Bombeamento no Poço Odonto

Em função da sua localização, central em relação aos poços utilizados pelo DAAE-Araraquara no abastecimento público (Figura 11), é correto supor que o rebaixamento observado no poço-Odonto represente a somatória dos rebaixamentos causados por cada um dos poços, conforme apresentado na figura 5. Assim, utilizando-se da simplificação de Cooper-Jacob (COOPER et al., 1946) e considerando-se os volumes bombeados nos poços do DAAE de Araraquara, é possível se estimar a contribuição de cada um desses poços no rebaixamento observado, a partir da estimativa de valores para os coeficientes de armazenamento.

Em função da indisponibilidade de dados operacionais de poços particulares existentes na cidade de Araraquara, a aproximação aqui apresentada representa apenas o volume bombeado pelos poços de captação para abastecimento urbano. Portanto alguns poços, cujos dados não estão discriminados no presente trabalho, também devem influenciar no comportamento dos níveis d'água na cidade de Araraquara.

As vazões consideradas no presente estudo representam as médias históricas de bombeamento dos poços do DAEE na cidade de Araraquara. Esses dados consistem em um levantamento contínuo efetuado pelo DAEE, iniciado em 1973, e que contém a somatória dos valores explorados através de bombeamento dos poços de captação para abastecimento.

Os valores do coeficiente de armazenamento (S) podem ser obtidos quando se realiza um teste de aquífero, ou teste de interferência entre poços, o que não foi possível de se efetuar no desenvolvimento do projeto. Deste modo, as primeiras estimativas para os valores do coeficiente de armazenamento, foram feitas com base em critérios geológicos, considerando-se a relação entre a profundidade do nível d'água (NA) em um determinado poço e a profundidade da base dos basaltos da Formação Serra Geral no poço, ou seja, quanto menor o valor de S, maior será o confinamento do aquífero (SAG), portanto a superfície piezométrica do aquífero se encontrará muito acima da base da camada confinante (no caso o Basalto).

O ajuste entre o rebaixamento total observado e o calculado indicou que o coeficiente de armazenamento do SAG na cidade de Araraquara é relativamente alto, deste modo o aquífero, na região de estudo, encontra-se em situação de semi-confinamento (Tabela 5).

O rebaixamento calculado a partir desses dados, considerando-se um tempo de bombeamento de 435 dias, foi de 4,2 metros, muito próximo ao rebaixamento observado no período (4,5 metros) (Tabela 6). Como esperado, observa-se que os poços mais próximos ao Poço Odonto contribuem de maneira mais significativa para os rebaixamentos observados (Figura 21). Durante a calibração do modelo foi possível observar que os valores de S modificam de maneira mais efetiva o valor do rebaixamento quando comparado aos valores de T. Poços encontrados em grandes distâncias do poço de bombeamento apresentam valores de S relativamente menores. A avaliação do arcabouço geológico indica que poços Ouro e Santa Marta se encontram em região da cidade que não influenciam diretamente o fluxo no restante da área de estudo, isso se deve a presença da estrutura geológica na região destes poços afeta o regime lateral de fluxo. Deste modo o rebaixamento observado no Poço Odonto relativo à influência destes poços foi desconsiderado.

Tabela 6 - Dados hidráulicos dos poços utilizados no cálculo do rebaixamento teórico no Poço Odonto

Poço	Transmissividade m ² /dia	S estimado	Distância (m)	Vazão (m ³ /dia)	Rebaixamento (m)
Santana	150	0,03	1350	3203,04	1,67
Santa Lúcia	160	0,022	2200	4304,88	0,82
Pq Gramado – Vila Vieira	170	0,013	3300	4117,92	0,31
Standard III	140	0,02	2500	4317,12	0,22
Fonte	190	0,02	2900	6943,20	0,29
Cruzes	140	0,009	3800	5977,44	0,18
Paíol	200	0,01	4200	3884,88	0,16
Lupo	101	0,005	4400	6995,52	0,11
Santa Marta	111,26	0,006	4200	2963,04	0,06
Ouro	100,93	0,028	5850	2838,00	0,08
Pinheirinho	150	0,035	6300	4638,72	0,14
Selmi Dei	120	0,0027	6500	4937,40	0,10
Iguatemi	110	0,0023	6800	7022,16	0,06
Rodovia – Pq São Paulo	165	0,003	7200	5563,92	0,10
Total					4,246

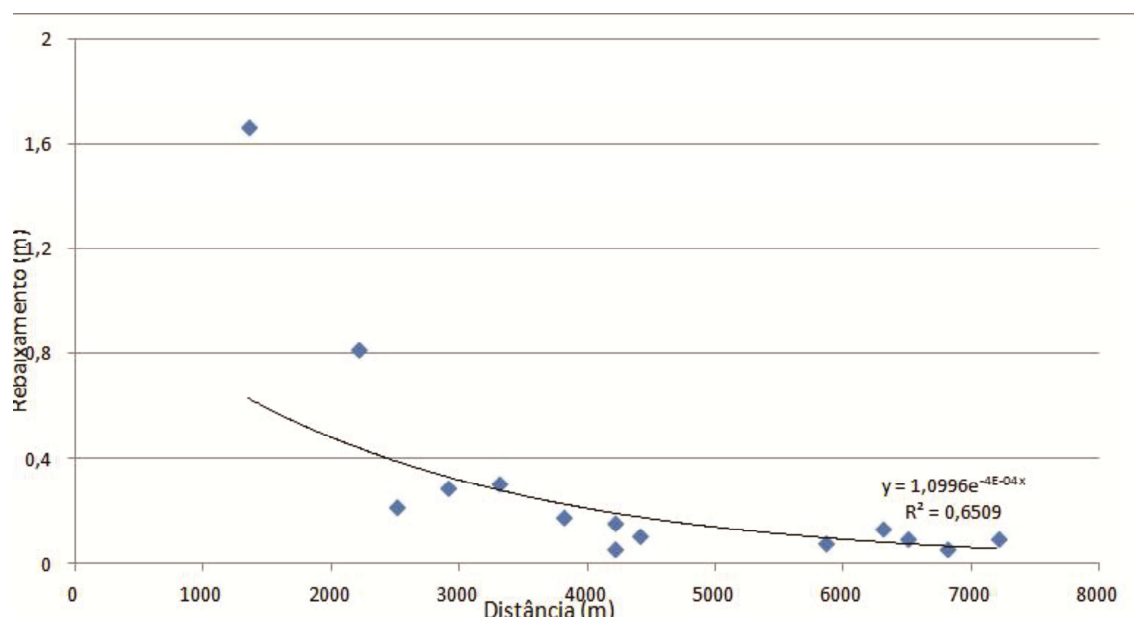


Figura 21 - Gráfico de tendência da relação entre rebaixamento causado e distância do ponto de observação

6.3 Considerações sobre o Rebaixamento Futuro em Araraquara - SP

A gestão do recurso hídrico é um assunto de elevada importância tanto para os órgãos públicos quanto na iniciativa privada. Deste modo a utilização deste recurso deve ser controlada e ações estratégicas devem ser tomadas para a sustentabilidade do modelo de abastecimento. A demanda por água cresce em relação à oferta do recurso e futuramente problemas podem ser encontrados na região, uma vez que metade da população é abastecida com água subterrânea.

Os últimos dados de bombeamentos obtidos junto ao DAEE de Araraquara foram referentes ao ano de 2012, enquanto que as informações levantadas em termos de crescimento populacional datam de 2015, retiradas do site do IBGE.

No município de Araraquara os dados históricos entre 2008 e 2012 indicam que a vazão utilizada para abastecimento cresce aproximadamente 600.000 m³/ano, por outro lado a população, entre 2010 e 2015, cresce em média 3.600 habitantes. A vazão per capita em 2012 (último ano com valores reais adquiridos) era de 94 m³/pessoa/ano.

Na figura 22 é possível evidenciar o crescimento populacional de forma bastante linear durante os anos, entretanto os valores de vazão são bastante variáveis.

Com o intuito de simular cenários futuro, acerca do recurso hídrico, para a área de estudo, foi necessário efetuar projeções com data final em 2020. Inicialmente foram

considerados somente os cinco poços mais próximos ao poço de observação, totalizando 18 metros rebaixados em 5 anos. Como o modelo não prevê entrada de água no sistema, o rebaixamento de poços mais distantes acaba por ser supervalorizado devido ao baixo S e assim foram desconsiderados.

Caso o consumo per capita do recurso se mantenha em 2020, em 94 m³/pessoa/ano, haverá um aumento total de aproximadamente 420.000 m³ no consumo de água da cidade, criando um cenário de aumento no consumo de aproximadamente 1200 m³ por dia. Para suprir esse aumento de demanda o município poderia tomar diferentes medidas estratégicas: aumentar a vazão dos 5 poços em 240 m³ dia, ou perfurar um apenas 1 novo poço, preferencialmente longe dos outros já existentes, minimizando o rebaixamento, e em locais com maiores espessuras da Formação Botucatu, otimizando a produção.

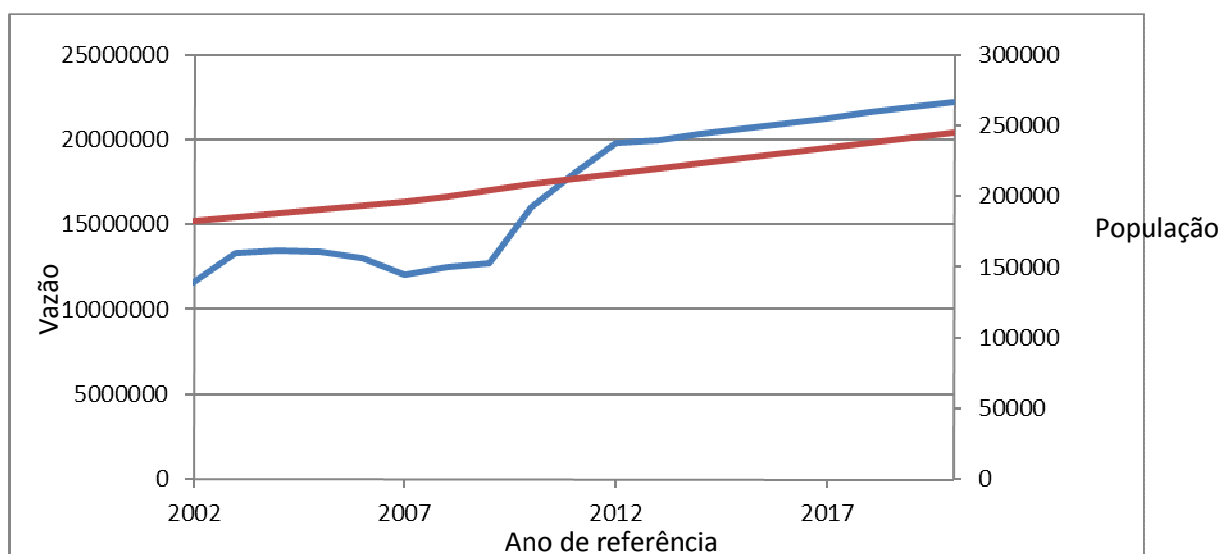


Figura 22 – Projeção linear futura de vazão x população em Araraquara-SP. Linha vermelha representa população e linha azul a vazão de bombeamento.

7. CONCLUSÕES

A avaliação de informações de subsuperfície (descrição de amostras de calha e perfis geofísicos), provenientes da perfuração de poços tubulares que exploram do SAG, permitiu a caracterização do arcabouço geológico de subsuperfície do município de Araraquara. O SAG na região de Araraquara é constituído pelas formações Pirambóia e Botucatu, tendo os basaltos da Formação Serra Geral como camada selante.

A superfície de contato entre as formações Corumbataí e Pirambóia, considerado o substrato impermeável do SAG, é conhecida como a discordância regional mais importante na área de estudo, entretanto nenhum poço alcançou tal profundidade. Deste modo outra superfície de discordância foi evidenciada e selecionada para atuar como *datum* estratigráfico das interpretações de subsuperfície: trata-se do contato entre as formações Pirambóia e Botucatu que, como o restante das camadas, apresenta mergulho de aproximadamente 1° para NE.

A Formação Pirambóia é aflorante apenas no extremo sul do município e possui espessuras entre 60 m e 230 m. Uma vez que nenhum poço atravessou completamente a seção, alcançando a unidade subjacente, a determinação precisa das espessuras totais foi impossibilitada, porém a máxima espessura foi encontrada na porção oeste da área urbana de Araraquara. A sedimentação da unidade obedece a um regime de granocrescência ascendente e o pacote apresenta porosidade média de 24,5%.

A Formação Botucatu por sua vez aflora nas regiões sul e leste do município de Araraquara e apresenta porosidade elevada em relação à Formação Pirambóia, com valor em 33,1%, entretanto existe grande variação na espessura desta unidade. As maiores espessuras se encontram na porção central da área de estudo, enquanto que as de menor, ou ainda inexistentes, ocorrem a extremo oeste e leste. A grande variação na espessura da Formação Botucatu poderia decorrer de processos tectônicos ou, simplesmente, da deposição dos derrames de basalto Serra Geral que preservaram o paleorrelevo. A segunda possibilidade foi considerada mais coerente ao analisar a ausência da Formação Botucatu com a base de dados disponível.

Os derrames de basalto Serra Geral recobrem grande parte da área de estudo, estando ausentes nas porções onde as formações Botucatu e Pirambóia afloram. As espessuras observadas para esta unidade são bastante variáveis, sendo as de maior espessura, entre 210 e 235 metros, encontradas na porção centro-norte da área. As

espessuras dos derrames aumentam em direção NE possivelmente associadas ao preenchimento do paleorrelevo.

A partir da análise dos perfis geofísicos, combinados com descrição de amostras de calha, foram discriminadas 4 hidrofácies: A, B, C e D. Estas unidades foram diferenciadas e segregadas devido ao conteúdo de argila nos pacotes analisados que, por consequência, apresentam diferentes propriedades hidráulicas.

Hidrofácies A, B e C representam variações faciológicas dentro da Formação Pirambóia. A unidade A tem menor porosidade e maior intercalções entre arenitos com matriz argilosa e arenitos finos. A hidrofácies B por outro lado apresenta a maior porosidade vista para a Formação Pirambóia e é constituída por pacotes mais homogêneos de arenitos. A hidrofácies C é constituída por uma delgada camada de rochas pelíticas que evidencia, o caráter argiloso da unidade. O contato superior dessa hidrofácies representa uma discordância bem marcada e que se estende por toda a região de estudo, sendo utilizado como *datum*. Representando a Formação Botucatu foi encontrada a Hidrofácies D, que tem a maior porosidade encontrada para todo o pacote rochoso e, por consequência, tem a melhor condição aquífera.

O rebaixamento observado no poço Odonto foi de 4,5 m durante os 435 dias em que foi monitorado. A linha de tendência do rebaixamento encontrada tem por equação o valor de $7.10^{-6}x + 177,92$ e, portanto, a queda do nível d'água no poço de observação é de aproximadamente 3,67 metros/ano.

O rebaixamento observado no poço-Odonto representa a somatória dos rebaixamentos causados por cada um dos poços ao seu redor. Utilizando a simplificação de Cooper-Jacob foi possível calcular e estimar a contribuição de cada um desses poços no rebaixamento observado. O rebaixamento calculado foi de 4,2 metros, muito próximo ao rebaixamento do poço-Odonto no período e, como esperado, ficou ligeiramente menor que o observado em função da indisponibilidade de dados operacionais de poços particulares existentes na cidade de Araraquara. Constatou-se que os poços mais próximos contribuem de maneira mais significativa para os rebaixamentos observados.

Os valores do coeficiente de armazenamento (S) foram estimados com base em critérios geológicos, considerando a relação entre a profundidade do nível d'água (NA) em um determinado poço e a profundidade da base dos basaltos da Formação Serra Geral no poço. A espessura dos basaltos também foi levada em conta no que tange a compactação da rocha subjacente e, por consequência, variação de S. Portanto quanto

menor o valor de S, maior será o confinamento do aquífero (SAG). O SAG na região encontra-se em situação de semi-confinamento.

As projeções futuras para a demanda de água da cidade foram efetuadas a partir dos 5 poços mais próximos ao poço de observação e indicaram a necessidade um aumento da vazão de bombeamento em aproximadamente 1200 m³ de água por dia até 2020. A cidade de Araraquara poderia intervir de duas formas: aumentar a vazão deles em 240 m³/dia; ou perfurar apenas 1 (um) novo poço nos próximos cinco anos para suprir a demanda. Esse poço deveria ser o mais longe possível dos outros poços e perfurando a maior espessura encontrada da Formação Botucatu.

A cidade de Araraquara, de certa forma já extrai uma quantidade elevada de água subterrânea para o abastecimento público privado. As projeções futuras podem auxiliar na estratégia do modelo de gestão do recurso hídrico, de forma a assessorar o contínuo bombeamento da água dos aquíferos de maneira sustentável.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ALMEIDA F.F.M. - Botucatu: a triassic desert of South America. In: IUGS, International Geological Congress, 19, Argel (Argélia), Comptes Rendus, section 19, fasc. 7, p. 9-24, 1953.

ARAUJO, L.M.; FRANÇA, A.B.; POTER, P.E. Aquífero Gigante do Mercosul no Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai; Mapas Hidrogeológicos das Formações Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones e Tacaurémbo. Mapas, Curitiba: UFPR-Petrobras, 4 mapas, colorido. Escala 1:5.000.000. Texto Explicativo, 16p, 1995.

ASSINE M.L., PIRANHA J.M., CARNEIRO C.D.R. - Os paleodesertos Pirambóia e Botucatu. In: Mantesso Neto V., Bartorelli A., Carneiro C. D. R., Brito Neves B.B. (org.). Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo, Beca, p. 77-92, 2004.

ASSINE, M.L. et al. Os paleodesertos Pirambóia e Botucatú. In: Mantesso Neto, V. et al. (Eds.) Geologia do continente sul-americano - evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo, Brasil: Beca, 2005.

BEDIENT, P. - Chapter 3 Ground Water Flow and Well Mechanics, Civil and Environmental Engineering, Rice University, 2010.

CAETANO-CHANG, M.R., A Formação Pirambóia no centro-leste do estado de São Paulo. Habilitation Thesis, Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Rio Claro, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, 1997

CAETANO-CHANG, M.R., WU, F.T, Arenitos flúvio-eólicos da porção superior da Formação Pirambóia, na porção centro-leste paulista. Rev. Brasil. Geol. 36, 296–304, 2006.

CAMPOS H.C.N.S. Mapa hidrogeológico do Aquífero Guarani, escala 1:2.500.000. Acta Geologica Leopoldensia, XXIII, 2000.

CETESB, Relatório de Qualidade das Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo, 2010-2012, 222 p, São Paulo, 2013.

COOPER, H.H., JACOB, C.E – A Generalized Graphical Method for Evaluating Formation Constants and Summarizing Well Field History, Am. Geophys. Unions Trans, vol. 27, pp. 526-534, 1946.

DAEE, Portal do Departamento de Águas e Energia Elétrica, Disponível em <http://www.hidrologia.daee.sp.gov.br/>, Data de Acesso 08 de Set 2015.

DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA/UNESP - UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO, Mapeamento faciológico do Subgrupo Tubarão. Convênio DAEE-UNESP, Escala 1:50.000, 1980.

DARCY, H. Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon: experience and application. Principes to follow and formulas to be used in question of distribution of water. Appendix D. Victor Dalmont, Imperial Corps of Bridges, Highways and Mines, Paris. Translation by Glenn Brown and Bruno Catani, Oklahoma State University, Stillwater, 1856

ELLIS, D. e SINGER, J. - Well Logging for Earth Scientists, Second Edition, Springer, Dordrecht, Netherlands, 2007.

FETTER, C. W Applied Hydrogeology, Fourth Edition, Editora Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2000.

GASTMANS, D., VEROSLAVSKY, G., CHANG, H.K., CAETANO-CHANG, M.R., NOGUEIRA PRESSINOTTI, M.M., Modelo Hidrogeológico conceptual Del Sistema Acuífero Guarani (SAG): una herramienta para la gestión, Boletín Geológico y Minero, 123 (3): 249-265, 2012.

GASTMANS, D., Hidrogeologia e Hidroquímica do Sistema Aquífero Guarani na Borda Ocidental da Bacia Sedimentar do Paraná. PhD Thesis, Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Rio Claro, Univ. Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, 2007.

GASTMANS, D. REIS, M.M., CHAN, H.K. Geotermometria das águas hipertermais do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Geociências p.208-225, 2012.

GASTMANS, D., CHAN, H.K., HUTCHEON, I. Groundwater geochemical evolution in the northern portion of the Guarani Aquifer System (Brazil) and its relationship to diagenetic features. Applied Geochemistry, 25(1):16-33, 2010.

Gesicki A.L.D. - Evolução diagenética das formações Pirambóia e Botucatu (Sistema Aquífero Guarani) no estado de São Paulo. Tese de Doutorado Instituto de Geociências Universidade de São Paulo São Paulo 175 p, 2007.

GOLDBERG, K.; GARCIA, A. J. V. Paleogeography of the Bauru Group, a Dinosaur-bearing Cretaceous Unity, Northeastern Paraná Basin, Brazil. Cretaceous Research, v. 21, p. 241-254, 2000.

HIRATA, R.; SANGIORGE, M.; WAHNFRIED, I.; LIMA, J. B. V. - Exploração do Sistema Aquífero Guarani em Araraquara, Geologia Série Científica USP, Revista do Instituto de Geociências – USP, São Paulo, v. 12, n. 2, p. 11-127, Agosto 2012.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=350320>>; Data de Acesso: 15 de out 2015.

KRUSEMAN, G. P., RIDDER, N.A.; Analysis and Evaluation of Pumping Test Data, second edition, International Institute of Land Reclamation and Improvement, Wageningen, Netherlands, 1994.

LEBAC. Mapa Hidrogeológico do Sistema Aquífero Guarani. Coord.: SINELLI, O. Equipe: CHANG, H.K.; GASTMANS, D.; PAULA e SILVA, F.; CORREA, S.F.; PRESSINOTTI, M.M.N. Informe Técnico – Consórcio Guarani. Rio Claro, 54p. e 8 mapas. 2008a.

LEBAC. Informe Final - Hidrogeologia do Sistema Aquífero Guarani. Coord.:GASTMANS, D.; CHANG, H.K.Equipe: PAULA e SILVA, F.; CORREA, S.F.; PRESSINOTTI, M.M.N. Informe Técnico – Consórcio Guarani. Rio Claro, 127p. 2008b.

LOBO, G.A.; CAMPOS, J.E.; SANTOS, J.R.; MENDES, J.B. – Variação Piezométrica Sazonal nos Aquíferos Bauru e Guarani no Estado de São Paulo, XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 8 p, Bento Gonçalves – RS, 2013.

MILANI, E.J. Comentários sobre a origem e a evolução tectônica da Bacia do Paraná. In: Mantesso Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C.D.R.; Neves, B.B.B. (Eds.). Geologia do

continente sul-americano - evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo, Brasil: Beca, p.264-279, 2004.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A.; FRANÇA, A. B. *Bacia do Paraná*. In: Boletim de Geociências da Petrobrás, v. 15. p. 265-287, Maio/Nov.2007.

MILANI, E. J. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental. 1997. 2 v. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

PEATE, D.W., HAWKESWORTH C.J., MANTOVANI M.S.M., Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution: Bulletin of Volcanology, 55, 119-139, 1992.

PAULA E SILVA, F, Geologia de Subsuperfície e Hidroestratigrafia do Grupo Bauru no Estado de São Paulo, Tese de Doutorado, Pós Graduação em Geociências, UNESP – Universidade Estadual Paulista – Julio de Mesquita Filho, Rio Claro, 2003.

PAULA E SILVA, F.; CHANG, H. K.; CAETANO-CHANG, M.R. 2005. Hidroestratigrafia do Grupo Bauru (K) no estado de São Paulo. Águas Subterrâneas, São Paulo, v. 19, n. 2, p. 19-36, 2005.

PAULA E SILVA, F.; CHANG, H. K.; CAETANO-CHANG, M.R. Estratigrafia de subsuperfície do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 35, n. 1, p. 77-88, mar.2005.

PAULA E SILVA, F.; CAVAGUTI, N. Nova caracterização estratigráfica e tectônica do Mesozóico na cidade de Bauru - SP. Geociências, Rio Claro, v. 1, p. 83-99, 1994.

PAULA E SILVA, F., CHANG, H. K., CAETANO-CHANG, M. R., SINELLI, O. Arcabouço geológico e hidrofácies do Sistema Aquífero Guarani, no município de Ribeirão Preto (SP). Revista Brasileira de Geociências, 38(1): 56-67, 2008.

PIUCI, J.; CAMPOS, H. Potencial do aquífero Botucatu na região de Araraquara (SP). n: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 1984, Fortaleza. Anais... Fortaleza: ABAS, p. 323-342, 1984.

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

ROSSELLO E.; VEROSLAVSKY, G. de SANTA ANA, H.; FÚLFARO, V.J.; FERNÁNDEZ GARRASINO, C.A. La Dorsal Asunción-Río Grande: Un Alto fondo Regional entre las Cuencas Paraná (Brasil, Paraguay y Uruguay) y Chacoparanense (Argentina). Revista Brasileira de Geociências, v. 36, p. 181-196, 2006.

SANGRAM, H.; HUNT, J.; CHARLESWORTH, D. Modelo Numérico Hidrogeológico Del Área Piloto Ribeirão Preto, SNC Lavalin Internacional, Maio 2008.

SÃO PAULO. DAEE/IG/IPT/CPRM.. Mapa de águas subterrâneas do estado de São Paulo. São Paulo, CPRM, 1 mapa, escala 1:1.000.000., 2005.

SAPRIZA, G.; GASTMANS, D.; SANTOS, J.; FLAQUER, A.; CHANG, K. H.; GUIMARAENS, M.; SILVA, F. P. S. Modelo Numérico de Fluxo do Sistema Aquífero Guarani (SAG) em Área de Afloramentos – Artigas (UY)/Quarai (BR) in *Águas Subterrâneas*, v.25 n.1, p.29-42, 2011.

SCHLUMBERGER - Wireline and Testing, Log Interpretation – Principles/Applications, Seventh printing, Sugar Land, Texas, March, 1989.

SOARES P.C. - Divisão estratigráfica do Mesozóico no Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, 5:229-251, 1975.

SOARES P.C., SINELLI O., PENALVA F., WERNICK E., SOUZA A., CASTRO P.R.M. - Geologia do nordeste do Estado de São Paulo. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 27, Aracaju, *Anais*, v.1, p. 209-236, 1973.

THEIS, C.V. – The Relation Between the Lowering of the Piezometric Surface and the Rate and Duration of Discharge of a Well Using Groundwater Storage, *Am. Geophys. Union Trans*, vol. 16, pp 519-524, 1935.

ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; APPI, V. T.; SANTOS NETO, E. V.; CERQUEIRA, J. R.; MARQUES, A. The Paraná Basin, Brazil. In: LEIGHTON, M. W.; KOLATA, D. R.; OLTZ, D. F.; EIDEL, J. J. (Ed.). Interior cratonic basins. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, p. 681-708. (AAPG. Memoir, 51), 1990.