

ANISOTROPIA E CONFINAMENTO HIDRÁULICO DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI EM RIBEIRÃO PRETO (SP, BRASIL)

Ingo Wahnfried¹, Amélia Fernandes², Ricardo Hirata¹, Carlos Maldaner¹, Claudia Varnier²,
Luciana Ferreira², Mara Iritani², Márcia Pressinotti²

RESUMO

A drenança através de um pacote de 84 m de basalto do Aquitarde Serra Geral (ASG), que recobre o Sistema Aquífero Guarani (SAG), e os parâmetros hidráulicos do SAG foram investigados através de: um teste de bombeamento com 171 h de duração e vazão constante, e testes com uso de traçador, injetado no SAG e no ASG. Os ensaios foram realizados em um conjunto de dois piezômetros multinível e um poço de bombeamento, localizados a sul do Município de Ribeirão Preto (SP). Os resultados indicaram a inexistência de drenança através do basalto. Os dados potenciométricos registrados nos dois piezômetros instalados no SAG, durante o teste de bombeamento, permitiram determinar a existência de anisotropia neste aquífero. Este ensaio determinou uma condutividade hidráulica de $4,6 \times 10^{-1}$ m/d e $7,0 \times 10^{-1}$ m/d, e armazenamento de $1,6 \times 10^{-3}$ e $8,4 \times 10^{-4}$, para os piezômetros PPE-1G e PPE-2G, respectivamente. A relação entre a transmissividade máxima ($T_x=160$ m/d) e mínima ($T_y=103$ m/d) é de 1,55. Os resultados dos testes com traçador, injetado em piezômetros no ASG e no SAG, corroboraram a pouca ou nenhuma drenança no ASG, e determinaram uma condutividade hidráulica de 2,7 a 2,8 m/d e porosidade efetiva entre 18,8 e 20,3%.

ABSTRACT

Leakage through a stack of basalts from the Serra Geral Aquitard (ASG), which overlies the Guarani Aquifer System (SAG), and the hydraulic parameters of the SAG were investigated through: a constant discharge pumping test 171 hours long, and tests using tracers that were injected in SAG and ASG piezometers. The tests were carried out in a group of three wells: two multilevel piezometers and a pumping well, localized south of Ribeirão Preto municipality. The results have indicated the inexistence of leakage through the basalts. The potentiometric data, collected, during the pumping test, in the SAG piezometers, permitted the detection of anisotropy in this aquifer; for the piezometers PPE-1G and PPE-2G, the hydraulic conductivities were $4,6 \times 10^{-1}$ m/d and $7,0 \times 10^{-1}$ m/d, and the storage values were $1,6 \times 10^{-3}$ e $8,4 \times 10^{-4}$, respectively. The proportion between the maximum ($T_x=160$ m/d) and minimum ($T_y=103$ m/d) transmissivity is 1,55. The results of the tracer

¹Ingo Wahnfried, Instituto de Geociências - USP, Rua do Lago, 562, São Paulo, SP, tel. (11) 3091.4804, iwahn@yahoo.com

² Amélia Fernandes, Instituto Geológico, Av. Miguel Stefano, 3900, 04301-903, São Paulo, SP, amelijaif@igeologico.sp.gov.br

tests, injected in the ASG and SAG piezometers, also indicated very little or none leakage through ASG, and indicated hydraulic conductivity of 2,7 to 2,8 m/d and effective porosity between 18,8 and 20,3%.

Palavras-Chave: Sistema Aquífero Guarani, condutividade hidráulica, armazenamento.

1. INTRODUÇÃO

A água do Sistema Aquífero Guarani (SAG) abastece parcial ou totalmente por volta de 500 cidades no Brasil (Foster *et al.* 2004). Entre os centros urbanos totalmente abastecidos por sua água está Ribeirão Preto, com quase 560.000 habitantes (IBGE 2008). A vazão explorada tem reflexo no rebaixamento dos níveis potenciométricos (NP) do SAG na zona urbana do município. Dados históricos dos NP mostram uma queda acentuada a partir da metade da década de 70. Em um dos poços a diferença observada de nível de água entre 1983 e 1997 chega a 40 m (Blöcher, 2004). Isto faz com que o nível potenciométrico do SAG fique abaixo daquele observado para o Aquitarde Serra Geral (ASG), invertendo a tendência natural de fluxo entre as unidades para descendente, o que aumenta o risco de contaminação por atividades antrópicas (Iritani *et al.* 2004). Iritani (2004) detectou concentrações elevadas de nitrato e cloreto em poços no SAG dentro da área urbana de Ribeirão Preto, e concluiu que a contaminação poderia ocorrer de duas formas: fraturas transmissivas nos basaltos ou poços abandonados. Gallo & Sinelli (1980) já haviam sugerido a existência de zonas altamente fraturadas no basalto na região, passíveis de permitirem a recarga do SAG.

O trabalho aqui apresentado insere-se no projeto FRATASG (a Formação Serra Geral como conexão hidráulica entre a superfície e o SAG), cujo objetivo principal foi verificar a existência de recarga do SAG através do ASG, em região onde os arenitos estão sotopostos a até 100 m de basaltos da Formação Serra Geral, através de levantamentos geológicos, geofísicos e hidrogeológicos. Os principais objetivos do presente trabalho foram testar a existência de recarga e determinar com precisão os parâmetros hidráulicos do aquífero sedimentar. Foram usados dois métodos: um teste de bombeamento de vazão constante com duração de 171 horas, e um teste de injeção de traçador com gradiente forçado, com duração de 288 horas, ambos realizados em um local com um poço de bombeamento desativado e dois piezômetros multi-nível, abertos no SAG e no ASG, construídos com este fim. Para o teste de vazão constante foi planejado um longo tempo de bombeamento para que o cone de rebaixamento atingisse grandes dimensões, aumentando as chances de este interceptar fraturas verticais no basalto que pudessem gerar drenança. A injeção do traçador fluoresceína sódica (uranina), foi realizada em dois pontos: um piezômetro no SAG, e um no ASG, enquanto o gradiente foi mantido constante através de bombeamento no poço de produção. A medição da concentração do traçador foi feita nas amostras de água retiradas deste ponto.

2. LOCALIZAÇÃO E CONTEXTO GEOLÓGICO

O local onde foi realizado o teste de bombeamento fica no Distrito de Bonfim Paulista, 9 km ao sul do centro da cidade de Ribeirão Preto, nordeste do Estado de São Paulo. As coordenadas UTM do poço de bombeamento são 23K 211284 m E, e 7646692 m S (Figura 1). A região de Ribeirão Preto está localizada na borda leste da Bacia do Paraná, onde ocorre a transição entre as porções aflorante do Sistema Aquífero Guarani (SAG), e a porção confinada pela Formação Serra Geral. O SAG é composto pelas formações Botucatu e Pirambóia no local. O poço testado atravessa somente uma parte da primeira formação, constituída predominantemente por arenitos com estratificações cruzadas, planar ou acanalada, de médio a grande porte, originadas em campos de dunas eólicas. Há raras intercalações de arenitos com estratificações plano paralelas associadas a interdunas secas (Assine *et al.* 2004). Os argilitos e arenitos da Formação Corumbataí, descritos por Matos (1995), delimitam o SAG em sua porção inferior.

Mapeamento de detalhe realizado na região de interesse realizado por Fernandes *et al.* (2010) identificou a existência de 4 derrames de basaltos, denominados, da base para o topo, de B1 (diretamente superposto aos arenitos Botucatu), B2, B3 e B4. B1 e B2 apresentam espessura de 40 a 60 m e B3, de 80 a 100 m, sendo que B4 foi em grande parte erodido; arenitos intertrappe ocorrem descontinuamente entre B1 e B2 e entre B2 B3. No local do teste de bombeamento, ocorrem apenas B1, com 48 m de espessura, contendo 25 m de nível vesicular no topo, e B2, parcialmente erodido, com 45 m, sobreposto por 8 m de solo e rocha muito alterada.

1. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Campo de poços Esmeralda

A área de estudo localiza-se fora da zona de influência do cone de rebaixamento existente na mancha urbana de Ribeirão Preto. Estudos para entendimento da geometria do aquífero, do aquitarde e investigar a presença de possíveis zonas de fraturas tectônicas no basalto, precederam a escolha do poço a ser usado. Estes estudos incluíram levantamentos geofísicos (sondagens elétricas verticais, caminhamentos elétricos e método áudio magneto-telúrico com fonte controlada - CSAMT), descrição de afloramentos e levantamento de informações de poços existentes.

Para a realização do teste de bombeamento, foi escolhido um poço de produção desativado, distante de outros poços que exploram o SAG, denominado Poço Esmeralda (PE), com 152 m de profundidade. Com o objetivo de conhecer o perfil construtivo do poço e de verificar o seu estado de conservação, foi realizada filmagem das paredes do poço e, posteriormente, a sua limpeza. A turbidez da água impediu a filmagem abaixo de 112 m de profundidade, de modo que apenas a localização e extensão da primeira seção filtrante é conhecida. A restante foi inferida com base em

informações verbais do proprietário, que acompanhou a sua perfuração. A posição dos filtros também permitiu inferir que a espessura de basalto se estende, aproximadamente, até a profundidade de 95 m.

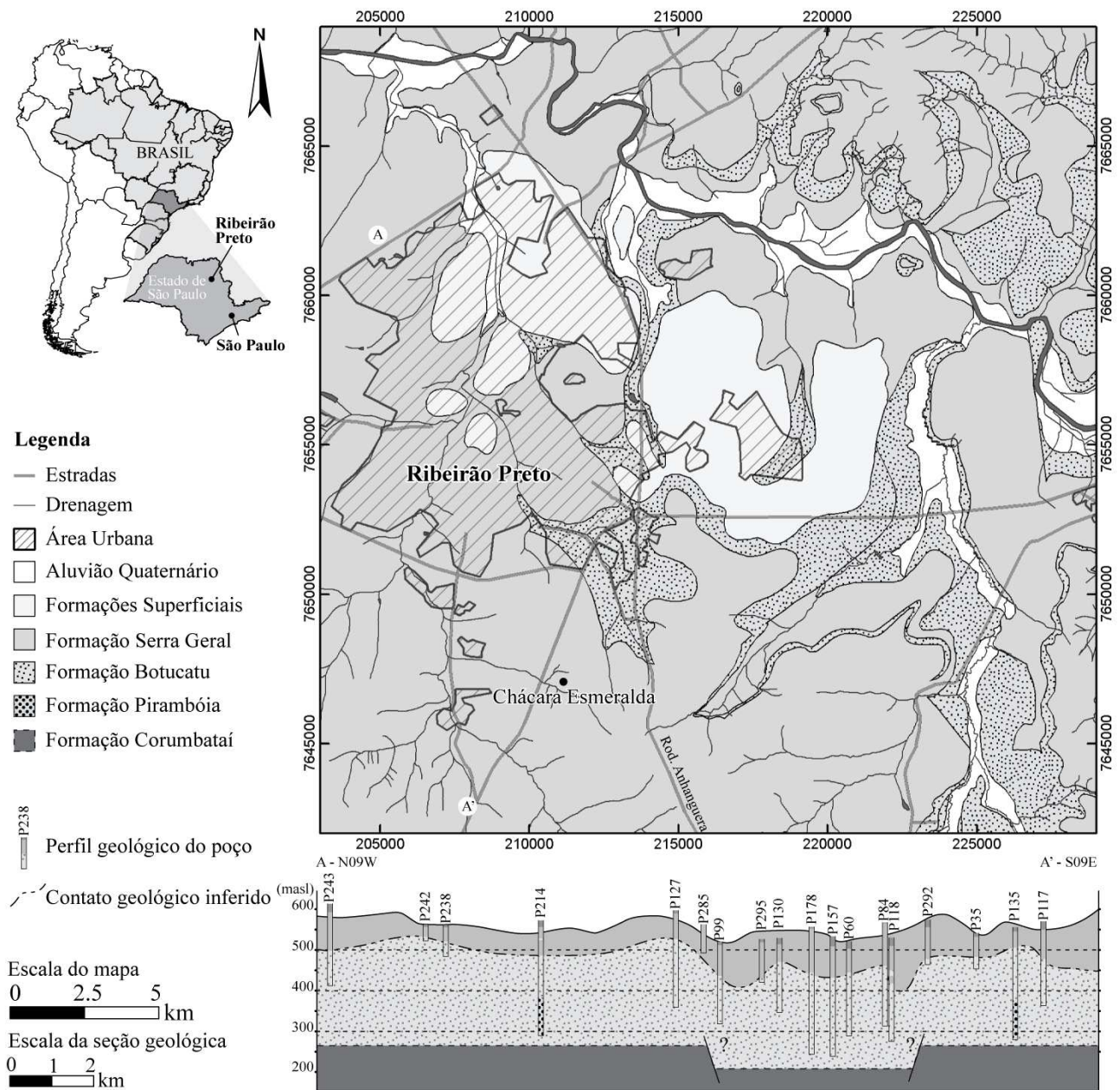


Figura 1. Localização do município de Ribeirão Preto e municípios limítrofes, com informações geológicas e perfil executado com base em informações de poços (modificado de Fernandes *et al.* 2010).

Próximo ao PE foram construídos dois poços piezômetros multinível, PPE-1 e PPE-2, a distâncias de 15,0 e 22,2 m, com relação ao PE, respectivamente; seu posicionamento permitiu investigar as propriedades do aquífero em diferentes direções (Figura 2). Foram construídos a distâncias curtas com relação ao PE para reduzir o tempo de duração dos testes com traçador, e aumentar a chance de haver reflexo do cone de rebaixamento no SAG na potenciometria do ASG. O

método usado para a construção dos piezômetros foi o rotopercussivo. Em ambos a perfuração foi interrompida antes de alcançar o SAG para a realização de perfilagem acústica (BHTV), com o intuito de localizar e determinar a atitude das fraturas existentes no basalto. A informação foi usada para definir o comprimento e localização da seção filtrante dos piezômetros no ASG. Após as perfilagens os poços foram aprofundados para dentro do SAG, ainda com sondas rotopercussivas. Como neste método não é usada lama de perfuração, as paredes do furo no arenito colapsaram, reduzindo a penetração dos piezômetros no SAG, sobretudo no PPE-1. Após a inserção dos tubos de PVC geomecânico de 2” que constituem os piezômetros, foi colocado pré-filtro, preenchendo o espaço restante dentro da Formação Botucatu. Selos de bentonita foram utilizados para isolar os piezômetros do SAG daqueles do ASG. O topo dos selos foi posicionado de modo a não obstruir as fraturas do basalto observadas nas perfilagens acústicas, e possuem espessura de 5 m no PPE-1 e de 8 m no PPE-2 (Figura 3).

Próximo ao PE foram construídos dois poços piezômetros multinível, PPE-1 e PPE-2, a distâncias de 15,0 e 22,2 m, com relação ao PE, respectivamente; seu posicionamento permitiu investigar as propriedades do aquífero em diferentes direções (Figura 2). Foram construídos a distâncias curtas com relação ao PE para reduzir o tempo de duração dos testes com traçador, e aumentar a chance de haver reflexo do cone de rebaixamento no SAG na potenciometria do ASG. O método usado para a construção dos piezômetros foi o rotopercussivo. Em ambos a perfuração foi interrompida antes de alcançar o SAG para a realização de perfilagem acústica (BHTV), com o intuito de localizar e determinar a atitude das fraturas existentes no basalto. A informação foi usada para definir o comprimento e localização da seção filtrante dos piezômetros no ASG. Após as perfilagens os poços foram aprofundados para dentro do SAG, ainda com sondas rotopercussivas. Como neste método não é usada lama de perfuração, as paredes do furo no arenito colapsaram, reduzindo a penetração dos piezômetros no SAG, sobretudo no PPE-1. Após a inserção dos tubos de PVC geomecânico de 2” que constituem os piezômetros, foi colocado pré-filtro, preenchendo o espaço restante dentro da Formação Botucatu. Selos de bentonita foram utilizados para isolar os piezômetros do SAG daqueles do ASG. O topo dos selos foi posicionado de modo a não obstruir as fraturas do basalto observadas nas perfilagens acústicas, e possuem espessura de 5 m no PPE-1 e de 8 m no PPE-2 (Figura 3).

Também foram construídos dois piezômetros rasos ao lado do Poço Esmeralda, denominados PME-1 e PME-2, com 4,0 e 5,4 m de profundidade, respectivamente, para monitorar o nível freático na camada de solo e basalto intemperizado. Os dados construtivos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Dados construtivos do poço Esmeralda (PE), poços com piezômetros (PPE1 e PPE2), e dos poços de monitoramento do aquífero freático (PME1 e PME2). Todas as profundidades são medidas a partir da boca dos respectivos tubos.

	PE	PPE-1	PPE-2	PME-1	PME-2
Profundidade total (m)	152	B ¹ = 88,0 G ¹ = 98,5	B ¹ = 92,6 G ¹ = 102,8	4,0	5,4
Diâmetro do tubo de revestimento (pol.)	6	2 (poço: 6)	2 (poço: 8)	1	1
Extensão do filtro (m)	46 ²	B ¹ = 2, G ¹ = 2	B ¹ = 2, G ¹ = 2	1	1
Espessura de solo (m)	ND	15	16	-	-
Espessura de basalto (m)	ND	82	84	-	-
Penetração no SAG (m)	56 ²	0,6	2,1	-	-

¹ B=piezômetro no basalto, G=piezômetro no Guarani.

² Estimado com base na filmagem e em informações fornecidas pelo proprietário.

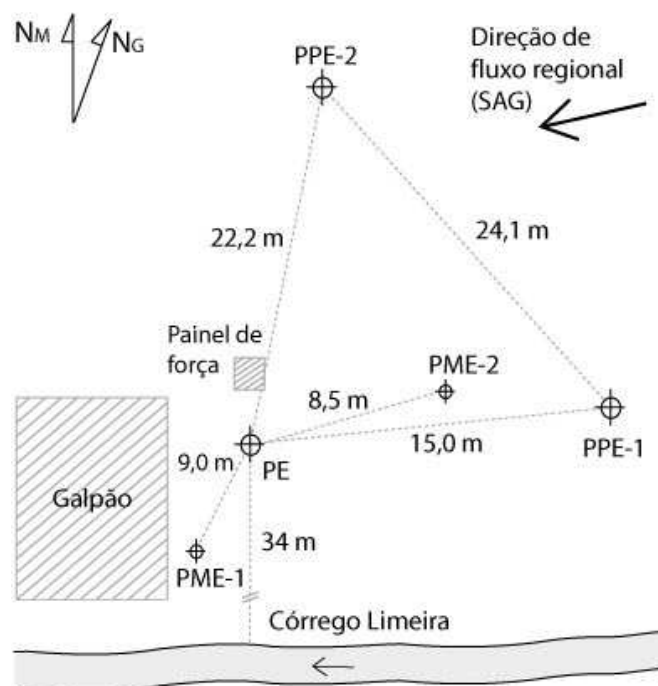


Figura 2. Localização do poço e piezômetros na Chácara Esmeralda.

3.2 Execução do teste de bombeamento

Durante o teste de bombeamento, as medições de nível dinâmico foram realizadas em todos os pontos disponíveis (PE, PPE-1B e G, PPE-2B e G, PME-1 e 2). No PE a medição foi feita através de um transmissor de pressão da marca Druck, modelo PTX-1830, com fundo de escala de 30 m de coluna d'água, conectado a um registrador de dados da marca Campbell, modelo CR-10X. As medições em todos os piezômetros foram feitas manualmente, usando dois medidores de nível da marca Heron, de 100 e 200 m de comprimento, e um da marca Hidrosuprimentos, de 100 m. No início as medições foram feitas com alta frequência, diminuindo com o avanço do teste.

A bomba (marca Leão, modelo 22TR+EP5-10) estava posicionada a 114 m de profundidade a partir da boca do PE. Para medir a vazão foi usado um orifício calibrado de 2", montado em tubo de 2 1/2". A água bombeada foi direcionada para uma caixa d'água de 1000 l, e desta para o Córrego Limeira, a aproximadamente 40 m do local bombeado. Antes do início do teste de vazão constante

foi realizado um bombeamento escalonado para determinar a vazão ideal, de aproximadamente 29 m³/h.

3.3 Execução dos testes com traçador

Os testes com traçador fluorescente tiveram por objetivo determinar a existência de drenança através da Formação Serra Geral, e obter a porosidade efetiva e a condutividade hidráulica do Sistema Aquífero Guarani (SAG). Em ambos os ensaios foi usado o traçador fluoresceína sódica (uranina), injetado no piezômetro PPE-1G para o teste no Guarani (teste F/G), e no PPE-1B para o teste da conexão através do basalto (teste F/B).

O bombeamento e coleta de amostras foram realizados no Poço Esmeralda (PE). Para garantir um estado quasi-estacionário do nível d'água durante a execução dos testes, a primeira injeção (F/G) foi realizada 53 h após o início do bombeamento, e a segunda (F/B), uma hora depois desta. No teste F/G foram inseridos 2 l de uma solução com concentração de 500 mg/l de fluoresceína através de mangueira com abertura na altura do filtro do piezômetro, a 97 m de profundidade. Em seguida foi feito enxágue com 4 l de água do Guarani, volume que deveria ser suficiente para forçar a solução para fora do piezômetro. Porém uma amostra de água do piezômetro PPE-1G, coletada 42 h após a injeção, apresentava concentração muito elevada de fluoresceína, a ponto de ser visível a olho nu, indicando que o traçador não havia entrado no aquífero. Optou-se por fazer um novo enxágue, com 500 l de água do poço de bombeamento, exatamente 43 h após a tentativa de injeção, resultando na entrada efetiva do traçador no aquífero. Este foi, portanto, considerado como o início real do teste, e a partir deste momento a sua duração foi de 288 h.

A injeção de fluoresceína no basalto (teste F/B) também foi feita através de mangueira, com abertura posicionada em frente ao filtro do piezômetro PPE-1B, ou seja, a 87 m de profundidade. Foram inseridos 2 l de solução com concentração de 250 mg/l, e em seguida foi feito enxágue com 6 l de água limpa do Guarani. Assim como em F/G, a quantidade não foi suficiente para forçar a solução para fora do piezômetro, e novamente após 43 h após esta injeção foi feito um enxágue com aproximadamente 400 l de água extraída do poço Esmeralda, sendo este considerado o momento inicial real do teste.

Amostras de água coletadas antes da injeção do corante foram usadas como branco para a calibração do fluorímetro, usado para a leitura da concentração. O intervalo de tempo inicial entre cada coleta foi de 30 minutos, aumentando com o avanço do bombeamento, até chegar a 8 h. Houve algumas interrupções no bombeamento por falha no fornecimento de energia. Após cada desligamento a frequência de coletas foi maior, para possibilitar a detecção de possíveis variações na chegada do traçador.

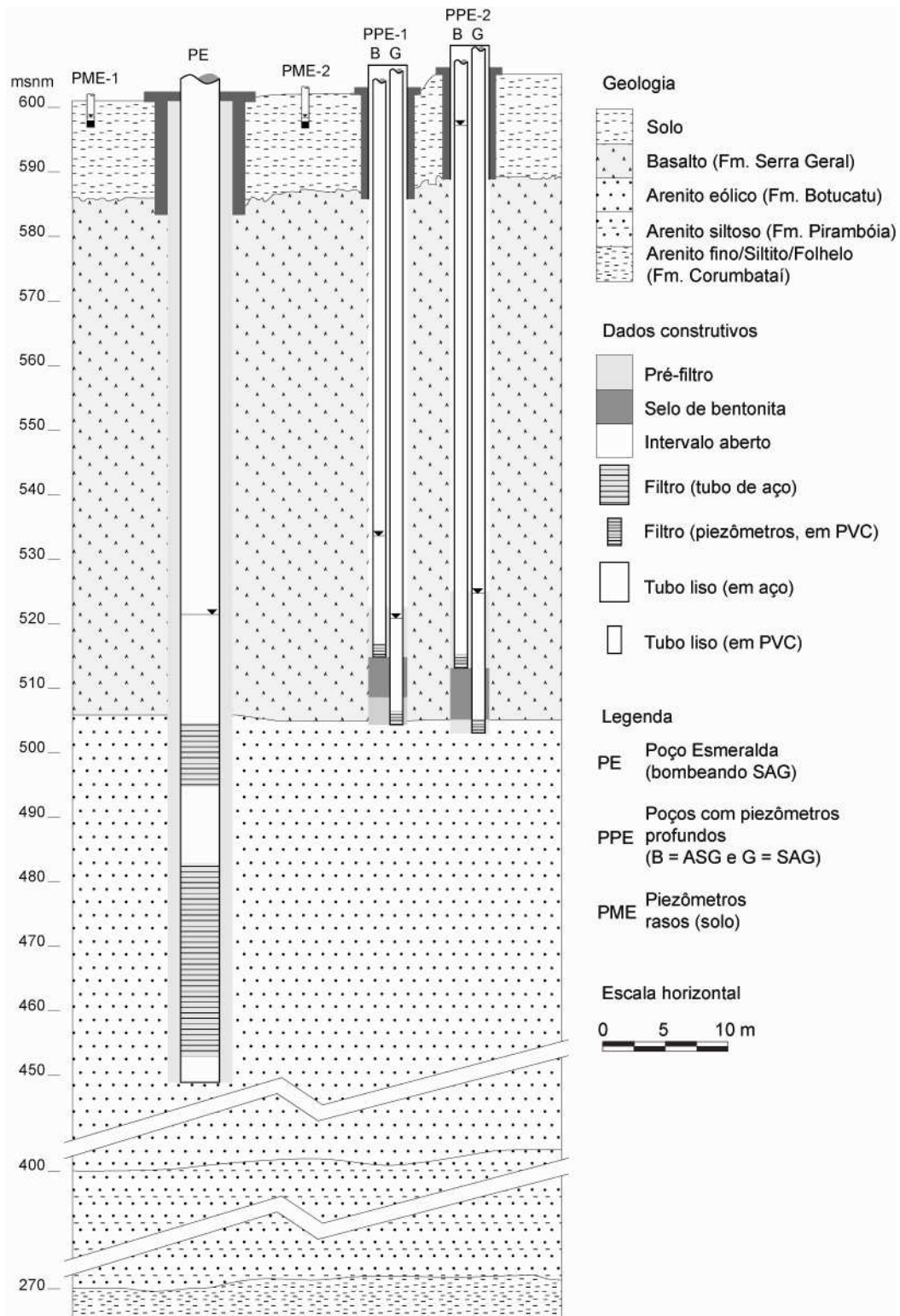


Figura 3. Perfis construtivos dos piezômetros e poço na Chácara Esmeralda.

A avaliação das concentrações do traçador nas amostras foi feita no campo, em local climatizado, para impedir influência da variação da temperatura. Foi usado um fluorímetro da marca Turner Designs, modelo TD-700. As amostras foram acondicionadas em frascos plásticos de 100 ml, envoltos em papel alumínio e colocados dentro de uma caixa de isopor forrada com um saco plástico preto, para garantir proteção contra luz e diminuir a exposição às grandes variações térmicas, típicas do local. Devido à baixa concentração de traçador, foi necessário elevar o pH para

aproximadamente 9, um volume muito pequeno (entre 0,2 e 0,5 ml) de solução de alta concentração de NaOH (1M), impedindo que houvesse diluição do traçador nas amostras.

2. RESULTADOS

4.1 Teste de bombeamento: método para aquífero isotrópico bombeado por poço parcialmente penetrante

Os dados de rebaixamento em função de tempo obtidos com o teste não se ajustam à curva-tipo de Theis devido à penetração parcial do poço de bombeamento. O Poço Esmeralda (PE) possui aproximadamente 46 m de filtros, e o Sistema Aquífero Guarani (SAG) deve ter aproximadamente 230 m de espessura no local (Massoli 2007). Por esta razão foi usado o método de Hantush (Hantush, 1961a e 1961b), uma adaptação do método de Theis para poços não penetrantes, em aquíferos confinados e isotrópicos.

Durante o teste de vazão constante, após 16 h de bombeamento, houve uma interrupção no fornecimento de energia elétrica, que durou aproximadamente 15 min. Isto causou uma recuperação perceptível no PE, porém menos acentuada nos piezômetros no Guarani: 0,14 m no PPE-1G e 0,09 m no PPE-2G (Figura 4). Não houve, portanto, influencia nos resultados.

Fica evidente, no gráfico apresentado na Figura 4, que não há estabilização do nível dinâmico no tempo final de bombeamento, indicando que o cone de rebaixamento ainda estava em expansão após 171 h de bombeamento. Isto comprova que, caso exista drenança no local, ela ainda não foi suficiente para equilibrar o volume bombeado. Dado o longo tempo de duração do teste, é possível afirmar que a drenança é extremamente reduzida, ou inexistente. Interpretando os dados pelo método de Hantush, são obtidos os parâmetros apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros hidráulicos obtidos pelo método de Hantush, para poço parcialmente penetrante em aquíferos isotrópicos.

Piezômetro	K (m/d)	T ⁽¹⁾ (m ² /d)	S _s (1/m)	S ⁽¹⁾ (adim.)
PPE-1G	4,4x10 ⁻¹	1,02x10 ²	7,0x10 ⁻⁶	1,6x10 ⁻³
PPE-2G	6,8x10 ⁻¹	1,55x10 ²	3,7x10 ⁻⁶	8,4x10 ⁻⁴

¹Obtidos com base em espessura do SAG de 230 m.

Existe uma diferença de menos de meia ordem de magnitude entre os valores de condutividade hidráulica obtidos para cada piezômetro. A diferença entre a inclinação das curvas de rebaixamento indica que realmente há diferença de K dependendo da direção. A direção com maior condutividade tem maior rebaixamento por oferecer menor resistência à passagem da água. Há, portanto uma evidência de anisotropia ou heterogeneidade, ou mesmo ambas, no SAG neste local.

O teste foi iniciado dois dias após o término da construção dos piezômetros, e a recuperação completa de seus níveis d'água ocorreu mais de duas semanas após o final das obras. Os NA

estáveis no basalto apresentaram diferença de carga hidráulica para o SAG de aproximadamente 12 m no PPE-1 e 77 m no PPE-2.

4.2 Reavaliação dos resultados do bombeamento: aquífero anisotrópico

Diferentes autores descreveram a existência de anisotropia em arenitos de origem eólica. Lindquist (1988), analisando os sedimentos da Formação Nugget, nos Estados Unidos, determinou que a direção de maior permeabilidade é horizontal, paralela às estratificações cruzadas, e a de permeabilidade menor é ortogonal às estratificações (Figura 5). Van den Berg & de Vries (2003) realizaram uma sequência detalhada de ensaios em várias fácies associadas a dunas na Holanda, usando diferentes métodos como permeâmetros, análise granulométrica e simulação de fluxo por análise de imagens de seções delgadas dos sedimentos. Na fácies associada a dunas eólicas também determinaram a existência de anisotropia.

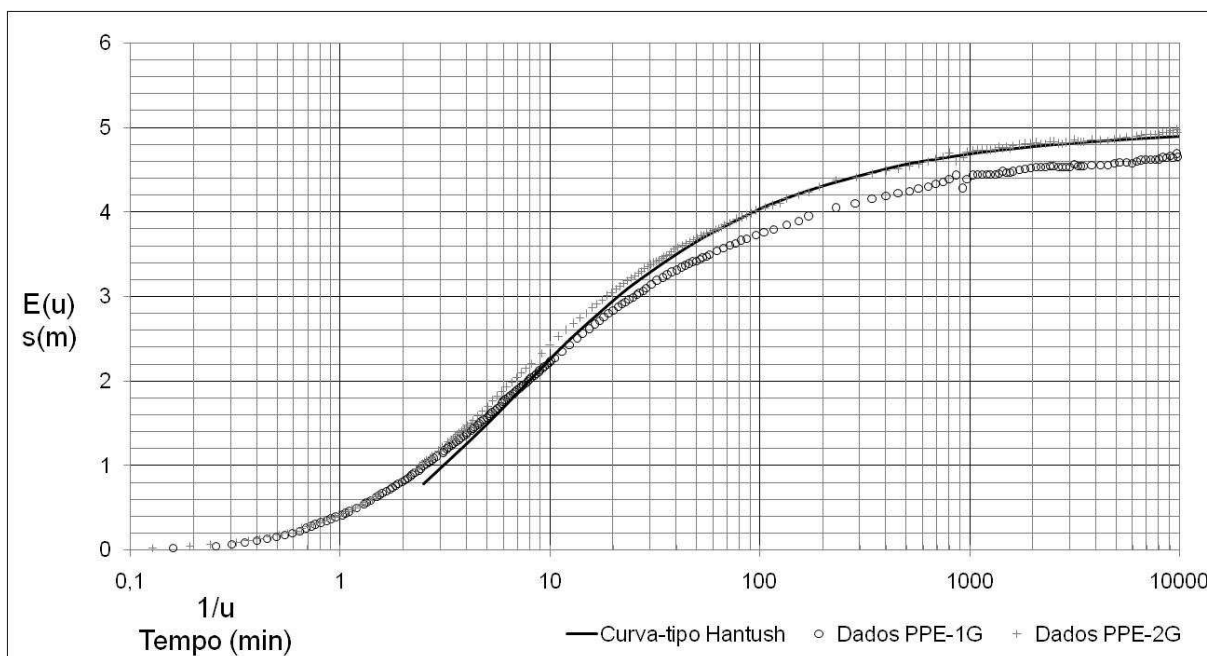


Figura 4. Curva-tipo de Hantush (correção para penetração parcial), com ajuste feito para os dados do piezômetro PPE-2G. O gráfico mono-logarítmico ressalta a diferença entre os dados de cada piezômetro. Existe um bom ajuste dos dados no tempo inicial de bombeamento, excluindo o tempo de restrição imposto pelo método (60 min. para o PPE-2G, e 234 min. para o PPE-1G). A ausência de dados entre 2 e 3 min. de bombeamento para o PPE-2G se deve a uma falha na anotação das medidas, e a oscilação do nível d'água aos 900 min. foi causada por falha no fornecimento de energia por aproximadamente 15 min.

Existem diversas descrições das estruturas sedimentares da Formação Botucatu. O trabalho de maior detalhe realizado para a região de Ribeirão Preto é o de Massoli (2007). O autor encontrou, em afloramento da Formação Botucatu a 70 km de Ribeirão Preto, estratificações cruzadas tabulares de grande porte sobrepostas por arenitos com estratificações cruzadas acanaladas, também de grande porte. São, portanto, rochas análogas àquelas testadas por Lindquist (1988).

Além da anisotropia, a diferença de condutividade hidráulica poderia ser causada por heterogeneidade na rocha. Durante a perfuração dos piezômetros na Chácara Esmeralda foi observada uma maior cimentação do arenito Botucatu no PPE-2G, fato que poderia reduzir localmente a condutividade hidráulica (K). Os resultados do teste de bombeamento indicam o oposto: a direção do PPE-1G possui menor K. Desta forma não se pode atribuir a diferença à heterogeneidade causada pela cimentação da rocha.

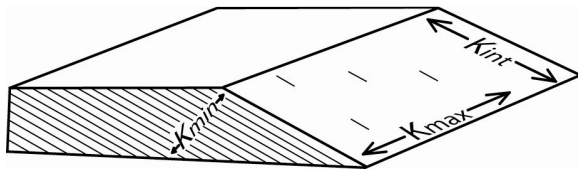


Figura 5. Distribuição das orientações de condutividade hidráulica, máxima, intermediária e mínima com relação aos planos de estratificação de paleodunas eólicas (adaptado de Lindquist, 1988).

Existem diversos métodos para corrigir os dados do teste de bombeamento para levar em conta existência de anisotropia. Para todos é necessário conhecer as direções de máxima e mínima condutividades hidráulicas, ou ter dados de pelo menos três piezômetros localizados em direções distintas com relação ao poço de bombeamento. Na Chácara Esmeralda só existem dois piezômetros, e não há informação geológica suficientemente detalhada para definir a orientação do elipsóide de condutividade hidráulica com base na estrutura dos sedimentos. A solução encontrada foi inferir indiretamente esta direção, definindo valores máximos de anisotropia para sedimentos de origem eólica, análogos ao arenito Botucatu. As características geológicas impõem um limite para as condutividades hidráulicas possíveis. Os valores de anisotropia entre o $K_{\text{mín.}}$ e $K_{\text{máx.}}$ obtidos por Van den Berg & de Vries (2003) na fácies eólica, com alto grau de arredondamento e boa seleção dos grãos, foi de até 1,45. Lindquist (1988) obteve uma permeabilidade horizontal (k_h) de 137 mD (mili Darcies), e vertical de 200 mD em estruturas de fluxo de grãos de paleodunas eólicas, sem influência de deposição subaquosa ou superfícies erosivas. Isto representa uma anisotropia de 1,46 (k_h/k_v). Estes valores pautaram a reavaliação dos resultados dos testes aqui apresentados.

Interpolando linearmente as cotas de nível dinâmico entre os piezômetros e o Poço Esmeralda (PE), registrados após 169 h de bombeamento, é possível desenhar os contornos das equipotenciais, descrevendo o cone de rebaixamento. A relação entre os eixos da elipse é proporcional à relação entre as condutividades hidráulicas nas direções dos eixos. Se a relação não é conhecida, a elipse pode assumir qualquer direção. O fato é ilustrado na Figura 6, na qual uma equipotencial arbitrária (de 85 m) foi interpolada entre os piezômetros e o poço de bombeamento na Chácara Esmeralda, com 169 h de bombeamento.

A menor diferença entre os eixos de máxima e mínima condutividade hidráulica ocorre quando a elipse tem o eixo x alinhado com o piezômetro PPE-2. Por esta razão, foi o primeiro ângulo de orientação usado para aplicar a correção dos dados do teste de bombeamento.

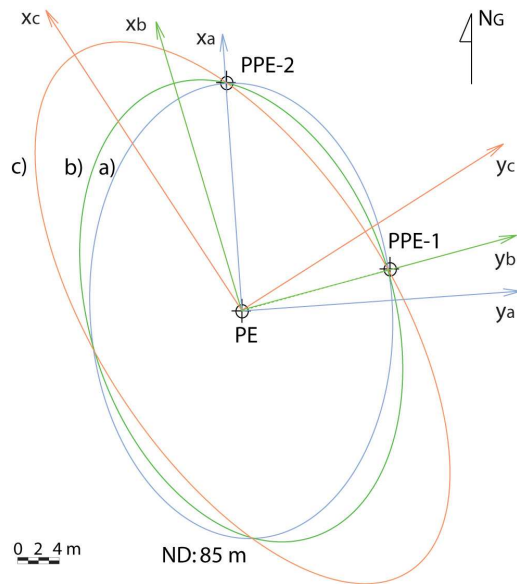


Figura 6. A equipotencial de 85 m, após 169 h de bombeamento, tem a forma de uma elipse por causa da anisotropia. A relação entre os eixos x e y da elipse varia em função da sua orientação. Na figura são apresentados três direções arbitrárias possíveis, a, b e c, das quais a primeira possui a menor correlação x/y, representando, como consequência, a menor anisotropia.

O método usado foi o de Hantush (1966), para aquíferos confinados e anisotrópicos no plano horizontal. Baseando-se na equação de Theis, o autor determinou que o rebaixamento em um aquífero confinado é descrito por (Kruseman & de Ridder, 1991):

$$s = \frac{Q}{4\pi T_e} W(u_{xy}) \quad (1)$$

$$u_{xy} = \frac{r^2 S}{4tT_n} \quad (2)$$

$$T_e = \sqrt{T_x \times T_y} \quad (3)$$

$$T_n = \frac{T_x}{\cos^2(\theta + \alpha_n) + m \sin^2(\theta + \alpha_n)} \quad (4)$$

$$m = \frac{a_n \cos^2 \theta - \cos^2(\theta + \alpha_n)}{\sin^2(\theta + \alpha_n) - a_n \sin^2 \theta} \quad (5)$$

$$m = \frac{T_x}{T_y} = \left(\frac{T_e}{T_y} \right)^2 \quad (6)$$

$$a_n = \frac{T_1}{T_n} \quad (7)$$

$$T_e = (T_1 + T_2)/2 \quad (8)$$

Onde:

s = rebaixamento (C)

S = armazenamento (adimensional)

Q = vazão (C³/T)

r = distância do piezômetro ao poço de bombeamento (C)
 t = tempo de bombeamento (T)
 α_n, θ = ver Figura 7
 $W(u_{xy})$ = função do poço para aquífero anisotrópico
 T_e = transmissividade efetiva (C^2/T)
 T_x = transmissividade na direção de maior condutividade hidráulica (C^2/T)
 T_y = transmissividade na direção de menor condutividade hidráulica (C^2/T)
 T_n = transmissividade na direção com ângulo ($q+a$) em relação ao eixo x (C^2/T) (Fig. 7)
 Sendo: C – unidade de comprimento; T – unidade de tempo.

Hantush (1966) menciona que a transmissividade efetiva (T_e) deve ser obtida aplicando-se métodos de interpretação comuns, que é então corrigida para considerar a existência de anisotropia. O autor ressalta que a T_e deve ser semelhante para os dados de todos os piezômetros, independente de sua direção em relação ao poço de bombeamento, e mostra um exemplo no qual considera uma diferença de 1/3 nos valores de transmissividade como sendo admissível. E nestes casos afirma que o valor de T_e a ser usado é a média dos valores calculados para os diferentes piezômetros. Na Chácara Esmeralda a diferença encontrada é próxima àquela considerada aceitável por Hantush (1966): 1/2.

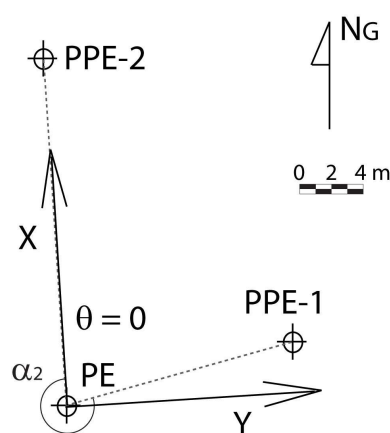


Figura 7. Ângulos adotados para aplicar o método de Hantush (1966).

Para a interpretação dos dados são consideradas as seguintes direções de transmissividades:

- T_x = transmissividade em direção paralela à superfície de deposição das paleodunas, que é a de maior K.
- T_y = transmissividade em direção perpendicular à superfície de deposição das paleodunas, que é a de menor K.
- T_1 = transmissividade na direção do piezômetro PPE-2, com ângulo q em relação ao eixo X (vide Tabela 2).
- T_2 = transmissividade na direção do piezômetro PPE-1, com ângulo $\theta + \alpha$ em relação ao eixo X (vide Tabela 2).

A transmissividade efetiva T_e obtida é de 128,5 m²/d. Aplicando a equação (7) com os valores de transmissividade obtidos através do método para aquíferos isotrópicos, obtém-se o valor de α_2 . Substituindo este valor, e os valores dos ângulos θ e α_2 na equação (5), obtém-se $m = 1,55$. Conhecendo m , obtém-se T_y e T_x usando a equação (6). Como na situação proposta o eixo x da elipse de condutividade hidráulica (e conseqüentemente de transmissividade) está alinhado à direção do piezômetro PPE-2, conclui-se que $T_x = T_1$, e T_2 pode ser recalculado: $T_1 = 160$ m²/d e $T_2 = 105$ m²/d. Os parâmetros hidráulicos corrigidos para a presença de anisotropia são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros hidráulicos recalculados para o SAG a partir da interpretação dos dados levando em conta a existência de anisotropia, e comparação com os resultados obtidos sem considerar a existência de anisotropia.

Aquífero	Direção	K (m/d)	T (m ² /d)	Ss (1/m)	S (adim.)
Anisotrópico	PPE-1G	4,6x10 ⁻¹ *	1,05x10 ²	7,0x10 ⁻⁶	1,6x10 ⁻³
	Y (K _{min})	4,5x10 ⁻¹ *	1,03x10 ²	ND**	ND**
	PPE-2G = X (K _{máx})	7,0x10 ⁻¹ *	1,60x10 ²	3,7x10 ⁻⁶	8,4x10 ⁻⁴
Isotrópico	PPE-1G	4,4x10 ⁻¹	1,02x10 ² *	7,0x10 ⁻⁶	1,6x10 ⁻³
	PPE-2G	6,8x10 ⁻¹	1,55x10 ² *	3,7x10 ⁻⁶	8,4x10 ⁻⁴

*Obtidos com base em espessura do SAG de 230 m.

** Não definidos: o armazenamento só pode ser calculado nas direções dos piezômetros.

O valor de m é a relação entre os extremos de transmissividade do aquífero. Caso tivesse sido usado um valor de θ diferente de 0°, o m obtido teria sido ainda maior, como demonstrado na Figura 6. O valor de 1,55 já é um pouco superior aos valores obtidos nos trabalhos de Lindquist (1988) e Van den Berg & de Vries (2003), respectivamente de 1,45 e 1,46, indicando que a orientação escolhida para a elipsóide de anisotropia, com o eixo x alinhado ao PPE-2, é a mais provável. Qualquer outra resultaria em um m maior. A diferença entre o valor de m apresentado aqui com relação aos autores mencionados pode ser causada por diversos fatores. Uma possibilidade é a influência de sedimentos inter-duna, mais finos, e com uma condutividade hidráulica mais baixa. A geometria das superfícies de deposição também pode ser a origem da diferença. A penetração parcial do PE gera uma verticalização do fluxo. Quanto mais próxima a direção do fluxo for à orientação do eixo ortogonal aos planos de estratificações das paleodunas, maior será a anisotropia (K_{min} da Figura 5). O trabalho de Lindquist (1988) somente avaliou a anisotropia entre as direções horizontal e vertical, e não em relação à direção ortogonal aos planos de estratificação. O trabalho de Van den Berg & de Vries (2003) aborda esta questão, mas somente em sedimentos inconsolidados. A compactação dos sedimentos da Formação Botucatu pode ser a causa do maior valor de m obtido no presente trabalho, quando comparado a este último artigo.

4.3 Testes com traçador

Como o único objetivo deste teste foi determinar a velocidade média de transporte do soluto, dispersão e difusão não foram levados em conta. Assim, somente o tempo de chegada do centro de massa do traçador foi considerado, sem avaliar a forma da curva de chegada no gráfico de concentração versus tempo.

No planejamento dos testes F/G e F/B assumiu-se que os picos de chegada da fluoresceína injetada no SAG e no Serra Geral seriam facilmente distinguíveis. Os dois picos observados na Figura 8 foram considerados como oriundos da mesma injeção, no Guarani. As abruptas variações devem ter sido causadas por diferentes caminhos seguidos pelo traçador dentro do arenito, ou por sua heterogeneidade. Isto implica que o traçador inserido no teste F/B não chegou até o poço de bombeamento. Isto pode ter sido causado por diluição excessiva da fluoresceína no meio, ficando abaixo do limite de detecção do fluorímetro, ou porque não há conexão entre o basalto e SAG neste local. A segunda hipótese corrobora a tese levantada pelo resultado do teste de bombeamento de vazão constante, de conexão muito limitada, ou até inexistente, entre ASG e SAG.

Para o cálculo da porosidade efetiva foi usado o método apresentado por Custodio & Llamas (1996) para um poço de bombeamento parcialmente penetrante. Nesta situação, o tempo que o traçador leva para se deslocar entre o piezômetro e o poço de bombeamento é o mesmo que qualquer partícula de água leva em uma semi-esfera com raio igual à distância entre os poços. Assim, quando o traçador chegar ao poço de bombeamento, o volume total bombeado é aquele extraído da porosidade efetiva da semi-esfera. A porosidade efetiva é obtida com a equação 9.

Existem diferentes formas de avaliar o momento de chegada do traçador ao poço de bombeamento. Neste trabalho foram usadas duas que não sofrem influência dos efeitos de dispersão e difusão: (1) usando como referência o ponto médio do tempo na altura de 2/3 do pico de concentração registrado (Figura 8), e (2) determinando o momento em que 50% da massa efetivamente recuperada alcança o poço de bombeamento (Figura 9). Assim obtém-se dois tempos de trânsito distintos: (1) de 44h30min, e (2) de 46h40min. Com uma vazão média de 29,7 m³/h, obtém-se volumes totais bombeados de (1) 1321,6 m³ e (2) 1387,1 m³. A distância entre o ponto de injeção e coleta é 15,0 m. Aplicando a equação 9, calculou-se uma porosidade efetiva do SAG de (1) 18,6% e (2) 19,5%. Como não havia sedimentos representativos do contato entre SAG e ASG para a determinação do fator de retardação, foi usado o valor definido por Klotz (1982, apud Käss, 1992), para fluoresceína em experimentos de coluna com areia quartzosa, análoga aos sedimentos do SAG: $R_D = 0,99$. Os valores recalculados são apresentados na Tabela 4.

$$n_{ef} = \frac{3V}{2\pi r^3} \quad (9)$$

Onde:

n_{ef} = porosidade efetiva (adimensional)

V = volume total bombeado (C^3)

r = distância entre o poço de bombeamento e o piezômetro (C)

Sendo: C – unidade de comprimento; T – unidade de tempo.

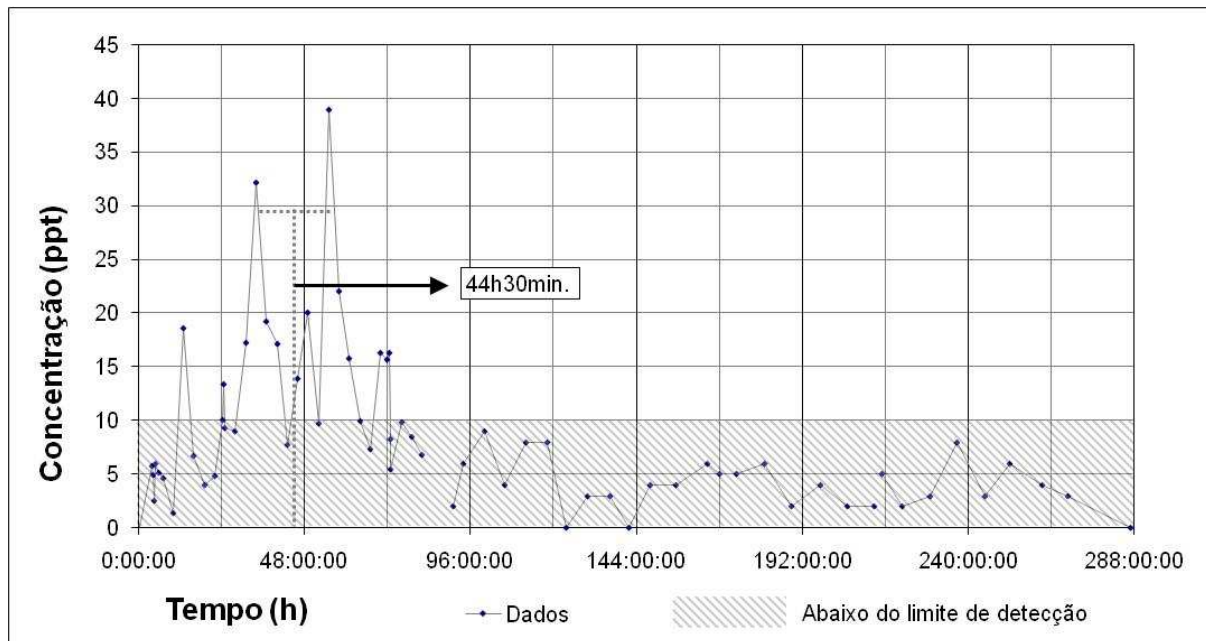


Figura 8. Chegada de fluoresceína (teste F/G). O momento da chegada é considerado como o ponto central de uma reta traçada a 2/3 da altura das concentrações máximas (32 e 39 ppt). O valor obtido é próximo a 30 ppt. Os dois picos são levados em conta, para agrupar as chegadas de traçador que provavelmente passou por caminhos distintos no SAG.

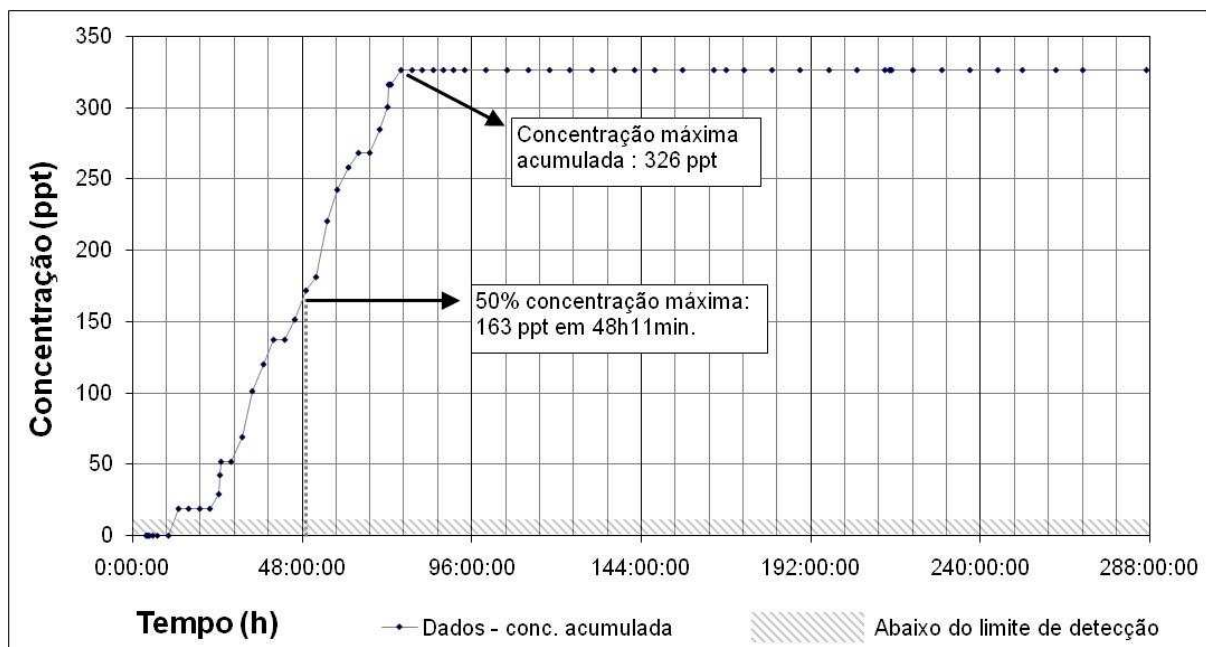


Figura 9. Concentração acumulada do teste F/G. É considerado momento de chegada o instante em que 50% da concentração máxima acumulada chegam ao poço de bombeamento.

Invertendo a equação de fluxo para isolar o K (equação 10), e substituindo os valores de porosidade efetiva, velocidade média de trânsito da fluoresceína, e gradiente hidráulico médio

durante o bombeamento na equação de advecção, foi calculada a condutividade hidráulica do SAG (Tabela 4).

$$K = v n_{ef} dl/dh \quad (10)$$

Onde:

n_{ef} = porosidade efetiva (adimensional)

v = velocidade média de advecção da água (C/T)

dl = distância entre o poço de bombeamento e o piezômetro (C)

dh = diferença de carga hidráulica entre o poço de bombeamento e os piezômetros (C)

Sendo: C – unidade de comprimento; T – unidade de tempo.

Tabela 4. Resumo dos resultados obtidos com o teste F/G, considerando o fator de retardação $R_D = 0,99$.

Tipo de avaliação de chegada	Tempo até a chegada	Volume bombeado	n_{ef} corrigida	K (m/d)
(1) 2/3 do pico	44h30min	1321,6 m ³	18,8%	2,7
(2) 50% da massa acumulada	48h11min	1387,1 m ³	20,3%	2,8

3. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Os resultados dos dois métodos usados, teste de bombeamento de longa duração no Sistema Aquífero Guarani (SAG) e teste com traçador fluorescente entre SAG e ASG, indicaram que a drenança é muito reduzida ou inexistente no local testado. O melhor resultado foi obtido com o teste hidráulico.

Após 171 h de bombeamento ainda não havia sido alcançado o estado estacionário. Isto comprova que não há, na área do cone de rebaixamento, drenança suficiente através do basalto para equilibrar a extração de água. Portanto caso haja drenança, ela é muito reduzida ou não detectável.

O traçador injetado no basalto não foi detectado no poço de bombeamento. Isto indica conectividade baixa ou inexistente o ASG e SAG no local testado. Através do teste de injeção de traçador no SAG foram determinados valores de porosidade efetiva entre 18,8% e 20,3%, considerando um R_D de 0,99. Mas testes de coluna sempre geram resultados baixos para R_D , ainda mais considerando areia quartzosa pura. Na situação real a chegada da fluoresceína provavelmente foi mais influenciada pela presença de argila, originada na alteração do basalto. A diferença entre os dois valores de porosidade efetiva obtidos, de aproximadamente 5%, deve ser menor do que a influência do retardamento real. As porosidades efetivas apresentadas aqui são coerentes com os valores obtidos por Araújo *et al.* (1999) para o Guarani, que variam entre 14 e 30%, com média de 16% obtida a partir de 150 valores pesquisados.

Os valores de condutividade hidráulica obtidos, variando entre 2,2 a 2,8 m/d dependendo do método de cálculo usado, são pouco menos de uma ordem de grandeza maiores do que aqueles obtidos com a interpretação do teste de bombeamento, respectivamente de $4,5 \times 10^{-1}$ e $7,0 \times 10^{-1}$ m/d

na direção de menor e maior K, considerando a existência de anisotropia. A diferença deve ser causada pelo fato de testes com traçadores serem mais sensíveis a heterogeneidades no aquífero do que testes de bombeamento. O traçador deve ter percorrido um caminho preferencial, ao longo de uma superfície deposicional com condutividade hidráulica maior, para chegar até o poço de bombeamento. O teste de bombeamento é menos sensível à influência de superfícies deposicionais mais permeáveis. Seus resultados refletem as condutividades das várias camadas presentes na direção entre o piezômetro e o poço de bombeamento. Dann *et al.* (2008) encontrou uma diferença de duas ordens de magnitude entre os resultados de testes de traçador e de bombeamento, realizados em sedimentos aluvionares. O autor atribui a diferença à passagem do traçador por canais mais permeáveis nos sedimentos. No caso de sedimentos eólicos a diferença deve ser menor, o que é coerente com os resultados apresentados neste trabalho. A presença de dois picos distintos de chegada no gráfico de concentração de traçador em função de tempo também indicam a existência de canais preferenciais de fluxo no arenito.

Os dados do teste de bombeamento também indicaram a presença de anisotropia no SAG, fato inédito na literatura, devido à inexistência de testes de bombeamento com poços de observação no aquífero. Fazendo as correções necessárias para a penetração parcial do poço de bombeamento, e para a presença de anisotropia, foi calculado um $K_{\text{máx}}$ de $7,0 \times 10^{-1}$ m/d, na direção NNW, e um $K_{\text{mín}}$ de $4,5 \times 10^{-1}$ m/d, na direção ENE. Com mais um piezômetro, além dos dois existentes, seria possível determinar com maior segurança a orientação do elipsóide de condutividade hidráulica, e um valor mais preciso de $K_{\text{máx}}$ e $K_{\text{mín}}$.

No caso do campo de piezômetros da Chácara Esmeralda, a relação entre a maior e a menor transmissividades (T_x/T_y) foi de 1,55, um pouco superior à encontrada por outros autores em sedimentos eólicos, como Van den Berg & de Vries (2003) que obtiveram uma relação de 1,45, e Lindquist (1988) com um valor de 1,46. O fato de a interpretação aqui apresentada ter sido feita usando somente dois piezômetros, e sem conhecimento sobre a orientação exata das estratificações nos sedimentos, certamente embute um erro no valor da anisotropia encontrada.

Por outro lado, neste teste de bombeamento, os piezômetros estavam praticamente no mesmo plano horizontal, que não é a direção de maior anisotropia em sedimentos eólicos com estratificações cruzadas. Neste tipo de sedimento a maior anisotropia ocorre entre a direção paralela às estratificações e sua perpendicular. Outro fator que potencialmente aumentaria a anisotropia encontrada na Chácara Esmeralda seria a adoção de outra orientação para a elipse de anisotropia horizontal. Qualquer direção diferente daquela adotada na interpretação apresentada resultaria em uma anisotropia maior. Estes dois fatores indicam ser plausível que a anisotropia no SAG seja um pouco maior do que aquelas apresentadas nos trabalhos de Lindquist (1988) e Van den Berg & de Vries (2003).

Com base na orientação da anisotropia definida para a Chácara Esmeralda é possível inferir a direção das camadas descritas pelas estratificações no arenito Botucatu como sendo ao redor de E-W. Como não é possível determinar o mergulho destas camadas com os resultados do teste de bombeamento, o sentido das paleocorrentes de vento pode ser tanto norte quanto sul. Um novo teste de bombeamento na Chácara Esmeralda, com um número maior de piezômetros no SAG dispostos em profundidades distintas, seria necessário para determinar com maior precisão a direção das estratificações, e até mesmo o sentido das paleocorrentes de vento.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a valiosa cooperação do Sr. Mário Osene, pelo apoio incondicional ao projeto FRATASG, permitindo a realização dos trabalhos na Chácara Esmeralda. Este trabalho foi financiado pela Fapesp, na forma de um projeto de auxílio à pesquisa (processo número 04/11798-4), e de uma bolsa de doutorado para o primeiro autor (processo número 04/15543-0), que foi também apoiado pela Capes - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, na forma de uma bolsa de doutorado sanduíche no exterior (processo 0715/06-9), e na forma de uma bolsa de doutorado (Demanda Social – IGc/USP). A coordenação do projeto esteve a cargo do Instituto Geológico – SMASP e o apoio de infra-estrutura, a cargo do Laboratório de Modelos Físicos (LAMO) – IGc-USP e do Instituto Geológico – SMASP. Agradecimentos são estendidos a todos os componentes da equipe do projeto FRATASG.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araújo, L.M., França, A.B. & Potter, P.E., 1999, Hydrogeology of the Mercosul Aquifer System in the Chaco-Paraná Basins, South America, and Comparison with the Navajo-Nugget Aquifer System, USA, *Hydrogeology Journal*, v.7, p.317-336.
- Assine, M.L., Piranha, J.M. & Carneiro, C.D.R., 2004, Os Paleodesertos Pirambóia e Botucatu, P. 77-93, *In: Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, por Mantesso Neto, V., Bartorelli, A., Brito-Neves, B.B., Carneiro, C.D.R., São Paulo, Beca, 2004, 647 p.
- Blöcher, G., 2004, Grundwasserbewirtschaftung mittels eines dreidimensionalen numerischen Strömungsmodells im Raum Ribeirão Preto - São Paulo – Brasilien, *Dissertação de Mestrado*, Universidade Técnica de Berlim, Alemanha, em alemão, 142p.
- Custodio, E. & Llamas, M.S., 1996, *Hidrologia subterránea*. 2a ed. Barcelona, Omega, v. 1, 1157p.
- Dann, R. L., Close, M. E., Pang, L., Flintoft, M. J., Hector, R. P., 2008, Complementary use of tracer and pumping tests to characterize a heterogeneous channelized aquifer system in New Zealand, *Hydrogeology Journal*, v.16, p. 1177–1191.
- Fernandes, A.J., Maldaner, C., Azevedo Sobrinho, J.M., Pressinotti, M., no prelo, Estratigrafia dos derrames de basaltos de Ribeirão Preto: geologia física, petrografia e geoquímica, *Revista Geologia USP*, aceito para publicação.

- Fernandes A.J., Rouleau, A., Maldaner, C., Pressinotti, M., em elaboração, Métodos e resultados de levantamento e de análise das fraturas nos basaltos de Ribeirão Preto, SP: aplicação à elaboração de modelo hidrogeológico conceitual.
- Foster, S., Kemper, K., Garduño, H., 2004, Brazil, Paraguay, Uruguay, Argentina: The Guarany Aquifer Initiative for Transboundary Groundwater Management, World Bank – Washington DC, GW Mate Case File Collection 9, 16p.
- Gallo, G. & Sinelli, O., 1980, Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas na região de Ribeirão Preto. *Revista Brasileira de Geociências*, v.10, p.129-140.
- Hantush, M.S., 1961a, Drawdown Around a Partially Penetrating Well, J. Hydraulic Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, v. 87 (HY4), p. 83-98
- Hantush, M.S., 1961b, Aquifer Tests on a Partially Penetrating Wells, J. Hydraulic Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, v. 87 (HY5), p. 171-195.
- Hantush, M.S., 1966, Analysis of data from pumping tests in anisotropic aquifers, J. Geophys. Res., v.71, n.2, p.421-426.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2008, Estimativas da população para 1º de julho de 2008. Documento disponível em <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pibmunicipios/2006/tab01.pdf>. Acessado em 13/03/2009.
- Iritani, M.A. (coordenadora), 2004, Sistema de Informação para o Gerenciamento Ambiental dos Recursos Hídricos Subterrâneos na Área de Afloramento do Aquífero Guarani no Estado de São Paulo, Relatório Final de Projeto de Pesquisa FAPESP número 02/10368-0, 148p.
- Iritani, M. A., Schuler, G., Dias, C.L., Ferreira, L. M. R., Guillaumon, J.R., Frish, H., Casarini, D. C. P., Tröger, U., 2004, Exploração do Aquífero Guarani e os impactos ao nível d água em Ribeirão Preto Brasil, 33º Congress - International Association of Hydrogeologists, 2004, Zacatecas.
- Käss, W., 1992, Geohydrologische Markierungstechnik, Berlim, Gebrüder Bornträger, 519p.
- Kruseman, G.P. & de Ridder, N.A. 1991. Analysis and Evaluation of Pumping Test Data, Second Edition, Wageningen, International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, 377p.
- Lindquist, S.J., 1988, Practical Characterization of Eolian Reservoirs for Development: Nugget Sandstone, Utah-Wyoming Thrust Belt, *Sedimentary Geology*, 56, p. 315-339.
- Massoli, M., 2007, Caracterização Litofaciológica das Formações Pirambóia e Botucatu, em Subsuperfície, no Município de Ribeirão Preto (SP), e sua Aplicação na Prospecção de Águas Subterrâneas, Tese de doutoramento defendida no Instituto de Geociências e Ciências Exatas da UNESP, Rio Claro, 173 p.
- Sinelli, O. (coordenador), 1973, Mapa geológico do nordeste do Estado de São Paulo. Escala 1:50.000 - Folhas de Serrana, Ribeirão Preto, Cravinhos e Bonfim Paulista. Convênio CNEC/FFCL- Ribeirão Preto-USP.
- Van den Berg, E.H. & de Vries, J.J., 2003, Influence of grain fabric and lamination on the anisotropy of hydraulic conductivity in unconsolidated dune sands, *Journal of Hydrology*, 283, p. 244–266.