

HIDROGEOLOGIA DE AQUÍFEROS RASOS: ESTUDO DE CASO EM ÁREA DE VÁRZEA NO RIO PARAÍBA DO SUL, SP

Hélio Nóbile Diniz¹; Márcia Helena Galina¹; Cesar Bianchi Neto², Fernando Willi Bastos Franco Filho²; Marcelo dos Santos Targa³

Resumo

Na região leste do Estado de São Paulo, ocorrem extensos aquíferos rasos em depósitos arenosos quaternários que preenchem antigos meandros abandonados pelo rio Paraíba do Sul. Formam um aquífero raso, confinado por camadas de solos argilosos, orgânicos. Estes aquíferos rasos propiciam o estabelecimento de cavas de extração de areia por dragagem, e que são abandonadas após a extração do minério, formando grandes lagos artificiais, cujos níveis de água são mantidos pelas águas subterrâneas. Neste trabalho são mostrados os dados hidroclimáticos e hidrogeológicos levantados na área da mineração Paraíso, situada na várzea do rio Paraíba do Sul, no município de Tremembé. Objetiva efetuar uma pesquisa para estabelecer os parâmetros do ciclo hidrológico determinando qual a parcela da água que infiltra e recarrega o aquífero quaternário, sua proveniência, e os totais das águas subterrâneas evaporados nos lagos formados pelas cavas de extração de areia. A influência da mineração de areia e de outras atividades econômicas desenvolvidas na área da várzea do rio Paraíba do Sul, como a rizicultura, na contaminação dos aquíferos rasos e sua influência na qualidade das águas subterrâneas também é avaliada.

Abstract

In the east of São Paulo State, occur large shallow aquifers in sandy Quaternary deposits that fill the ancient abandoned meanders along the Paraíba do Sul river. These deposits form a shallow aquifer, confined by layers of organic clay. These shallow aquifers provide the establishment of sand extraction open pits, which are abandoned after the ore extraction, forming large artificial lakes, whose water levels are maintained by groundwater. This work presents hydrogeological and hydroclimatic data obtained in the Paraíso mining area, located in the Paraíba do Sul river floodplain, in the municipality of Tremembé. This hydrogeological research aims to establish the parameters of the hydrological cycle for purposes of determining the water portion that infiltrates and rise the Quaternary aquifer, its provenance, and the total groundwater evaporated in the lakes formed by sand extraction pits. The influence of sand mining and other economic activities developed in the floodplain area of the Paraíba do Sul river, such as the rice crop, in the contamination of shallow aquifers and their influence on groundwater quality is also evaluated.

Palavras-Chave: aquífero sedimentar quaternário, várzea do rio Paraíba do Sul

¹ Instituto Geológico do Estado de São Paulo – Av. Miguel Stéfano, 3900 - Água Funda –SP – Cep: 04301-903 – Fone: (11) 5073-5511, e-mail: heliodiniz1@yahoo.com.br

² Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – Av. do Estado, 561 – Ponte Pequena –SP – CEP 01107-900 - Fone: (11) 3388-7353, e-mail: cbianchi@sabesp.com.br

³ Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade de Taubaté - Estr.Municipal Dr.José.Luiz Cembranelli, 5.000 – Bairro Itaim – CEP 12.081-010 Taubaté - SP - Fone: (12) 3631-8004 - e-mail targa.marcelo@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

O grande crescimento urbano verificado nas cidades do Estado de São Paulo, nos últimos 40 anos, e principalmente na Região Metropolitana de São Paulo, provocou um aumento na demanda de minerais para construção civil, principalmente os agregados, tais como areia e brita.

A extração de areia no vale do rio Paraíba do Sul é praticada por meio de cavas submersas. Sob o aspecto hidrogeológico, tal prática é predatória, pois primeiramente os mineradores retiram a capa de solo argilo-arenoso (com espessura de até 2 m, pouco permeável e onde a infiltração é desprezível) que é apropriada para as culturas de arroz. Depois de retirado, esse solo é lançado nas cavas abandonadas situadas nas imediações. Em seguida, com uma retro-escavadeira, retiram a areia da cava recém-aberta até atingir aquífero sedimentar quaternário, onde instalam uma draga que passa a lançar a areia, juntamente com a água, em um classificador. A base do depósito arenoso (de 1 a 2 m) não é retirada, pois a dragagem nunca atinge a profundidade final.

Esse método de extração remove a vegetação natural, impede os empreendimentos agrícolas e produz grandes lagos abastecidos pelo nível d'água do aquífero sedimentar quaternário. Tal fato tem transformando a área de várzea do rio Paraíba do Sul em vários lagos artificiais. A formação desses lagos acarreta uma grande perda de água por evaporação para a atmosfera. O aumento da evaporação na área da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul compromete a reposição do excedente hídrico, o que faz com que a evaporação excessiva atinja níveis que se igualam ou superam o total precipitado na área da várzea (REIS, 2005).

Para conhecer a parcela do excedente hídrico que infiltra na área de várzea é necessário conhecer quais são as variações de níveis de água do aquífero sedimentar quaternário e, isto somente é possível por meio de uma série histórica de medidas piezométricas.

As características hidrodinâmicas do aquífero sedimentar quaternário, seja a Condutividade Hidráulica, Transmissividade ou o Coeficiente de Armazenamento são obtidos no decorrer desse trabalho, de forma que um modelo hidrogeológico da área da várzea do rio Paraíba do Sul possa ser montado.

2. OBJETIVOS

O objetivo desse estudo é a investigação dos aspectos climáticos e hidrogeológicos da área de várzea do rio Paraíba do Sul, no município de Tremembé, além do levantamento das interferências existentes entre as cavas de extração de areia e as alterações nas condições de armazenamento e qualidade da água do aquífero sedimentar quaternário.

3. CARACTERÍSTICAS GERAIS DO MUNICÍPIO DE TREMEMBÉ

O município de Tremembé possui área de 192,42 km², e situa-se na região do Vale do Paraíba, no leste do Estado de São Paulo. Limita-se a norte e leste com Pindamonhangaba, a oeste

com Monteiro Lobato e a sul, com Taubaté. A localização do município de Tremembé, em relação ao Estado de São Paulo encontra-se na Figura 1.

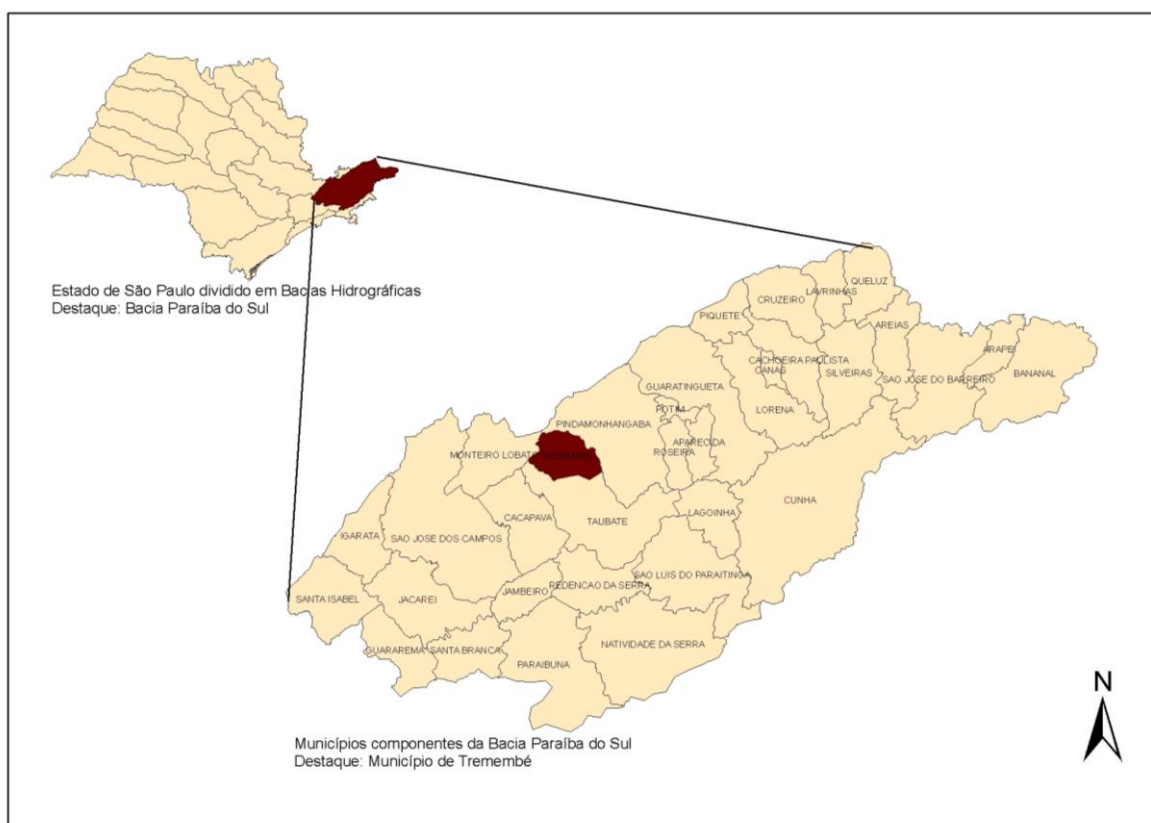


Figura 1. Localização do município de Tremembé no leste do Estado de São Paulo.

Segundo o INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE (2009a), a população de Tremembé, em 2007, era de 38.321 habitantes. Destes, somente 645 habitam a zona rural onde desenvolvem atividades agropecuárias. A principal atividade agrícola é o cultivo de arroz irrigado, e segundo dados do IBGE (2009b), os agricultores produzem uma média anual de 8.836,8 toneladas de arroz em uma área de 2.100 hectares.

Com o declínio da produção de café no vale do Paraíba, o cultivo de arroz no município de Tremembé foi viabilizado devido ao rio Paraíba do Sul, que apresenta extensas áreas de várzeas que permitem o estabelecimento de sistemas de drenagem compostos por valas, valetas, diques e comportas que permitem controlar a vazão das águas superficiais, estabelecendo ciclos completos de inundações na época do plantio e desenvolvimento das plantas, seguidas de ressecamentos na época da colheita.

3.1. Mineração e geologia

Desde a década de 1950 a mineração se desenvolve no vale do rio Paraíba do Sul de forma intensiva, no início, explorando o leito do rio Paraíba do Sul e, a partir da década de 1970, por meio de cavas situadas nas áreas das planícies aluviais.

A atividade mineradora é reconhecida pelas degradações ambientais que provocam no seu desenvolvimento. Nesse sentido, as medidas de controle e recuperação das áreas utilizadas vêm sendo equacionadas técnica e administrativamente por meio de normatizações e de legislações constantemente atualizadas pela Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SMA).

No município de Tremembé, as empresas mineradoras realizam a extração de areia nas proximidades das margens do rio Paraíba do Sul e exploram o minério por meio da escavação com o uso de dragas que fazem a extração do mineral abaixo do nível d'água subterrâneo, formando áreas alagadas que acompanham o eixo do rio.

A maior parte das áreas de mineração ainda está em pleno desenvolvimento. No entanto, algumas lagoas formadas após a desativação do empreendimento foram abandonadas, sem qualquer uso alternativo, provavelmente por desconhecimento dos impactos que as atividades poderiam causar ao aquífero sedimentar quaternário.

No rio Paraíba do Sul, podem ser identificados antigos meandros abandonados, ou seja, antigas posições do curso fluvial principal que, em épocas pretélicas, foram erodidas e retrabalhadas por sedimentos terciários da Bacia Sedimentar de Taubaté. As espessuras desses sedimentos mais recentes, que apresentam baixa seleção granulométrica, localmente não ultrapassam uma dezena de metros.

Nas principais drenagens da região, um sistema fluvial meandrante, associado a gradientes moderadamente baixos, está bem desenvolvido. Os sedimentos aluvionares quaternários são constituídos por argilas, siltes, areias e conglomeráticas.

4. CARACTERÍSTICAS HIDROCLIMÁTICAS E CORRELAÇÃO COM A INFILTRAÇÃO

O ciclo hidrológico pode ser quantificado a partir da equação hidrológica, que se baseia na lei de conservação das massas. É expressa por: entradas d'água = saídas +/- mudanças no armazenamento.

Rushton e Ward (1979) adotam a seguinte expressão para o balanço hídrico: $P = E + R + \Delta A$ (equação 1) onde; P = precipitação, E = Evapotranspiração, R = escoamento superficial e ΔA = incrementos no armazenamento.

O balanço hídrico é a aplicação do princípio da conservação das massas (equação da continuidade) a uma certa região cujo volume é conhecido e definido por determinadas condições de contorno. Durante o período em que o balanço é realizado, a diferença entre o total das entradas e o total das saídas deve ser igual às mudanças de água do armazenamento. As medidas podem ser efetuadas em massa ou em volume, desde que a densidade da água seja constante.

Na área da várzea do rio Paraíba do Sul, em Tremembé, pode-se estabelecer um balanço hídrico reescrevendo-se a equação (1) sob a forma: $R + \Delta A = P - E$, e admitindo-se que a condição

$P - E$ represente o excedente hídrico (quando positiva) ou deficiência hídrica (quando negativa). Assim pode-se comparar a expressão $R + \Delta A$ com o excedente ou deficiência hídrica, calculado em um período considerado (D'ANGIOLLELA e VASCONCELOS, 2002).

A diferença de armazenamento de água no solo ΔA , em certo período, pode ser conhecido por meio da Porosidade (n) e Grau de Saturação (S_r) encontrados no solo, e definindo-se a Capacidade de Armazenamento (C_A) como sendo igual à diferença entre a Porosidade (n) e a Porosidade (n) \times quantidade de poros preenchidos com água (S_r), ou seja:

$$C_A = n - n \times S_r$$

Assim sendo, a Capacidade de Armazenamento é igual à porosidade (dada em porcentagem) menos o porcentual de poros já preenchidos com água.

Para um armazenamento unitário (A_U), considerando um volume de solo com 1 m de altura, 1 m de largura e 1 m de extensão, tem-se:

$$A_U = 1 \text{ m}^3 \times C_A$$

C_A pode ser determinado por meio da Porosidade e Grau de Saturação que, por sua vez, podem ser encontrados por fórmulas de correlação com os Índices Físicos, parâmetros geotécnicos que são determinados por ensaios de laboratório em amostras de solo.

Definindo-se a infiltração d'água no solo (lâmina d'água infiltrada) em um período chuvoso, como sendo $I = A_U \times (h_2 - h_1)$, onde h_2 é o nível d'água do solo após um período de tempo onde o nível d'água medido inicialmente era h_1 , temos que:

$$\Delta A = A_U \times (h_2 - h_1)$$

ou seja, $R + I = P - E$, sendo I igual à altura da coluna d'água infiltrada no período considerado e R igual à lâmina d'água escoada.

Ainda, $I + R =$ infiltração + escoamento superficial = excedente hídrico (equação 2).

Quando o valor encontrado para $A_U \times (h_1 - h_2)$ é igual ao excedente hídrico, conclui-se que toda a água disponível na superfície infiltrou e, quando é inferior ao excedente hídrico há uma parte da água precipitada que escoou superficialmente e não infiltra, mas que pode ser determinada por meio da equação (2) acima descrita.

5. MATERIAL E MÉTODOS

Diversos ensaios e obras para instalação de equipamentos foram realizados na área da mineração Paraíso, na várzea do rio Paraíba do Sul, no município de Tremembé. Foram realizados e interpretados 5 ensaios de infiltração, coletadas 4 amostras de solos superficiais para análise e determinação dos Índices Físicos, executadas 4 sondagens SPT, realizadas 19 análises granulométricas em amostras obtidas durante os ensaios SPT, construídos 4 poços de 4" de

diâmetro e 8 piezômetros com 2” de diâmetro e, realizados 4 testes de vazão nos poços e piezômetros instalados.

5.1. Ensaios de Infiltração

Foram realizados 5 ensaios de infiltração na área do Porto de Areia Paraíso, em Tremembé. O método utilizado para as medições de infiltração foi o do infiltrômetro de anéis cilíndricos concêntricos.

O método consiste na cravação de dois anéis concêntricos no solo. A função do anel externo é a de suprimir o efeito da dispersão lateral da água infiltrada no anel interno. Desta forma, a água contida no anel interno infiltra no perfil do solo em uma direção predominantemente vertical, possibilitando a estimativa da taxa de infiltração vertical da água. É mantida uma lâmina d’água de 3 a 5 cm, e as leituras são efetuadas a intervalos de tempo regulares, em uma régua verticalmente colocada no centro do anel interno.

Para cálculo da infiltração acumulada, utiliza-se o modelo de Kostiakov, descrito por Prevedello (1996), em que os parâmetros utilizados não têm significado físico próprio e são avaliados a partir de dados experimentais. Outro modelo empírico, todavia mais consistente do que o de Kostiakov e utilizado para o cálculo da infiltração acumulada, foi o modelo de Horton (PANACHUKI, 2003).

Os testes de infiltração efetuados tiveram por finalidade a determinação da dinâmica superficial da água em locais de diferentes usos: uma área temporariamente inundada para cultivo de arroz, uma aterrada para recuperação cava abandonada pela mineração e outra área de mineração de areia, sendo uma de mata natural e outra de pasto.

Os locais escolhidos para efetuar os ensaios de infiltração (Figura 2) situam-se próximos dos locais onde foram realizadas as sondagens SPT, pois nestes locais o perfil do solo passou a ser bem conhecido, inclusive havendo caracterização dos tipos sedimentares por meio de análises granulométricas, fato que favorece correlações entre a dinâmica superficial de infiltração da água das chuvas e a oscilações dos níveis d’água do aquífero sedimentar quaternário.

5.2. Coleta de amostras de solo para ensaios em laboratório

Segundo Bueno e Vilar (1984), os índices físicos são relações entre as fases ar, água e sólidos, em termos de massas e volume, que servem para caracterizar as condições físicas naturais em que um solo se encontra.

Em laboratório são determinados diretamente apenas três índices: umidade natural (%) segundo a NBR-6457, massa específica dos grãos (g/cm^3) segundo a NBR-6508 e massa específica natural (g/cm^3), úmida e seca. Os demais parâmetros são calculados através de fórmulas de correlação entre eles, sendo determinados o Índice de Vazios (e), a Porosidade (n) e o Grau de

Saturação (S_r). A massa específica dos sólidos e as análises granulométricas foram feitas em ensaios à parte, e completam o conhecimento dos Índices Físicos do solo (SANTORO, 1991).

Com os resultados dos ensaios de laboratório, os demais parâmetros foram calculados utilizando-se as fórmulas de correlação (NOGUEIRA, 1995), a saber:

- Índice de Vazios (e):

$$e = \frac{\gamma_s(1+w) - \gamma}{\gamma}$$

sendo: γ_s – massa específica dos sólidos;

w – teor de umidade;

γ – massa específica natural (seca)

- Porosidade (n):

$$n = \frac{e}{1+e}$$

- Grau de Saturação (S_r):

$$S_r = \frac{\gamma_s \cdot w}{e \cdot \gamma_w}$$

sendo:

γ_w – massa específica da água (1g/cm^3).

Para as determinações dos índices físicos foram coletadas 4 amostras de solo, no local 4 da Figura 2, nas profundidades de 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 m, em solo exposto, por meio da cravação e retirada do solo com cilindros amostradores de aço inox, em 2". As amostras contidas nos cilindros foram enviadas para o Laboratório de Solos do Departamento de Ciências Agrárias da Universidade de Taubaté para análises dos seguintes parâmetros: teor de umidade natural, massa específica dos grãos e massa específica natural.

5.3. Instalação de estação hidroclimática

Foi instalada uma estação hidroclimática para obtenção de dados para cálculo do balanço hídrico na área da várzea do rio Paraíba do Sul, no município de Tremembé. Os sensores que acompanham o equipamento são: velocidade do vento, direção do vento, temperatura do ar, umidade relativa, pressão barométrica, radiação solar e precipitação.

5.4. Construção de poços e piezômetros

Durante a realização dos ensaios SPT foi utilizada a cravação do amostrador a cada metro de avanço da sondagem, para obtenção do índice de penetração do solo e de sedimentos e, também, para possibilitar a coleta de amostras. Em algumas profundidades não foram obtidas amostras devido ao solo ser muito friável e não permitir a recuperação das mesmas. Nas profundidades onde

houve recuperação, as amostras foram coletadas em sacos plásticos, identificadas quanto ao local e profundidade.

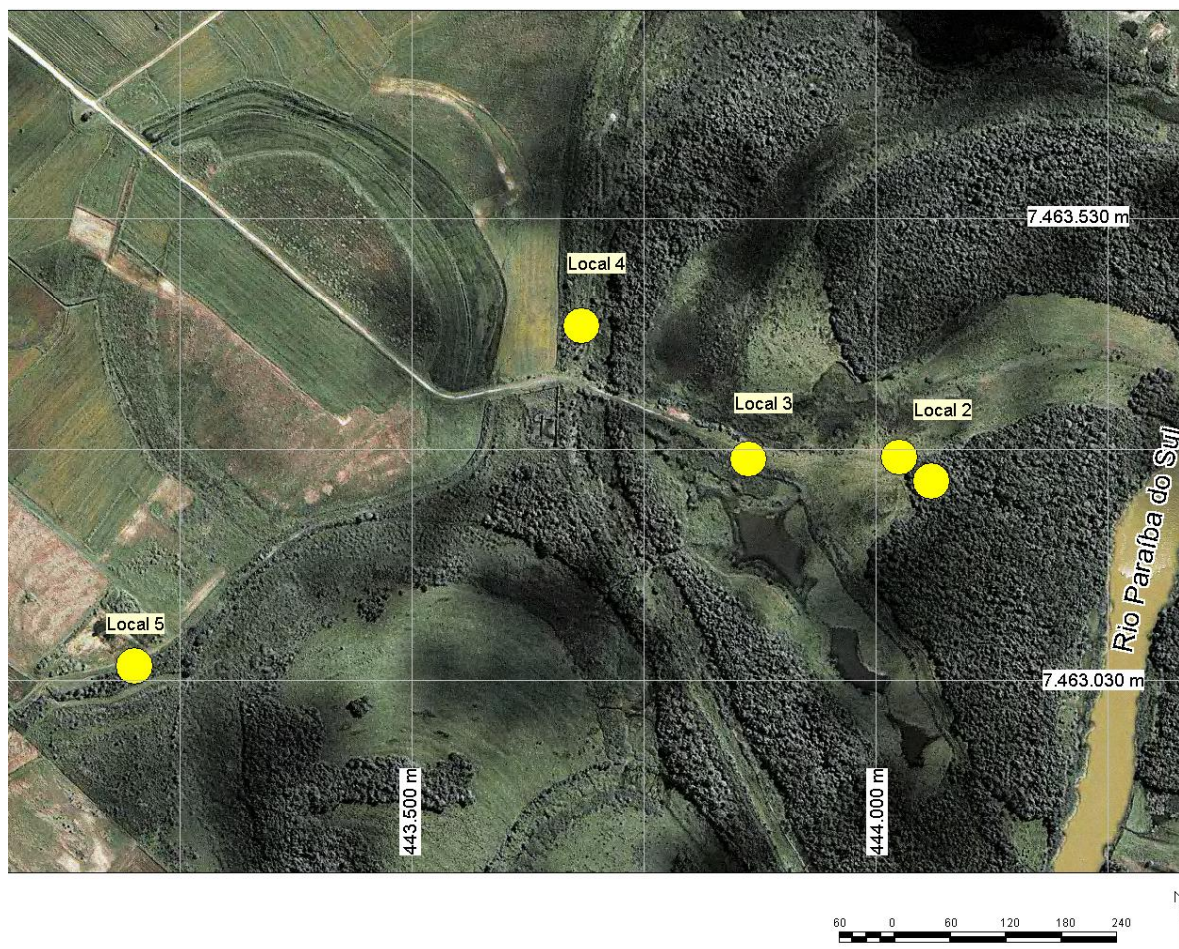


Figura 2. Área investigada contendo os locais onde foram realizados ensaios de infiltração.

As amostras colhidas foram enviadas ao Laboratório de Sedimentologia do Instituto Geológico, onde as análises granulométricas foram executadas para caracterização textural dos solos e sedimentos, utilizando-se o método do peneiramento para separação das frações areia e cascalho, e o método do densímetro para a quantificação das frações silte-argilas.

Um total de 4 poços de 4” de diâmetro foram perfurados e revestidos, e um total de 8 piezômetros de 2” foram perfurados e revestidos, formando conjuntos de 2 piezômetros construídos nas imediações de cada poço. Os locais onde os conjuntos de poços e piezômetros foram construídos são os mesmos anotados na Figura 2.

Os poços foram perfurados com sonda rotativa de 6” e revestidos com tubos lisos e de filtro no diâmetro de 4”, filtros com ranhura de 0,5 mm, constituídos por tubos geomecânicos, de PVC nervurado azul, com espessura de 10 mm. O espaço anular entre a perfuração de 6” e os tubos de 4” foi preenchido com pré-filtro de granulometria entre 1 e 3 mm. Toda a camada formada por sedimentos quaternários foram atravessadas pelas perfurações, assim como as camadas argilosas terciárias, alteradas, constituídas por argilas montmoriloníticas (bentonitas). As perfurações terminaram nos argilitos maciços betuminosos do período Terciário, subjacente.

Os piezômetros foram perfurados em 4” e revestidos com tubos lisos e de filtro, de 2”, em PVC azul, geomecânicos, com ranhuras de 0,25 mm.

5.5. Instalação de equipamentos para medições dos níveis d’água do aquífero sedimentar quaternário

Foram instalados medidores automáticos do nível d’água, com armazenadores de dados nos piezômetros, para monitoramento das variações dos níveis d’água do aquífero sedimentar quaternário, na área da mineração Paraíso, no município de Tremembé. Os 8 equipamentos adquiridos possuem precisão de 1 centímetro, e permitem leituras com variações de até 15 pés (4,57 m).

5.6. Testes de vazão

Como os poços construídos foram revestidos com tubos lisos e tubos de filtro de 4” até uma profundidade média de 8 m, utilizou-se uma motobomba com tubo de entrada e de saída de 2”, autoescorvante (a própria bomba retira o ar dos tubos), com funcionamento por motor a gasolina (no campo não há energia elétrica e o equipamento utilizado deve gerar a própria energia), com 4,5 HP, vazão máxima de 30.000 L/h e altura manométrica de bombeamento até 8 m (profundidade máxima do nível d’água).

Durante os testes, as vazões foram medidas em tambores de 50 L e os níveis d’água nos piezômetros situados nas imediações, em número de dois, para cada poço construído.

6. RESULTADOS OBTIDOS

Resultados parciais já permitem o conhecimento das características físicas dos solos quanto à capacidade de retenção de água, perfil geológico e textural dos sedimentos quaternários formados por depósitos de meandros abandonados do rio Paraíba do Sul, resistência e elasticidade desses sedimentos, tipo de aquífero, características hidrodinâmicas deste aquífero, qualidade físico-química das águas subterrâneas e superficiais, e dados hidroclimáticos da várzea do rio Paraíba do Sul, no perímetro do município de Tremembé.

6.1. Resultados obtidos nos ensaios de infiltração

Foram realizados cinco ensaios de infiltração em locais diferentes situados na área da Mineração Paraíso. Os resultados dos ensaios mostraram que as taxas de infiltração para o solo superficial constituído por argilas cinzas orgânicas é praticamente desprezível, devido à sua impermeabilidade até a profundidade média de 2 m, quando então, encontram-se os depósitos arenosos que constituem o aquífero sedimentar quaternário.

Quanto ao comportamento hidráulico dos solos da várzea do rio Paraíba do Sul, na área da mineração Paraíso, no município de Tremembé, a velocidade de infiltração é alta nos primeiros 10-20 minutos e em seguida decresce rapidamente, chegando a zero após 2-3 h. Esse comportamento

mostra que os solos possuem alta porosidade e baixa condutividade hidráulica e, quando atingem a saturação (após 10-20 minutos de uma chuva com média intensidade) tornam-se totalmente impermeáveis, o que impede a infiltração da água. É um solo apropriado para o uso agrícola utilizando inundação.

6.2. Determinação dos Índices Físicos e correlação com a Capacidade de Armazenamento do Solo

Na tabela 1, são mostrados os parâmetros físicos do solo determinados no Laboratório de Solos do Departamento de Ciências Agrárias da Universidade de Taubaté. São os seguintes: umidade natural, massa específica dos grãos e massa específica natural. Os índices físicos foram determinados por meio de fórmulas de correlação.

Os índices físicos obtidos são de amostras retiradas do solo da área da várzea do rio Paraíba do Sul, no local de coordenadas 443,708 E e 7463,413 N e altitude de 534,5 m, em quatro profundidades: 0,5 m, 1 m, 1,5 m e 2 m. Para os índices físicos obteve-se a média de 66% de porosidade e 40% de saturação. Estes valores médios encontrados serão utilizados para a determinação da Capacidade de Armazenamento (C_A) e o Armazenamento Unitário (A_U), conforme definido no item 4.

Como, $C_A = n - n \times S_r$, então: $C_A = 0,66 - 0,66 \times 0,40 = 0,4$.

Sendo, $A_U = 1 \text{ m}^3 \times C_A$, temos: $A_U = 0,4 \text{ m}^3$.

Para cada 0,4 m de lâmina d'água infiltrada obter-se-á 1 m de subida do nível d'água do aquífero sedimentar quaternário. Mas, para cada acréscimo na subida do nível d'água ou aumento do potencial hidráulico haverá, como mecanismo compensatório, um aumento equivalente na descarga da água do aquífero sedimentar quaternário nas fontes.

Tabela 1. Índices Físicos de amostras de solo da várzea do rio Paraíba do Sul, em Tremembé.

		Teor de umidade	Massa específica natural	Massa específica dos sólidos
nº amostra	Profundidade (m)	w	γ (g/cm ³)	γ_s (g/cm ³)
1	0,5	0,33	1,16	2,67
2	1,0	0,29	1,22	2,78
3	1,5	0,26	1,21	2,69
4	2,0	0,26	1,20	2,76
média		0,29	1,20	2,73
nº amostra	Índice de vazios	Porosidade (n)	Grau de Saturação (S_r)	
1	2,06	0,67	0,43	
2	1,94	0,66	0,42	
3	1,80	0,64	0,39	
4	1,90	0,65	0,38	
média	1,92	0,66	0,40	

6.3. Perfil litológico

Durante a construção dos poços em 4 pontos distintos, na área da Mineração Paraíso, foram coletadas amostras de metro em metro por meio de cravação de amostrador SPT e enviadas para o Laboratório de Sedimentologia do Instituto Geológico para caracterização granulométrica dos solos e sedimentos, utilizando-se o método do peneiramento para separação das frações areia e pedregulho, e o método da sedimentação para a quantificação das frações silte-argilosas.

Na Figura 3 é mostrado o diagrama triangular de classificação granulométrica de amostras obtidas durante o ensaio de penetração, realizado para a construção do Poço 2. Foram analisadas as amostras coletadas em diversas profundidades, variáveis entre 3 e 7 m.

Neste local, verifica-se que em todo o perfil geológico predominam areias de granulometria média, sendo muito grossa no final do intervalo sedimentar quaternário (solo arenoso até 2 m de profundidade, sedimentos aluvionares até 5,5 m de profundidade). A partir deste intervalo, ocorrem argilas verdes, montmoriloníticas, produtos da alteração de folhelhos e argilitos da seção sedimentar terciária (Formação Tremembé).

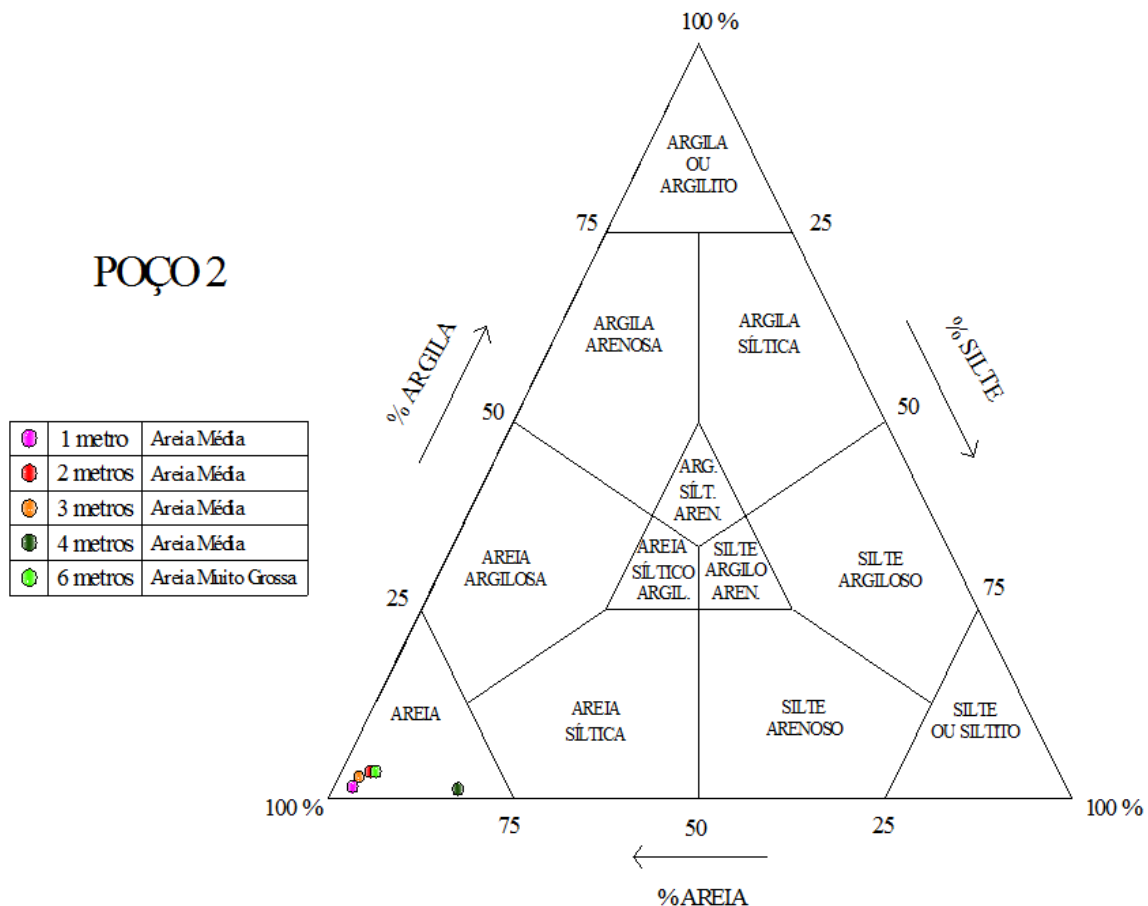


Figura 3. Diagrama triangular da textura das amostras obtidas no Poço 2 (próximo da mata ciliar do rio Paraíba do Sul).

6.4. Poços e piezômetros

O Poço 2 (coordenadas UTM 444,060 km E e 7463,245 km N) foi construído próximo de uma mata nativa (local 2, da Figura 2), com o objetivo de determinar a influência da proximidade da mata nas características físico-químicas e bacteriológicas do aquífero sedimentar quaternário.

Ao lado do Poço 2 foram construídos 2 piezômetros (respectivamente a 1,91 m e 4,07 m de distância do poço) e formando ângulo reto com o poço, respectivamente nas direções leste e norte. O esquema construtivo do poço 2 e dos piezômetros auxiliares é mostrado na Figura 4.

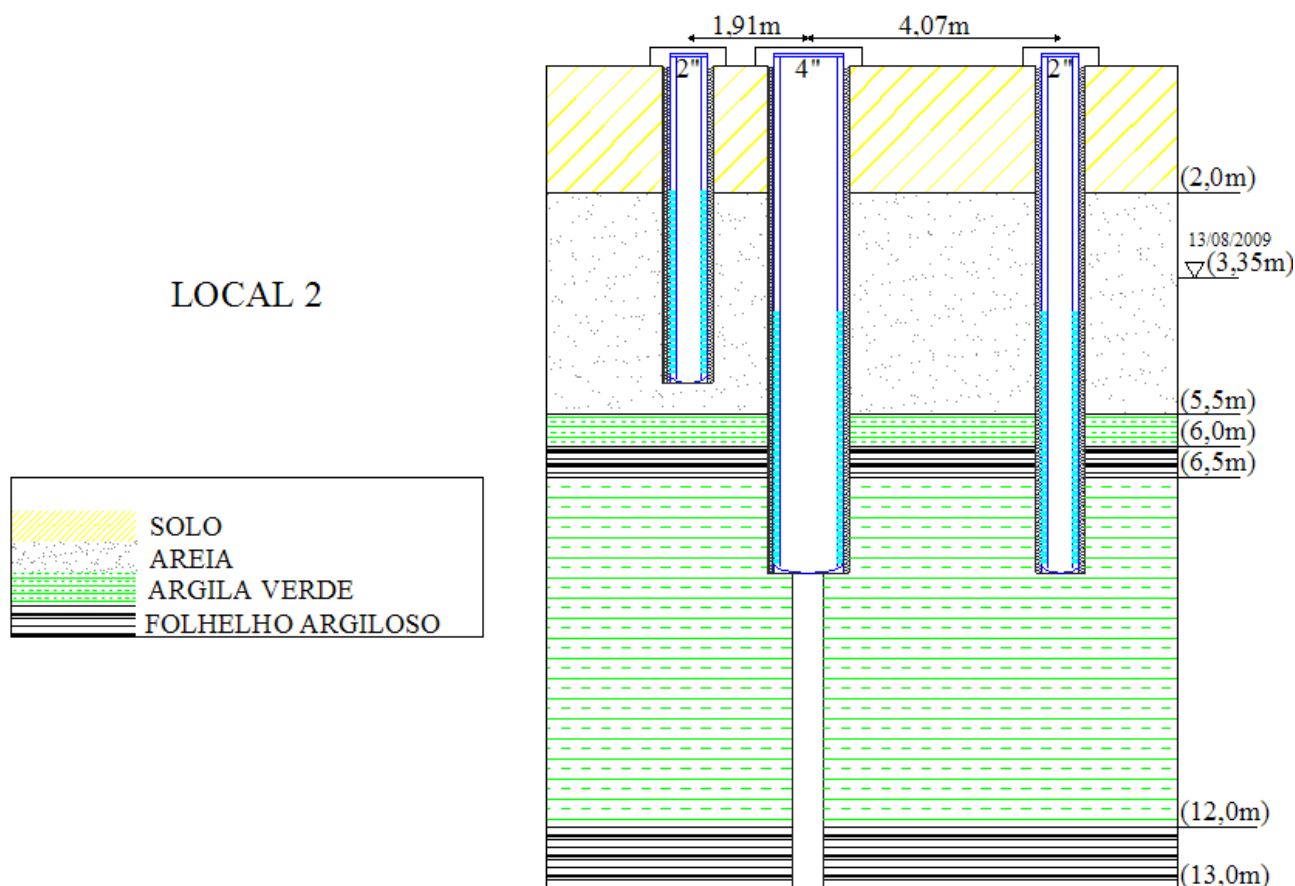


Figura 4. Esquema construtivo do Poço 2 e piezômetros auxiliares.

O Poço 3 (coordenadas UTM 443,863 km E e 7463,300 km N) foi construído dentro da área de aterro de uma cava abandonada, com a finalidade de determinar a influência desta nas características físico-químicas e bacteriológicas da água subterrânea do aquífero sedimentar quaternário. O Poço 4 (coordenadas UTM 443,696 km E e 7463,420 km N) foi construído junto a uma estrada que dá acesso a tabuleiros de cultivo de arroz. O Poço 5 (coordenadas UTM 443,200 km E e 7463,059 N) foi construído em uma área desmatada, mas com solo natural, próximo de uma cava em operação.

Em cada um dos 4 agrupamentos de piezômetros foi instalado um medidor de nível d'água automático, com registro de altura da água a cada 6 horas e que serve para monitorar a dinâmica do aquífero sedimentar quaternário frente a vários tipos de interferências de cobertura (mata natural ou

cultivo de arroz) ou de aberturas que seccionam os sedimentos aluvionares (cava abandonada ou cava em operação).

6.6. Interpretação dos testes de vazão

O poço 2 foi revestido em 4” até 8 m de profundidade, sendo que os 4 m finais foram revestidos com tubos de filtro, de PVC geomecânico azul, com ranhura de 0,5 mm. O perfil litológico mostra que o aquífero (constituído por depósitos de areia aluvionar quaternária) ocorre entre 2 e 5,5 m. Até 2 m ocorre um solo argiloso que confina o aquífero, pois é impermeável.

No dia 30/09/2009 foi realizado um teste de vazão, no Poço 2, utilizando uma motobomba de 5 HP, à gasolina, com tubos de entrada e saída em 2”, com vazão máxima de 10 m³/h e com medidas de nível d’água realizada nos piezômetros auxiliares, com duração de 5,5 horas de rebaixamento e 50 minutos de recuperação. Os dados do nível d’água, durante o bombeamento, sofreram grande variação (subidas e descidas de nível d’água) mas, contudo, o rebaixamento observado nos piezômetros (situados a 1,9 e 4,70 m, do poço bombeado) foi pequeno (máximo de 0,35 m). Devido às variações observadas durante o rebaixamento, preferiu-se interpretar os dados de recuperação que se apresentaram mais uniformes. Na Figura 5 é mostrada a interpretação dos dados de recuperação. A Transmissividade encontrada para os depósitos arenosos é muito alta ($T = 22,7 \text{ m}^2/\text{h}$) e o Coeficiente de Armazenamento ($S = 0,005$) sugere condições de algum confinamento devido à ação impermeável da camada de solo, sobreposta aos depósitos arenosos.

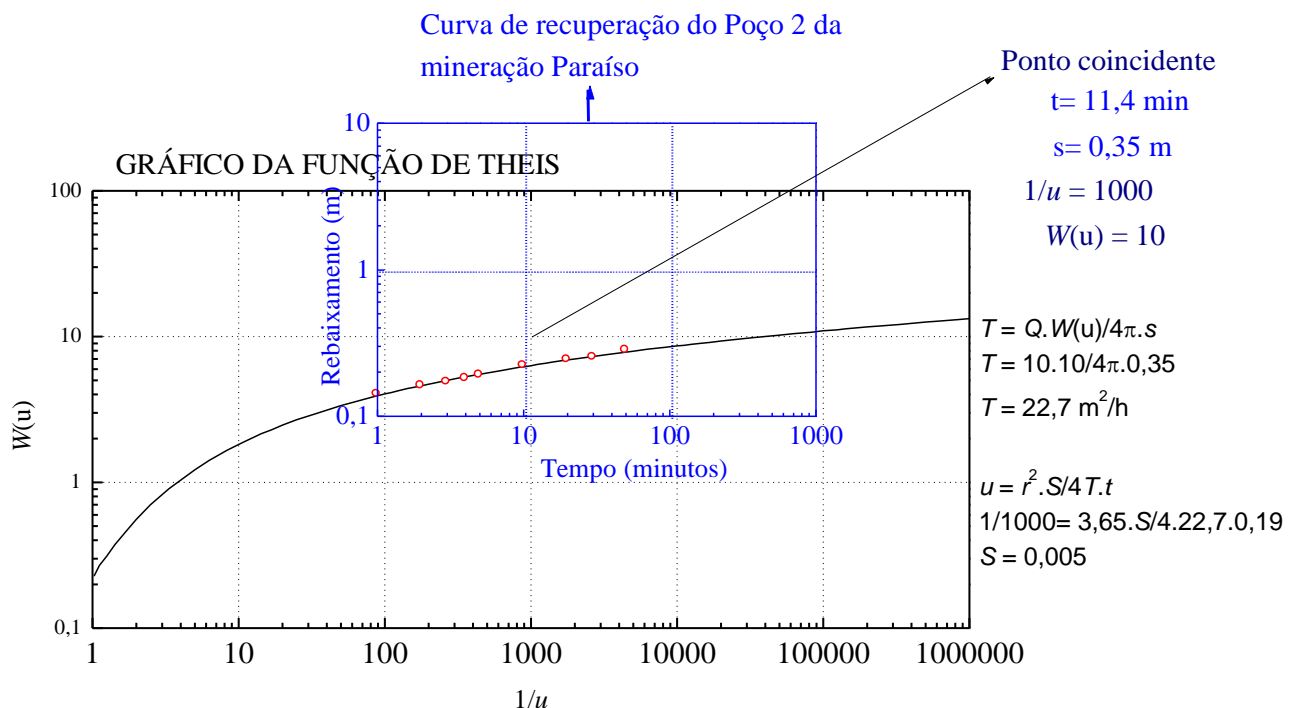


Figura 5. Interpretação do teste de vazão realizado no Poço 2 da mineração Paraíso.

Sabendo-se que a espessura do aquífero (b) no local é de 3,5 m (espessura da camada arenosa), temos: $T = K \cdot b$, ou seja: $22,7 \text{ m}^2/\text{h} = K \cdot 3,5 \text{ m}$, o que resulta em $K = 6,5 \text{ m/h}$ ou, ainda, K

= 156 m/dia. São valores extremamente altos de Condutividade Hidráulica (K) para a camada arenosa que indicam um ambiente muito permeável e altamente saturado.

Os valores de condutividade hidráulica encontrados, embora elevados, são coerentes com os obtidos por Turco e Buchmiller (2004) e com os modelos de interpretação de parâmetros hidrogeológicos de Kresic (1997).

No dia 06/11/2009 foi realizado um teste de vazão no Poço 5, com medidas de rebaixamento e recuperação nos piezômetros associados, denominados Piezômetro 1_5, situado mais próximo (a 1,63 m de distância do poço bombeado, o Poço 5) e Piezômetro 2_5, situado pouco mais distante (a 2,59 m de distância do poço bombeado, o Poço 5). Na Figura 6 é mostrada a interpretação do teste de vazão para o rebaixamento medido no Piezômetro 2_5.

Houve quatro ensaios de bombeamento, que são: rebaixamento no Piezômetro 1_5, recuperação no Piezômetro 1_5, rebaixamento no Piezômetro 2_5 e recuperação no Piezômetro 2_5. Em cada um dos respectivos ensaios foram obtidos os seguintes parâmetros hidrodinâmicos: $T = 62 \text{ m}^2/\text{h}$ e $S = 4,4 \cdot 10^{-5}$, $T = 68,5 \text{ m}^2/\text{h}$ e $S = 4 \cdot 10^{-5}$, $T = 50 \text{ m}^2/\text{h}$ e $S = 6,26 \cdot 10^{-6}$ e $T = 76,6 \text{ m}^2/\text{h}$ e $S = 5,8 \cdot 10^{-6}$.

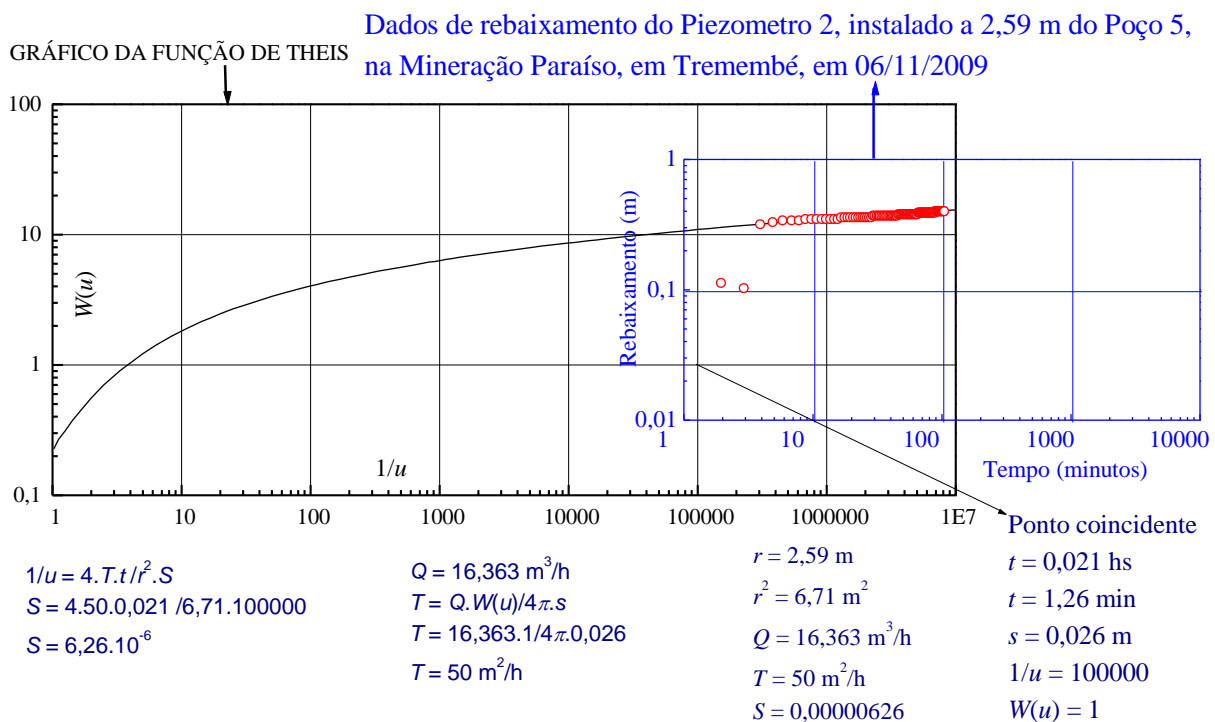


Figura 6. Interpretação do teste de vazão realizado no Poço 5, com medidas de rebaixamento realizadas no Piezômetro 2_5.

A média para os parâmetros do aquífero constituído pelos sedimentos arenosos quaternários da várzea do rio Paraíba do Sul, no local do Poço 5 são: Transmissividade igual a $64,3 \text{ m}^2/\text{h}$ e Coeficiente de Armazenamento igual a $2,4 \cdot 10^{-5}$. Com esta média de Transmissividade e considerando que a espessura para a camada saturada do aquífero (b) é de 5,7 m, a média da Condutividade Hidráulica ($K = T/b$) atinge valores da ordem de 11,3 m/h (muito alta considerando

que K , para areias limpas é da ordem de 1 a 2 m/h). Estes parâmetros hidrodinâmicos obtidos mostram que o aquífero possui altíssima capacidade de transmitir água e qualquer rebaixamento do nível d'água em um determinado local se propaga rapidamente por grande distância e que, a velocidade do fluxo da água é muito alta. Assim sendo, íons dissolvidos, vírus e bactérias viajam facilmente pelas águas do aquífero que é muito poroso e permeável.

No dia 17/12/2009 foi realizado um teste de vazão no Poço 4 (vazão de 11,25 m³/h), com medidas de rebaixamento e recuperação em um dos piezômetros associados, denominado Piezômetro 2_4, situado a 2,87 m de distância do poço bombeado. Na Figura 7 é mostrada a interpretação do teste de vazão com os dados de recuperação obtidos no Piezômetro 2_4.

Os parâmetros hidrodinâmicos obtidos para o aquífero constituído pelos sedimentos arenosos quaternários da várzea do rio Paraíba do Sul, no local do Poço 4 são: Transmissividade igual a 30 m²/h e Coeficiente de Armazenamento igual a 2,2.10⁻⁵. Com este valor de Transmissividade e considerando que a espessura para a camada saturada do aquífero (b) é de 6,5 m, a Condutividade Hidráulica ($K = T/b$) é de 4,6 m/h (bastante elevada, portanto). Estes parâmetros obtidos (Transmissividade, Coeficiente de Armazenamento e Condutividade Hidráulica) mostram que o aquífero possui alta capacidade de transmitir rapidamente e por longas distâncias quaisquer eventos (rebaixamentos, recuperações, íons, compostos, vírus, bactérias, etc.) que ocorram nas águas subterrâneas.

Dados de recuperação do Piezometro 2, instalado a 2,87 m do Poço 4, na Mineração Paraíso, em Tremembé, em 17/12/2009

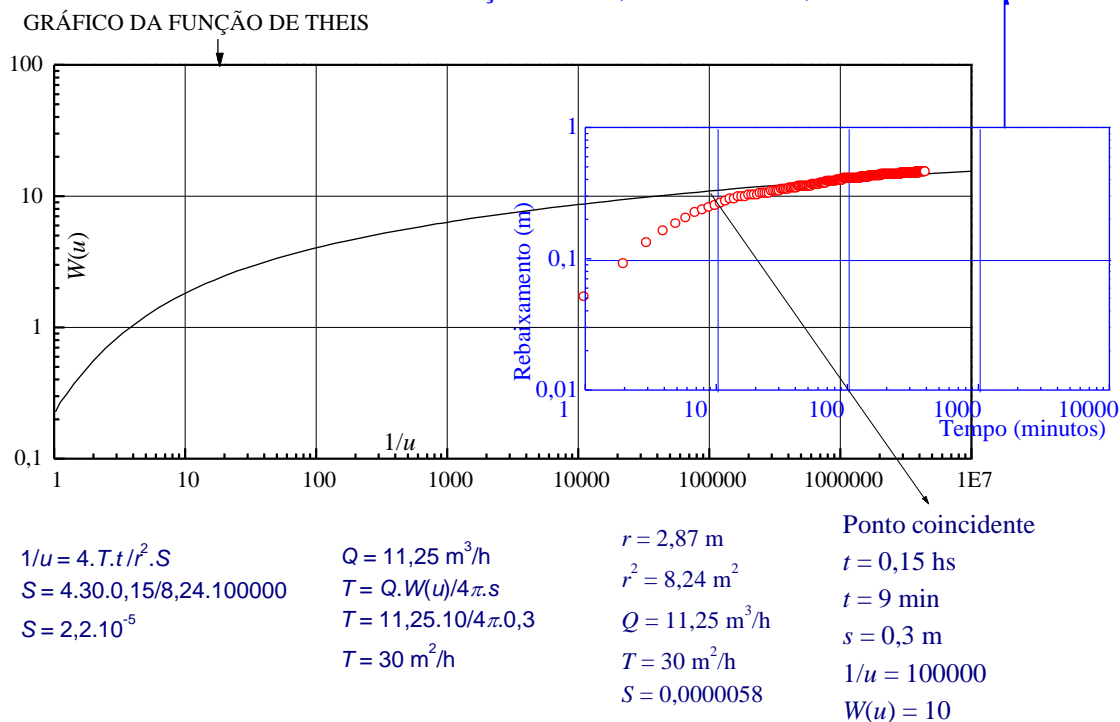


Figura 7. Interpretação do teste de vazão realizado no Poço 4, com medidas de rebaixamento realizadas no Piezômetro 2_4.

6.7. Análises físico-química e bacteriológica das águas superficiais e subterrâneas

As águas subterrâneas dos poços de 4", as águas superficiais da cava abandonada ao lado do Poço 3 e do ribeirão ao lado do poço 5 foram amostradas e serão monitoradas quanto à qualidade físico-química e bacteriológica. Os resultados de novembro de 2009 são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados das análises físico-químicas e bacteriológicas.

Local	Data	Nível d'água (m)	pH	Conduct. (µS/cm)	Turb. (NTU)	O ₂ Dissolv. (mg/L)	Temp. (°C)	STD (mg/L)	Eh (mV)
Poço 2	10/11/2009	2,68	5,51	270	39	400	21,4	170	+ 6
Poço 3	10/11/2009	1,37	5,3	210	28	1100	20,3	140	+ 62
Poço 4	10/11/2009	4,75	5,71	170	61	1500	22,4	110	+ 49
Poço 5	10/11/2009	1,7	5,57	170	130	900	22,3	110	+ 30
Ribeirão junto do Poço 5	10/11/2009	*	6,61	30	89	8800	28,6	20	+ 80
Cava abandonada distante 5 m do poço 3	10/11/2009	*	5,58	50	320	1100	26,9	20	+ 116

6.9. Variações dos níveis d'água do aquífero sedimentar quaternário

Medidas de níveis obtidas nos piezômetros comparadas com o levantamento planialtimétrico realizado na área, mostram que os níveis d'água do aquífero sedimentar quaternário são diferentes em cada ponto medido e não constitui um plano. Este fato condiz com as variações da capa impermeável de solo, que confina o aquífero (mais ou menos) conforme a espessura do solo. Assim sendo a pressão no topo do aquífero é variável e faz com que a água subterrânea esteja sujeita a uma pressão variável com a consequente variação do nível d'água em cada ponto.

Em 03/12/2009 foi instalado em um piezômetro situado a 4,07 m do Poço 2, um medidor automático de nível d'água, precisão de leitura de 1 cm e calibrado para medidas espaçadas de 6 em 6 hs (4 medidas por dia). Os resultados obtidos são mostrados na Figura 8.

Observa-se, nos gráficos da Figura 8, que não há uma relação consistente entre os dados de subida de nível d'água (linha vermelha) obtidos no piezômetro situado próximo ao Poço 2, com os dados de precipitações (colunas verdes) obtidos na estação climatológica situada no Posto Meteorológico da Universidade de Taubaté (Plataforma de Coleta de Dados - PCD) situada no Departamento de Ciências Agrárias, no Bairro Itaim, em Taubaté. Esta falta de consistência dos dados de chuva com os níveis d'água mostram que as subidas do nível de água do aquífero sedimentar quaternário estão relacionadas com equivalentes subidas de níveis d'água do rio Paraíba do Sul, já que este corta os sedimentos arenosos quaternários em toda a sua extensão e profundidade no município de Tremembé, e não diretamente com as quantidades de chuvas.

Observa-se, também, que os níveis d'água (controlados pelo nível d'água do rio Paraíba do Sul) sobem até atingirem o patamar de 1,82 m. Este patamar é constituído pelo topo do aquífero sedimentar quaternário no Local 2. Este patamar constitui a profundidade máxima, no local, do solo argiloso, impermeável, e que confina o aquífero sedimentar quaternário, não permitindo que a água

deste continue a subir, mesmo quando o nível da água do rio Paraíba do Sul é mais alto que a profundidade máxima do solo.

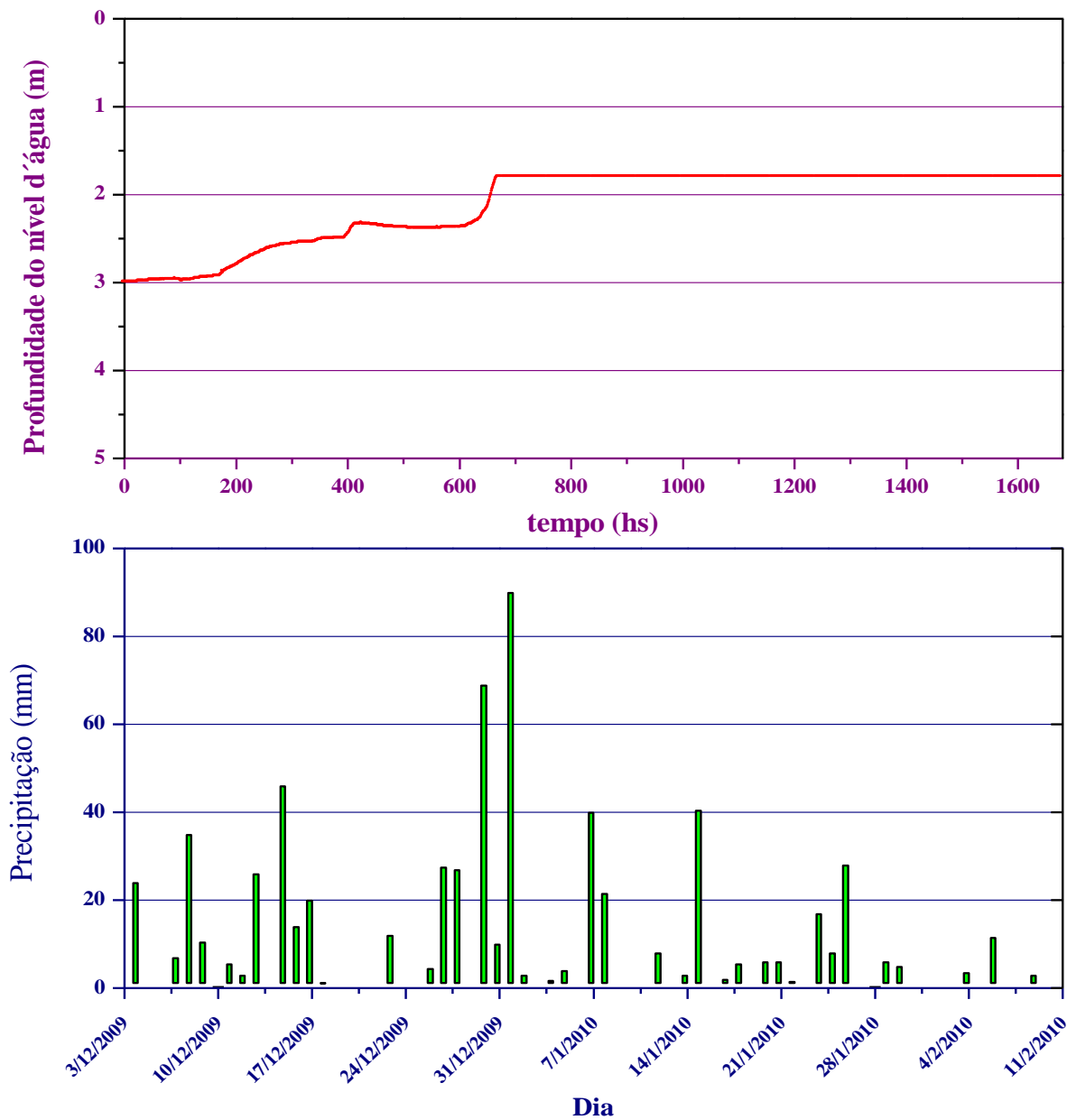


Figura 8. Gráficos com as variações dos níveis d'água do aquífero freático no local do Poço 2 (linha vermelha) e as precipitações em Taubaté (colunas verdes), obtidos entre 03/12/2009 e 11/02/2010.

Em 06/01/2010 foi instalado um medidor automático de nível d'água no piezômetro situado a 2,87 m do Poço 4, com precisão de 1 cm, e calibrado para leituras a cada 6 hs. Os dados obtidos são mostrados no gráfico da Figura 9.

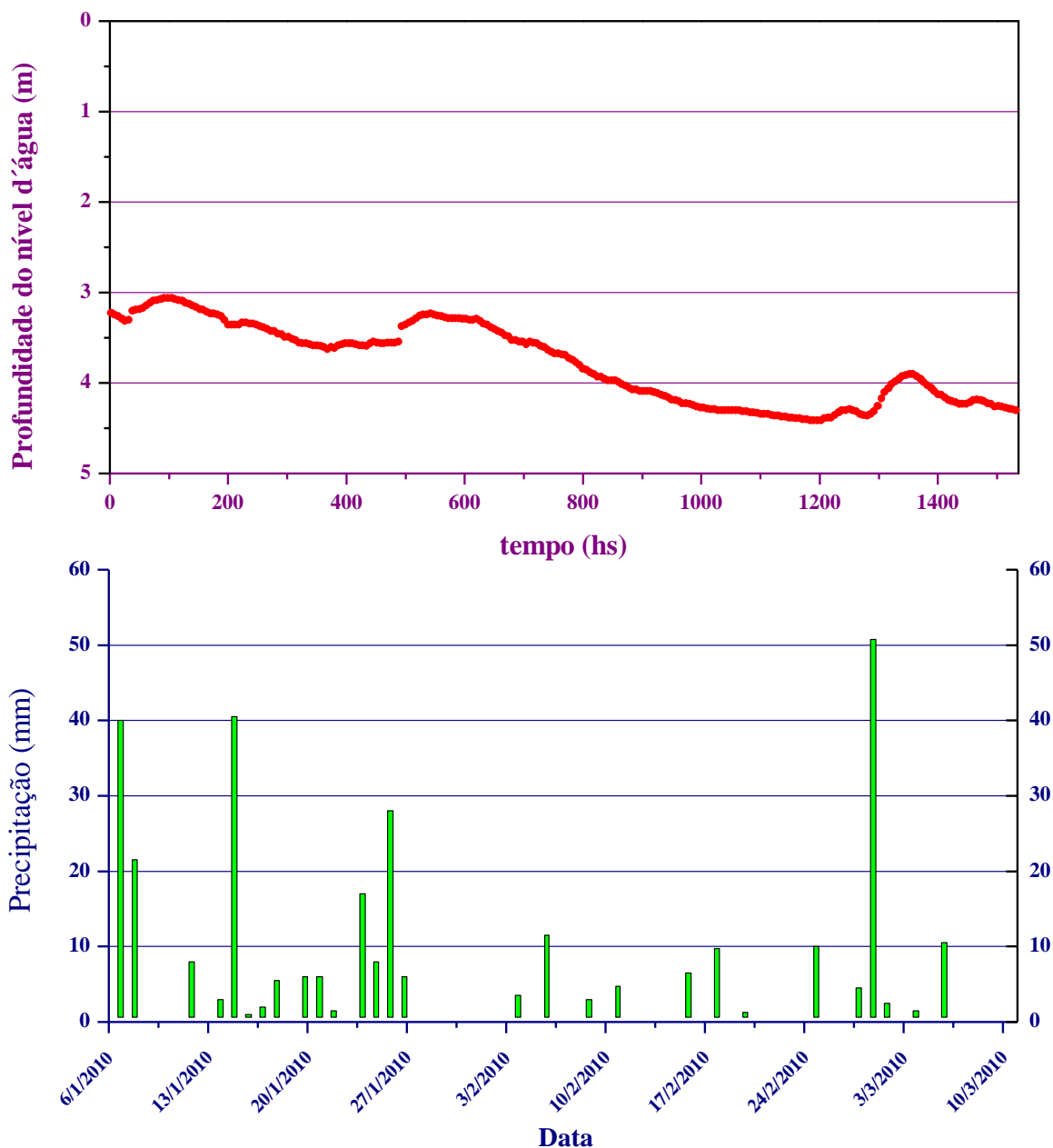


Figura 9. Gráficos com as variações dos níveis d'água do aquífero freático no local do Poço 4 (linha vermelha) e as precipitações na área de Taubaté (colunas verdes), obtidos nos mesmo período de tempo, entre 06/01/2010 e 11/03/2010

Observa-se no gráfico da Figura 9 que há uma relação mais consistente entre as subidas do nível d'água e as precipitações, no Local 4.

7. CONCLUSÕES

Os levantamentos efetuados neste trabalho mostram que o aquífero sedimentar quaternário está exposto, sem qualquer cobertura, em grande parte da área da várzea do rio Paraíba do Sul. Isto é causado pela grande quantidade de cavas abandonadas e em operação no local. A mineração de areia, na área investigada, mostrou ser uma atividade predatória, pois os depósitos aluvionares quaternários somente são explorados em sua parte superior. Isto é causado pelo tipo de exploração, que usa o método da dragagem dos depósitos de areias misturado com a água do aquífero.

Observou-se que, as características químicas das águas do aquífero sedimentar quaternário são grandemente influenciadas pela exposição das cavas ao ar atmosférico e também, a água das cavas é grandemente influenciada pelas características químicas do aquífero sedimentar quaternário. Assim sendo, encontra-se águas de pH em torno de 5,5 (o pH da água da chuva é 7) indicando ação de dissociação do gás carbônico dissolvido nas águas das chuvas e nas raízes enterradas e condiz com um pH do aquífero sedimentar quaternário. Ocorre oxigênio dissolvido nas águas subterrâneas do aquífero sedimentar quaternário e mostram influência da água em contato direto com o ar atmosférico. Condiz com águas superficiais.

Verifica-se que, os níveis da água subterrânea do aquífero quaternário são grandemente influenciados pelo nível da água do rio Paraíba do Sul, já que este rio corta o aquífero em toda a sua extensão, no município de Tremembé. Quando o nível da água deste rio sobe, invade o aquífero sedimentar quaternário, e traz grande quantidade de vírus e bactérias provenientes dos lançamentos de esgotos não tratados, à montante, contaminando as águas subterrâneas, já que o aquífero sedimentar quaternário possui alto valor de Transmissividade e, também, de Coeficiente de Armazenamento. Quando as águas do rio descem o nível de água do aquífero, também desce, pois o gradiente hidráulico do rio interage com o aquífero e produz rápido escoamento das águas subterrâneas.

Por outro lado, a atividade agrícola, representada pelo plantio de arroz inundado aparentemente não causa grandes problemas ambientais ao aquífero subjacente, mesmo com o uso de herbicidas e pesticidas organoclorados, graças à presença de um solo argiloso, formado por argilas orgânicas, e praticamente impermeável.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BUENO, B.S.; VILAR, O.M. 1984. Mecânica dos Solos. Escola de Engenharia de São Carlos/Departamento de Geotecnia, Publicação 004/85, São Carlos, 131 p.
- D'ANGIOLELLA, G.L.B.; VASCONCELLOS, V.L.D. 2002. Cálculo do balanço hídrico climatológico com diferentes métodos para estimativa da evapotranspiração potencial, em

planilhas ExcelTM. Congresso Brasileiro de Meteorologia, 12, Foz do Iguaçu, Setembro/2002. Trabalho em CD-ROM.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. 2009a. IBGE Cidades@, São Paulo, Tremembé. Consultado em 11/09/2009 em <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. 2009b. IBGE Cidades@, São Paulo, Censo Agropecuário 2006. Consultado em 11/09/2009 em <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>

KRESIC, N. 1997. Hydrogeology and groundwater modeling. Lewis Publishers, Boca Ration, Florida, 461 p.

NOGUEIRA, J.B. 1995. Mecânica dos solos – Ensaio de laboratório. EESC-USP, São Carlos, 248 p.

PANACHUKI, 2003. Infiltração de água no solo e erosão hídrica, sob chuva simulada, em sistema de integração agricultura-pecuária. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campus de Dourados, Dourados, 67 p.

PREVEDELLO, C.L. 1996. Física do solo com problemas resolvidos. Ed. SAEAFS, Curitiba, 446p.

REIS, B.J. 2005. Avaliação da expansão da atividade de extração de areia na planície aluvial da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul no trecho entre Jacareí e Pindamonhangaba no período de 1993 a 2003. Dissertação de Mestrado em Ciências Ambientais, Universidade de Taubaté, Taubaté, 112 p.

RUSHTON, K. R.; WARD, C. 1979. The Estimation of Ground Water Recharge. Journal of Hydrology, Washington, 40, p.49-65.

SANTORO, J. 1991. Fenômenos erosivos acelerados na região de São Pedro – S.P. Estudo da fenomenologia com ênfase geotécnica. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 140 p.

TURCO, M.J.; BUCHMILLER, R.C. 2004. Simulation of ground-water flow in the Cedar River alluvial aquifer flow system, Cedar Rapids, Iowa. U.S.Geological Survey Scientific Investigations, Report 2004-5130, Reston, Virginia, 39 p.