

CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DO AQUÍFERO FREÁTICO NO CEMITÉRIO DE VILA NOVA CACHOEIRINHA, MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

Bolivar Matos¹; Alberto Pacheco²; Douglas Bastianon² & Édson Batello³

Resumo - O presente trabalho é parte de um projeto de doutoramento realizado no Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, entre 1997 e 2001, que avaliou a ocorrência e o transporte de microrganismos no aquífero freático do cemitério de Vila Nova Cachoeirinha, município de São Paulo. Nesta parte do projeto, mostramos os estudos de investigação para caracterizar o aquífero freático no cemitério. Apresentamos os resultados das investigações geofísicas, sondagens geológicas, coleta e análise de amostras de solo, testes para determinação da condutividade hidráulica do meio e teste de traçador para determinação da dispersividade. Os resultados mostram que, no cemitério, o embasamento está a cerca de 9,0 m de profundidade na cota mais baixa e 20,5 m no topo. O nível freático encontra-se entre 4,0 e mais de 16,0 m de profundidade. O solo do cemitério é formado pelo material de alteração das rochas graníticas, de caráter predominantemente argiloso (~ 43% de argila), pH =5,0, matéria orgânica entre 0,7 e 4,2% e capacidade de troca de cátions entre 10,2 e 109,0 mmolc/kg. A fração argila é constituída principalmente por caulinita e óxidos de ferro e alumínio. A condutividade hidráulica do aquífero varia de $2,90 \times 10^{-8}$ a $8,41 \times 10^{-5}$ m/s. O gradiente hidráulico na porção oeste do cemitério é de aproximadamente 0,07 m/m; considerando o meio homogêneo e isotrópico e uma porosidade efetiva de 2%, a velocidade linear média foi estimada em 8 cm/dia.

Abstract - This work is part of a PhD project that took place at the Instituto de Geociências of the Universidade de São Paulo, between 1997 and 2001. The project assessed occurrence and transport of microorganisms in the unconfined aquifer of Vila Nova Cachoeirinha cemetery, located on pre-cambrian terrains at the northern zone of the city of São Paulo. In this part of the project, we show the results of the geophysical studies, soil samples, hydraulic conductivity determination and tracer test for dispersivity measurement. The results show that, in Vila Nova Cachoeirinha cemetery, the depth to the bedrock is about 9.0 m at small elevation areas and 20.5 m at the top of the hill. The

¹ Agência Nacional de Águas, Setor Policial Sul, Área 5, Quadra 3, Bloco L, Sala 219, 70610-200, Brasília-DF, 61-445.5346, bolivar@ana.gov.br

² Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, Rua do Lago 562, Cidade Universitária, 05508-900, São Paulo-SP, 11-3091.4239, apacheco@usp.br

³ Golder Associates Brasil Ltda., Av. Ceci 1676, Planalto Paulista, 04065-002, São Paulo-SP, 11-5594.3200, abatello@golder.com.br

depth to the water table varies from 4 to over 16 m. The soil is formed by the weathered material of the granite rocks, clay content of 43%, pH = 5,0, cation exchange capacity between 10.2 and 109.0 mmolc/kg. The hydraulic conductivity of the aquifer varies from 2.90×10^{-8} to 8.41×10^{-5} m/s. The hydraulic gradient at the western part of the study area is about 0.07 m/m; considering a homogeneous and isotropic medium and an effective porosity of 2%, the average linear velocity was estimated in 8 cm/day.

Palavras-chave - Hidrogeologia, cemitérios, aquífero freático, São Paulo

INTRODUÇÃO

O presente trabalho é resultado de um projeto de doutoramento (MATOS, 2001) realizado no Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, entre 1997 e 2001, que avaliou a ocorrência e o transporte de microrganismos no aquífero freático do cemitério de Vila Nova Cachoeirinha, município de São Paulo. A metodologia aplicada foi dividida em etapas de laboratório e de campo. No laboratório, foram montadas colunas de solo do cemitério. Traçadores químico e biológico foram injetados nas colunas e o seu fluxo monitorado no efluente. Um modelo numérico foi usado para simular o transporte dos traçadores nas colunas. Em campo, foram realizadas investigações a fim de caracterizar o aquífero freático. O monitoramento da qualidade das águas foi realizado para estudar a ocorrência e o transporte de elementos químicos e biológicos (bactérias e vírus) nas águas subterrâneas.

O estudo mostrou que as sepulturas provocam um acréscimo na quantidade de sais minerais (bicarbonato, cloreto, sódio e cálcio), de metais (ferro, alumínio, chumbo e zinco), de bactérias heterotróficas, bactérias proteolíticas e clostrídios sulfito-redutores; causando ainda um decréscimo do oxigênio dissolvido nas águas subterrâneas (MATOS, *op. cit.*). Também foram encontrados enterovírus e adenovírus nas águas subterrâneas.

Nesta parte do projeto, mostramos os estudos de investigação de campo para caracterizar o aquífero freático no cemitério. Apresentamos os resultados das investigações geofísicas, sondagens geológicas, coleta e análise de amostras de solo, testes para determinação da condutividade hidráulica do meio e teste de traçador para determinação da dispersividade.

ÁREA DE ESTUDOS

Descrição geral

O cemitério de Vila Nova Cachoeirinha está localizado na Zona Norte do município de São Paulo (Figura 1). Possui uma área de 360.000 m², sendo menor apenas que o cemitério de Vila Formosa (763.000 m²), na cidade de São Paulo. Localizado em uma região dinâmica e de intensa urbanização, o em torno do cemitério é, em grande parte, constituído por residências e apartamentos modestos; pequenas casas de comércio; hospital e maternidade de Vila Nova Cachoeirinha; entre outros.

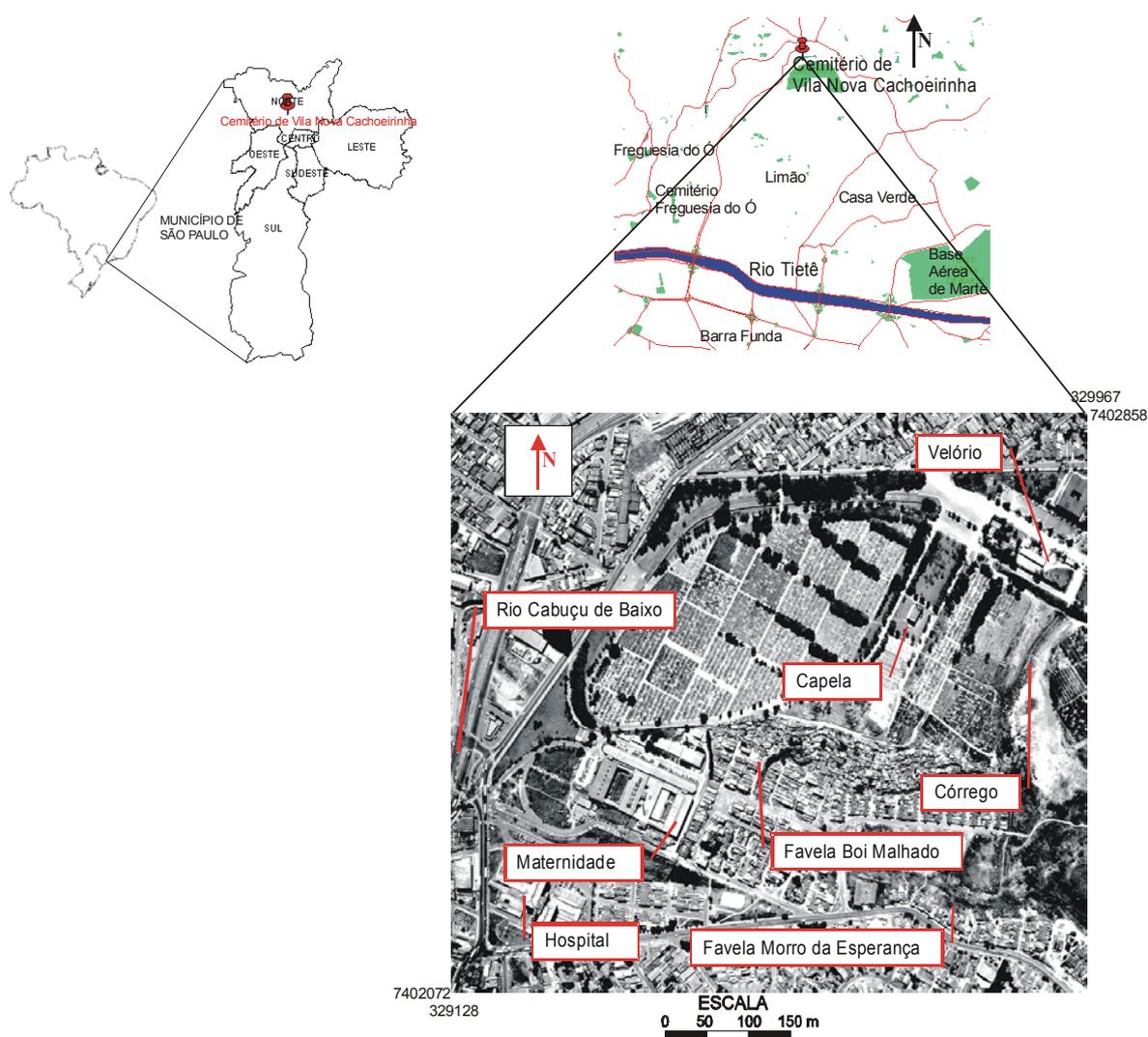


Figura 1. Localização do cemitério de Vila Nova Cachoeirinha

Geologia

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) está sobrejacente às rochas cristalinas, metamórficas e ígneas (85% da área) de idade Pré-Cambriana e às rochas sedimentares do Cenozóico (DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE, 1975). O cemitério de Vila Nova Cachoeirinha está localizado sobre o manto de alteração das rochas granitóides intrusivas que formam o maciço da Cantareira, próximo aos limites da bacia sedimentar de São Paulo.

O maciço da Cantareira “compreende um corpo de forma aproximadamente triangular, alongado segundo a direção NE-SW, estendendo-se desde os bairros de Pirituba-Vila Guedes (região norte da Capital), até o bairro Pirucaia (município de Mairiporã)” (DANTAS, 1990). A rocha é composta essencialmente por minerais de plagioclásio, biotita, microclíneo e quartzo (DAEE, *op. cit.*), dominando um caráter cálcio-alcálico peraluminoso (DANTAS, *op. cit.*).

MENDES *et al.* (1989) realizaram 6 sondagens elétricas na parte oeste do cemitério e verificaram que o topo da rocha se encontra entre 8 e 36 metros no local. A descrição litológica⁴ de um poço tubular construído pela GEOPLAN Poços Artesianos no Hospital Vila Nova Cachoeirinha (300 m a sudoeste da área estudada) mostra que a rocha granítica encontra-se a 12 m de profundidade no local. Dois poços⁵ perfurados pela JUNDSONDAS Poços Artesianos (800 m a sudoeste do cemitério) também apresentaram descrições litológicas semelhantes ao poço citado, um deles encontrando a rocha granítica a 18 m de profundidade.

Geomorfologia

Situado na unidade morfológica denominada Planalto Paulistano e inserido na bacia hidrográfica do Alto Tietê, o cemitério de Vila Nova Cachoeirinha encontra-se em terrenos de relevo formado por morros médios e altos com topos convexos (ROSS & MOROZ, 1997), em acordo com o Artigo 151 (Anexo 1) do Código Sanitário Estadual (SÃO PAULO, 1991), que afirma que os cemitérios devem ser construídos em áreas elevadas. No local, as altitudes estão entre 745 e 781 m e as declividades variam de 12 a 15%. Os sepultamentos são realizados ao longo de suas vertentes.

A drenagem apresenta um padrão dendrítico, às vezes obedecendo às direções estruturais regionais, mas em alguns casos pode ter traçados independentes. Com vales entalhados e densidade de drenagem média a alta, essa área apresenta um nível de fragilidade potencial médio, estando sujeita a fortes atividades erosivas (ROSS & MOROZ, *op. cit.*).

⁴ Ficha do poço tubular profundo fornecida pela Secretaria de Saúde do Estado de São Paulo (Hospital Vila Nova Cachoeirinha).

⁵ Banco de dados de poços do DAEE da Secretaria de Recursos Hídricos Saneamento e Obras do Estado de São Paulo.

Solos

Em geral, os solos ao norte da malha urbana da cidade são do tipo argissolos vermelho-amarelos. São solos com nítida diferenciação entre os horizontes, com teor de argila do horizonte B bem mais elevado que o horizonte A. Esses solos são ácidos e com saturação de bases baixa (LEPSCH, 1975). De acordo com OLIVEIRA *et al.* (1999), são solos com baixa capacidade de troca de cátions (<27 cmol/kg).

O solo do cemitério é proveniente da alteração de granitos. Amostras de uma sondagem geológica realizada por TÔRRES (1992), na porção oeste do cemitério, mostraram a predominância de materiais argilosos e argilo-arenosos, em que a porosidade média, determinada em lâminas, diminui de 9,8 para 2,12% com o aumento da profundidade, em um perfil de 0 a 4 m.

Precipitação e clima

A cidade de São Paulo tem precipitação média anual de 1.300 mm (DAEE, 1975), sendo que as chuvas são mais intensas durante o verão do hemisfério sul. As chuvas no cemitério foram estimadas a partir do posto pluviométrico Santana (Código: E3-071, Altitude: 760 m, Latitude: 23°30'S, Longitude: 46°36'W) que está em operação desde 1936 (DAEE, 1998). Neste posto, a precipitação média é de 1.400 mm por ano.

A precipitação na Zona Norte da cidade é influenciada por efeitos orográficos locais e, principalmente, pelo clima da região, que segundo SILVA (2000), é do tipo tropical temperado de altitude. A temperatura média anual é de 25°C, e as médias mensais oscilam entre 27°C, em fevereiro, e 12-14°C, em julho. A evaporação potencial fica entre 1.000 e 1.300 mm por ano (DAEE, 1975).

Águas superficiais

O cemitério de Vila Nova Cachoeirinha está situado a 100 m da margem esquerda do rio Cabuçu de Baixo, afluente do rio Tietê, à margem direita. A bacia hidrográfica do rio Cabuçu de Baixo tem aproximadamente 50 km², sua drenagem - e de seus pequenos tributários - é influenciada pela intensa urbanização da área, desde o limite da Reserva Florestal da Cantareira (região da nascente) até a foz, que está situada próxima da ponte da Freguesia do Ó. É notável a intervenção no escoamento natural pelos processos antrópicos de impermeabilização do solo e canalização do rio e de córregos. Comum em áreas urbanas brasileiras, o rio Cabuçu de Baixo é utilizado para escoar parte dos resíduos sólidos e esgotos gerados naquela região.

Águas subterrâneas

As águas subterrâneas na RMSF são exploradas de dois sistemas aquíferos principais, o cristalino e o sedimentar da bacia de São Paulo.

O sistema aquífero cristalino na RMSF pode ser dividido em duas unidades distintas. A parte superior, com espessura média de 50 m, é formada por materiais de caráter argiloso procedentes do manto de intemperismo das rochas subjacentes e por depósitos alóctones, enquanto a parte inferior é constituída pela rocha sã fraturada, apresentando características de aquífero livre ou localmente confinado (DAEE, 1975). REBOUÇAS & CAVALCANTE (1987) *apud* MENEGASSE (1991) apresentam as seguintes características hidráulicas para o aquífero cristalino: terço superior do perfil: $K = 10^{-6}$ a 10^{-7} m/s, $n_e = 0,1$ a $2,0\%$; zona de material friável: $K = 10^{-4}$ a 10^{-5} m/s, $n_e = 2$ a $5,0\%$; zona de rocha fraturada: $K = 10^{-3}$ a 10^{-5} m/s.

No cemitério de Vila Nova Cachoeirinha, as sondagens elétricas realizadas na parte oeste mostraram que o nível freático estava em profundidades de 4 a 9 metros (MENDES *et al.* 1989). As sondagens também indicaram a existência de aquífero suspenso no local. Piezômetros construídos por TÔRRES (1992b), no extremo oeste do local, mostram que o nível freático encontra-se entre 4,30 e 5,30 m de profundidade.

MÉTODOS

Geofísica

Sondagens elétricas verticais (SEVs) e caminhamentos eletromagnéticos (EMs) foram utilizados para obter informações sobre o subsolo do cemitério. Oito SEVs foram realizadas para obter as profundidades aproximadas do topo da camada saturada e do embasamento cristalino. A configuração dos eletrodos foi a de Schlumberger, com abertura máxima entre os eletrodos de corrente de 320 m. O equipamento utilizado foi um transmissor de corrente contínua (Marca Tectrol, Modelo: TDC 1000/12, P=500 W), um receptor (milivoltímetro com precisão de 0,2 mV), eletrodos de corrente e de potencial, e fios. Um modelo de camadas geoeletricas foi ajustado aos dados de campo para cada sondagem.

Quinze EMs foram executados no cemitério, para identificar anomalias de condutividade elétrica e associá-las à presença de contaminação no subsolo, totalizando 3.490 m de percurso. A distância entre o receptor e o transmissor foi fixada em 10 m, garantindo uma profundidade de penetração de aproximadamente 15 m com o campo eletromagnético vertical à superfície, e de 7,5 m com o campo horizontal à superfície. Os locais que apresentaram maior condutividade elétrica foram escolhidos para a realização das sondagens geológicas, instalação dos poços de

monitoramento e coleta de amostras. Utilizou-se o equipamento EM 34-3 da Geonics, com bobinas transmissora e receptora.

Coleta e análise de amostras de solo

Sete sondagens a trado foram executadas no cemitério para a investigação das características do solo, seguindo as recomendações da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA - ABGE (1990).

Dezenove amostras de solo foram coletadas em profundidades de 0 a 20, 80 a 100, 140 a 160 cm ou até encontrar o nível de água. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos transparentes de alta resistência e enviadas para análises física e química no Laboratório de Análises de Solo da Escola Superior de Agricultura Luíz de Queiroz (ESALQ) da USP.

O solo foi analisado para determinar a textura, o pH, a quantidade de matéria orgânica, a capacidade de troca de cátions e a presença de Ca^+ , Mg^+ , P e K^+ . A granulometria foi determinada por tamisação e pelo método do densímetro (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 1997). A classificação textural foi realizada através do diagrama triangular adotado pela SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO *apud* PREVEDELLO (1996). O potencial foi medido por meio de eletrodo combinado imerso em uma suspensão solo:líquido (água, KCl e CaCl_2). Ca^+ , Mg^+ , P e K^+ foram extraídos das amostras através de resinas de troca iônica. A determinação de P foi realizada por colorimetria, a de Ca^{+2} e Mg^{+2} por espectrofotometria de absorção atômica e a de K^+ por fotômetro de chama. A quantidade de matéria orgânica presente na amostra foi calculada pelo método de Walkley-Black (EMBRAPA, *op. cit.*). A capacidade de troca de cátions foi obtida a partir da soma total dos cátions que o solo pode reter na superfície coloidal (EMBRAPA, *op. cit.*).

As amostras de solo coletadas durante a construção dos vinte poços de monitoramento foram levadas para o Laboratório de Sedimentologia do Instituto de Geociências da USP para análise textural e preparação de lâminas da fração de argila para identificação de minerais. A granulometria foi determinada por tamisação e pipetagem (EMBRAPA, *op. cit.*). As frações de argila foram dispostas em lâminas de vidro para análise mineralógica realizada pelo Laboratório de Difractometria de Raios X do Instituto de Geociências da USP. As frações de argila das amostras, cujas análises mineralógicas não foram conclusivas, foram submetidas à análise química total realizada no Laboratório de Fluorescência de Raios X do Instituto de Geociências da USP, onde foram determinados SiO_2 , Al_2O_3 , MnO, MgO, CaO, Na_2O , K_2O , TiO_2 , P_2O_5 , Fe_2O_3 e perda ao fogo.

Monitoramento do aquífero

Vinte poços de monitoramento foram construídos no cemitério de Vila Nova Cachoeirinha, de acordo com a norma NBR 13.895 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (1997), entre dezembro de 1998 e agosto de 1999, para monitorar a carga hidráulica do aquífero livre, a qualidade da água subterrânea e a realização de testes de traçador.

A localização dos poços (Figura 2) foi definida através dos estudos eletromagnéticos já citados. As áreas que apresentaram maiores valores de condutividade elétrica foram escolhidas para a instalação dos poços. Três dos vinte poços foram construídos para servirem como valores de fundo, sendo localizados em áreas a montante das sepulturas (P11) ou com o nível d'água profundo (P6 e P8). Como o teste preliminar tipo *slug*, realizado no furo de sondagem ST-1 em 24/05/98, mostrara uma baixa condutividade hidráulica ($1,07E-6$ m/s) e as sondagens geológicas indicaram alto teor de argila, alguns poços (P1 a P4; P12 a P20) foram espaçados de 0,5 a 3 m para a aplicação de testes de traçador.

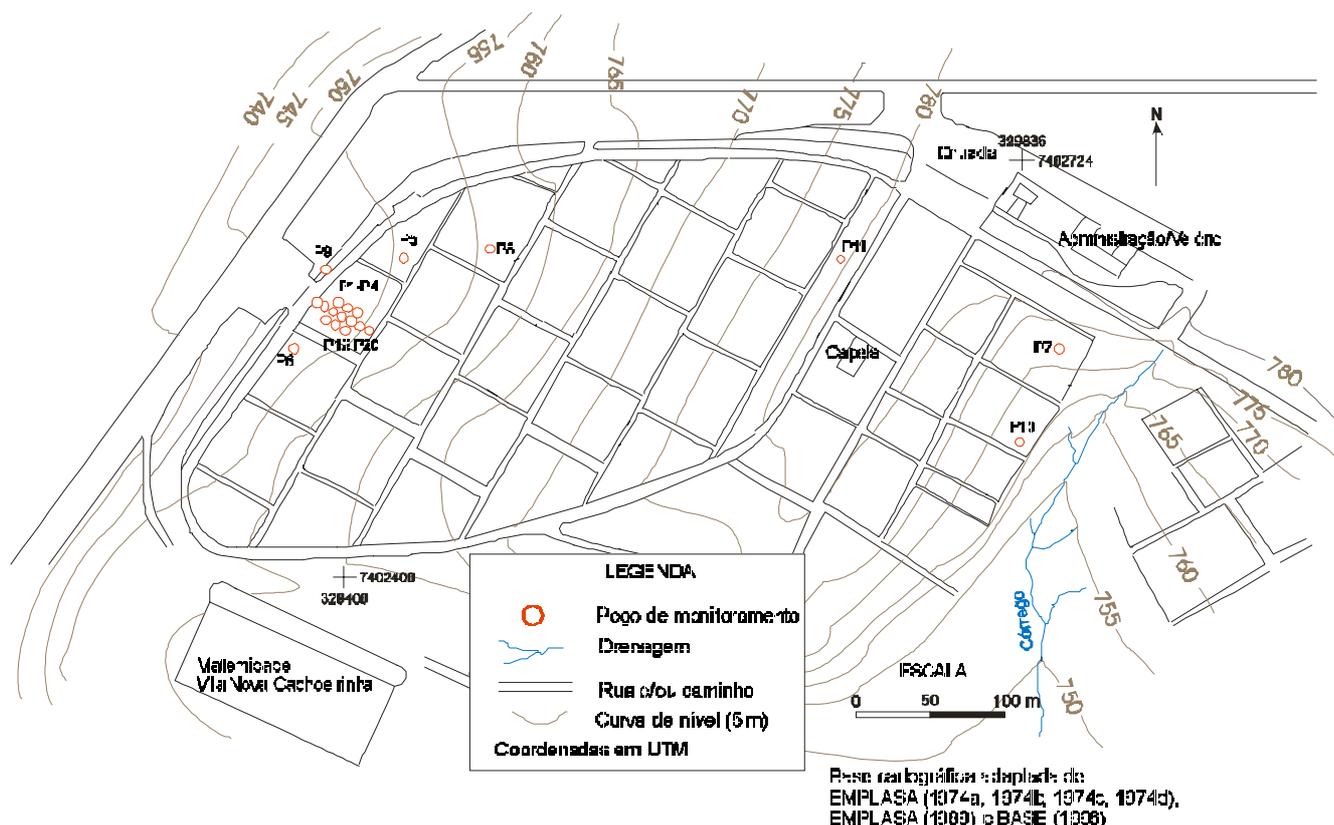


Figura 2. Localização dos poços de monitoramento

Os poços foram construídos para que atingissem a profundidade de 1 m abaixo do nível freático. As cotas dos poços foram determinadas a partir do levantamento aerofotogramétrico realizado pela EMPRESA DE PLANEJAMENTO DA GRANDE SÃO PAULO - EMLASA (1974a, 1974b, 1974c, 1974d), pelo nivelamento geométrico realizado em campo e por rastreamento por satélites através de instrumentos de GPS. Os poços P1, P5 a P10 e P18 possuem filtros de 1,00 m. Os poços P2 a P4 e P12 a P17 – a jusante do poço injetor (P1) - foram construídos

com filtros de 0,50 m para evitar diluições das amostras nos testes de traçador. Os poços P11, P19 e P20 possuem filtros maiores (2,00, 3,00 e 2,24 m, respectivamente) para o monitoramento do nível freático com maior segurança.

Determinação da condutividade hidráulica e teste de traçador

Testes tipo *slug* foram feitos nos poços de monitoramento para determinar a condutividade hidráulica *in situ*. A condutividade hidráulica K foi determinada através da solução analítica proposta por HVORSLEV (1951) *apud* FETTER (1994) para um poço parcialmente penetrante em um aquífero livre.

Uma solução saturada de NaCl e água destilada (40 L) foi introduzida no aquífero freático através do poço de monitoramento P1. As mudanças de condutividade elétrica de amostras de águas subterrâneas foram monitoradas ao longo do tempo no poço injetor e em poços de observação a jusante (P2, P3, P4, P12, P13, P14, P15, P16, P17, P18, P19) a fim de acompanhar o deslocamento da pluma de NaCl.

Os dados observados foram ajustados a um modelo numérico de fluxo de água subterrânea e de transporte de massa para estimar a dispersividade α . A ferramenta utilizada para a solução numérica das equações foi o pacote de *softwares* chamado Visual MODFLOW da WATERLOO HYDROGEOLOGIC (1998). A área modelada é aquela onde estão concentrados os poços P1 a P4 e P12 a P20. As condições de contorno foram definidas para o aquífero freático, com cargas hidráulicas especificadas nos poços P20 e P19. Ao poço P1 foi acrescentada a carga hidráulica observada durante a injeção do traçador químico. O modelo foi simulado em uma dimensão, em regime transiente, e calibrado através das observações dos poços de monitoramento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Sondagem elétrica e caminhamento eletromagnético

A Tabela 1 mostra os valores de espessura (m) e resistividade (ohm.m) determinados pelos modelos geoeletricos e as profundidades inferidas do topo da camada saturada e do embasamento. De acordo com os modelos, o embasamento no cemitério está a uma profundidade de 9,0 m na cota mais baixa (SEV-8) e 20,5 m no topo (SEV-5). A profundidade até a camada saturada varia de 1,0 (SEV-8) a 12,1 m (SEV-5).

Tabela 1. Resultados dos modelos geoeletricos de camadas

Sondagem	Elétrica	Camada					Profundidade (m) (topo)	
		1	2	3	4	5	camada saturada	embasamento
SEV-1	Espessura (m)	1,0	3,0	10,0			4,0	14,0
	ρ (ohm.m)	220	680	165	520			
SEV-2	Espessura (m)	2,0	2,0	10,0			4,0	14,0
	ρ (ohm.m)	230	600	380	1.000			
SEV-3	Espessura (m)	1,5	4,0	10,0			5,5	15,5
	ρ (ohm.m)	90	500	350	550			
SEV-4	Espessura (m)	2,0	16,0				2,0	18,0
	ρ (ohm.m)	90	35	530				
SEV-5	Espessura (m)	3,5	2,1	6,5	8,4		12,1	20,5
	ρ (ohm.m)	264	38	730	91	700		
SEV-6	Espessura (m)	1,8	2,0	6,0	3,0		9,8	12,8
	ρ (ohm.m)	190	50	350	8	300		
SEV-7	Espessura (m)	2,5	14,0				2,5	16,5
	ρ (ohm.m)	450	150	1.400				
SEV-8	Espessura (m)	1,0	8,0				1,0	9,0
	ρ (ohm.m)	540	50	2.000				

Os matacões vistos próximos da área de estudo e as descrições lito-estratigráficas de poços anteriormente citados confirmam que o topo do embasamento encontra-se próximo à superfície do terreno. Não sabemos os locais precisos das sondagens elétricas realizadas por MENDES *et al.* (1989) - que apontaram profundidades do embasamento entre oito e trinta e seis metros no cemitério -, mas é provável que também sejam correspondentes a menor cota e ao topo do cemitério, respectivamente. Não foi possível confirmar a profundidade do embasamento, porque nenhum dos furos de sondagem chegou a ser perfurado até atingir a rocha sã.

As sondagens elétricas não foram capazes de estimar com precisão a profundidade do nível freático no local. A sondagem SE-8, por exemplo, infere uma camada condutiva a apenas 1 m de profundidade, mas os poços de monitoramento mostram que o nível freático encontra-se entre quatro e cinco metros no local. No topo do cemitério, a sondagem elétrica infere uma profundidade de 12,0 m até a camada saturada, mas o poço P11 mostra que o nível freático está a, no mínimo, 16,53 m de profundidade. As camadas condutivas, observadas em algumas das sondagens (SEV-5, SEV-6, SEV-8), devem ser associadas a material mais argiloso, que forma aquíferos suspensos

confirmados por ocasião das sondagens geológicas e anteriormente observados por MENDES *et al.* (1989). As análises granulométricas das amostras de solo mostraram o domínio da fração argila nos primeiros 6 m de profundidade. Aqueles aquíferos suspensos e/ou temporários são responsáveis pelo extravasamento do necrochorume nas ruas e vielas do cemitério que costuma ocorrer durante a época de chuvas.

A Figura 3 mostra o corte transversal AA' no cemitério, são apresentados os valores de resistividade estimados pelos modelos, as profundidades do topo da camada saturada e do embasamento obtidos a partir das informações das sondagens elétricas e geológicas e dos poços tubulares próximos da área de estudos.

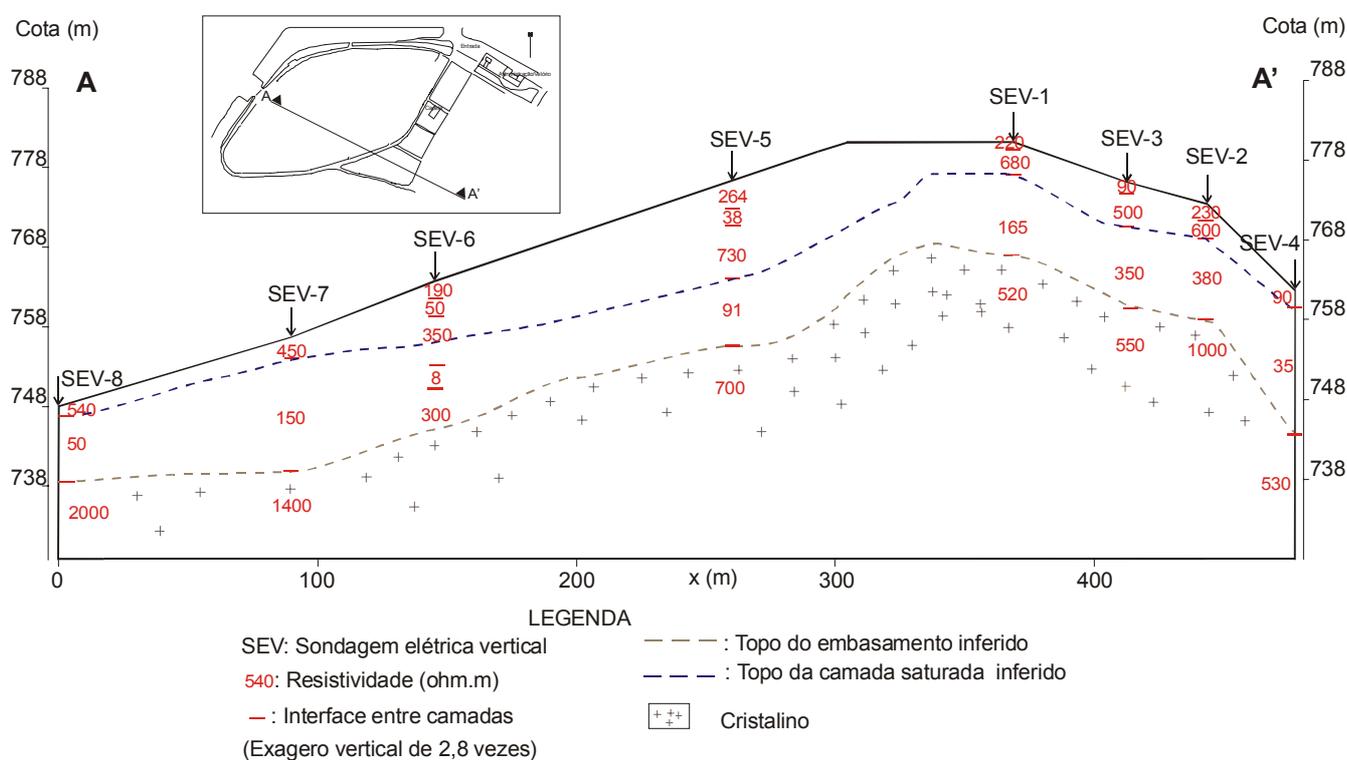


Figura 3. Seção geoeletrica AA'

A Figura 4 mostra um mapa do cemitério com isolinhas de condutividade elétrica aparente determinadas a partir dos valores observados nos caminhamentos eletromagnéticos. Na figura, o campo eletromagnético é perpendicular à superfície e a profundidade de investigação fica em torno de 15 m (distância entre o receptor e o transmissor foi fixada em 10 m). Pontos mais condutivos foram registrados em áreas de menores cotas.

Os sais minerais existentes no necrochorume atingem os aquíferos suspensos e freático e acabam por aumentar a condutividade elétrica da água. Os locais de maior condutividade elétrica observados nos estudos eletromagnéticos foram escolhidos para a realização dos furos de sondagem, coleta de amostras e instalação dos poços de monitoramento. Eles estão localizados nas

cotas mais baixas, sendo relacionados à proximidade do nível freático da superfície e à presença de contaminação.

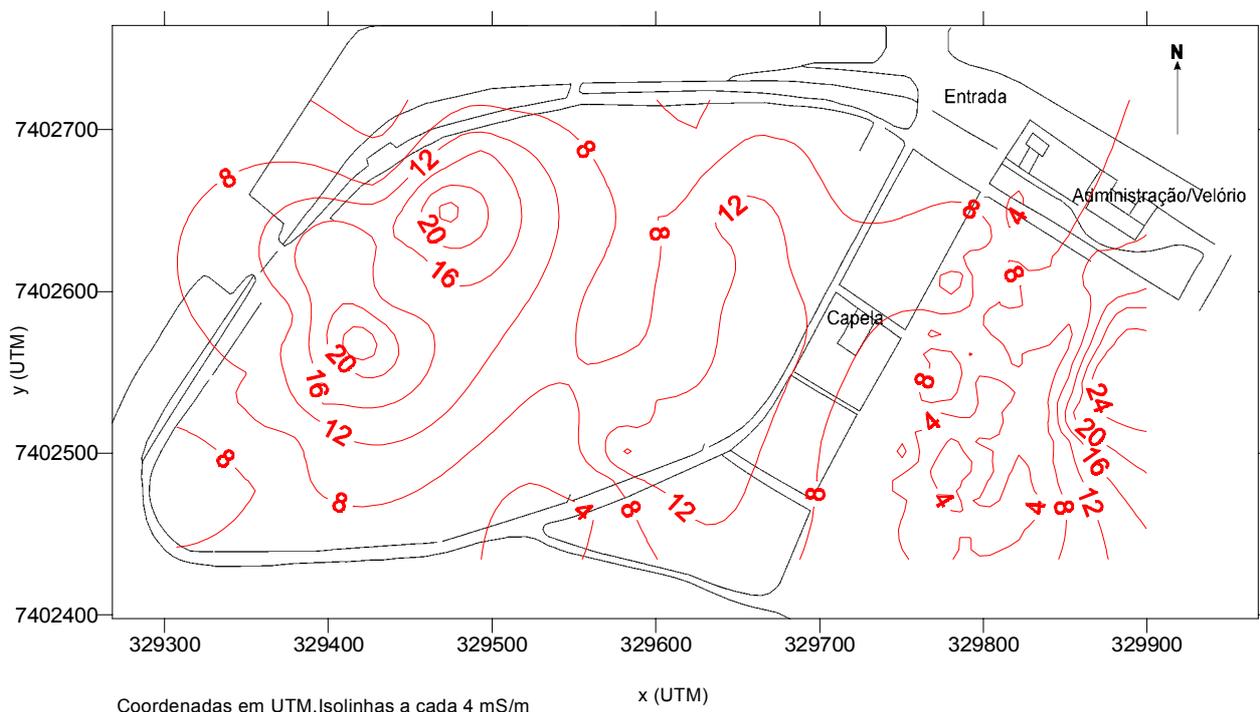


Figura 4. Condutividade elétrica aparente (mS/m) com campo indutor horizontal

Características físicas e químicas do solo

A análise tátil-visual das amostras de solo do cemitério mostrou o caráter argiloso deste, com predominância de cores de tons avermelhados. Há um domínio da fração argila (média de 43% com desvio padrão de 17%), seguida de areia (média de 35% com desvio padrão de 7%) e silte (média de 20% com desvio padrão de 13%). Na fração areia, pode-se observar uma maior quantidade de grãos mais finos, com metade destes entre 0,05 e 0,25 mm. Vinte e oito amostras foram identificadas como de textura argilosa, 7 de franco-argilosa, 5 de franca, 4 de muito argilosa e 2 de argilo-arenosa. O diâmetro médio dos grãos (média ponderada) é de 0,17 mm com desvio padrão de 0,06 mm.

Análises químicas de 11 amostras coletadas nas sondagens geológicas mostraram que o solo do cemitério é ácido, com pH em torno de 5,5. As amostras são pobres em matéria orgânica: o valor mais freqüente é 0,7%, sendo o maior valor observado igual a 4,2%. A capacidade de troca de cátions (CTC) é pequena, variando entre 10,2 e 109,0 mmolc/kg. O Ca é o elemento químico mais expressivo, com um valor médio de 10,6 mmolc/kg, mas variando entre 1 e 35 mmolc/kg, seguido do P (valor médio: 4 mmolc/kg, variando entre 1 e 14 mmolc/kg) e do Mg (valor médio: 3 mmolc/kg, variando entre 1 e 8 mmolc/kg). Mais de 70% das amostras não apresentaram Al, mas quando presente, o maior valor deste é de 6 mmolc/kg.

As análises mineralógicas realizadas nas frações de argila de 17 amostras coletadas durante a instalação dos poços de monitoramento mostram que estas são formadas principalmente por caulinita e gipsita, apresentando, algumas vezes, vermiculita, ilita, clinocloro e clinoclasita. Análises químicas de cinco amostras das frações de argila indicam que estas são compostas principalmente por óxidos de sílica (~41%), alumínio (~35%) e ferro (~9%).

A Figura 5 resume as informações obtidas das sondagens geofísicas e geológicas e dos poços instalados no cemitério através de um perfil de alteração das rochas. Pouco diferenciado do horizonte B no cemitério de Vila Nova Cachoeirinha, o horizonte A é formado por um solo de cor vermelho-escuro, com espessura variando entre 0,25 e 1,30 m. O horizonte B possui uma espessura aproximada de 5,5 m e é predominantemente formado por argila vermelha-clara. A quantidade de argila presente neste horizonte é bastante variável (de 30 a 60%), sem uma nítida diferenciação em função do aumento da profundidade. Em geral, depois dos 6 m de profundidade (horizonte C), há um acréscimo da quantidade de areia e silte, com o decréscimo da fração argila (~21%). Neste horizonte, o solo adquire cores como branco, amarelo, rosa e marrom.

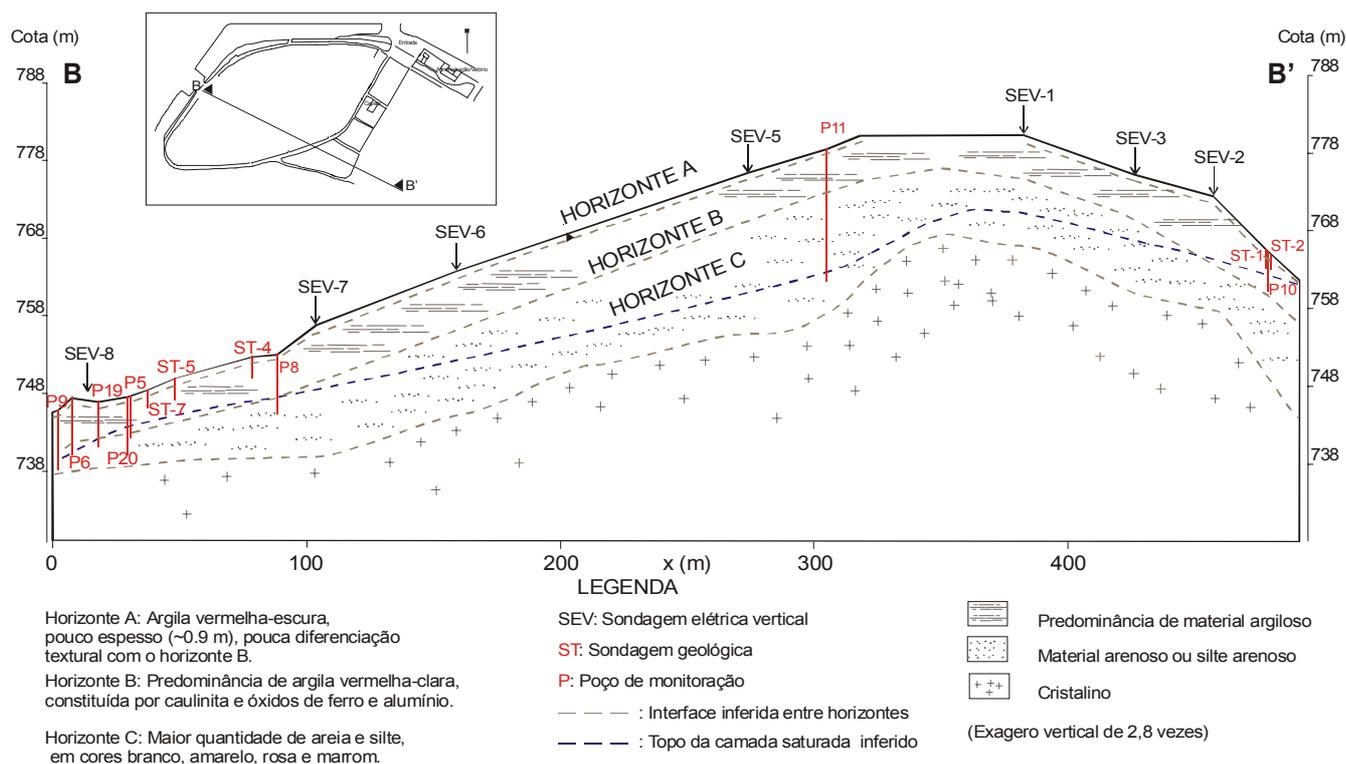


Figura 5. Perfil de alteração das rochas no cemitério

Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica K foi determinada através de testes tipo *slug* aplicados nos poços de monitoramento. A Tabela 2 mostra os valores de K em cada poço. A condutividade hidráulica K varia de $2,90 \times 10^{-8}$ (poço P19) a $8,41 \times 10^{-5}$ m/s (poço P5), com uma média aritmética de $1,32 \times 10^{-5}$ m/s. Nos poços P5, P7, P10 e P6 foram observados os maiores valores de K (ordem de 10^{-5} m/s), enquanto os poços P12, P13, P15, P16 e P19 apresentaram os menores valores (ordem de 10^{-8} m/s).

Tabela 2. Condutividade hidráulica K determinada nos testes tipo *slug*

Poço	Condutividade hidráulica K (m/s)	Poço	Condutividade hidráulica K (m/s)
P1	5,61E-6	P9	5,61E-6
P2	6,55E-7	P10	2,85E-5
P3	1,97E-6	P12	6,87E-8
P4	2,01E-6	P13	4,03E-8
P5	8,41E-5	P15	7,11E-8
P6	1,87E-5	P16	7,48E-8
P7	4,81E-5	P19	2,90E-8
P8	2,90E-6		
n	15		
\bar{X}	1,32E-5		
s	2,39E-5		
x_{min}	2,90E-8		
x_{max}	8,41E-5		

n : número de observações; \bar{X} : média aritmética; s : desvio padrão;
 x_{min} : valor mínimo observado; x_{max} : valor máximo observado.

Fluxo das águas subterrâneas

No cemitério de Vila Nova Cachoeirinha, o topo do morro corresponde ao divisor de águas, onde o fluxo divide-se em direção ao rio Cabuçu de Baixo e ao córrego que atravessa o cemitério. A Tabela 3 mostra um resumo das observações de nível d'água nos poços de monitoramento, sendo utilizadas para calcular as cargas hidráulicas ao longo do tempo. As menores cargas foram observadas em novembro de 1999 e as maiores em março de 2000, com uma variação média de 1,4 m. O mapa potenciométrico de março de 2000 (Figura 6) mostra que na porção oeste do cemitério a carga hidráulica varia de 762 m, próximo ao topo, até 742 m, nas menores cotas, o que nos dá um gradiente hidráulico de aproximadamente 0,07 m/m.

Tabela 3. Nível d'água observado nos poços

Poço	n	Nível d'água (m)				Poço	n	Nível d'água (m)			
		\bar{X}	s	x_{min}	x_{max}			\bar{X}	s	x_{min}	x_{max}
P1	26	2,94	0,73	1,97	>4,90	P11	4	16,85	0,3	16,53	>17,15
P2	28	3,98	0,19	3,71	4,39	P12	6	4,53	0,18	4,29	>5,0
P3	28	4,12	0,26	3,63	4,57	P13	14	4,11	0,18	3,58	4,3
P4	27	2,47	0,17	2,17	2,90	P14	1	4,31			
P5	10	4,60	0,51	4,25	5,68	P15	13	2,72	0,44	1,92	3,32
P6	10	6,29	0,81	5,10	7,30	P16	9	3,37	0,6	2,85	>4,84
P7	7	4,23	0,76	3,11	5,22	P17	8	4,56	0,26	4,08	>4,84
P8	10	5,70	0,66	4,75	6,42	P18	1	4,32			
P9	9	5,17	0,67	4,13	5,87	P19	14	4,59	0,63	3,70	5,39
P10	9	3,43	0,94	2,01	4,84	P20	11	4,57	0,98	4,00	5,49

n: número de observações; \bar{X} : média aritmética; s: desvio padrão;

x_{min} : valor mínimo observado; x_{max} : valor máximo observado.

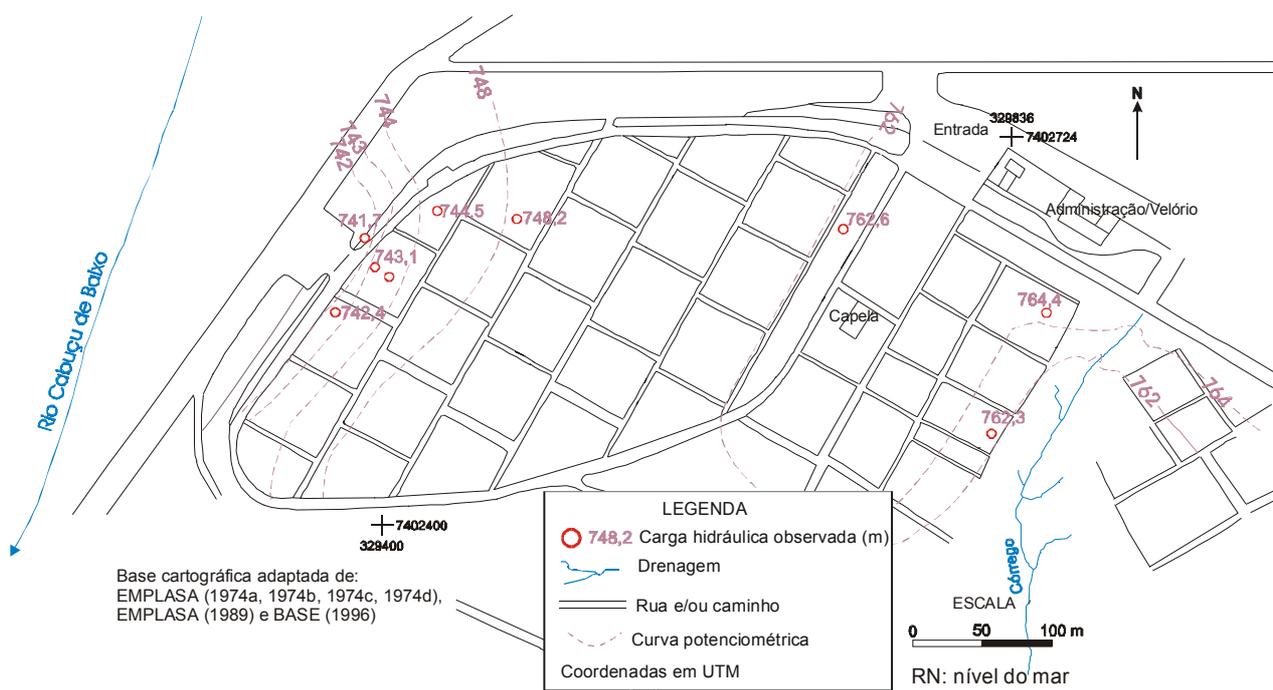


Figura 6. Mapa potenciométrico (março de 2000)

A Figura 7 mostra a concentração relativa observada ao longo do tempo no poço P2, a jusante do poço injetor P1. Um modelo numérico foi ajustado aos dados, considerando a injeção pontual do traçador químico. A dispersividade α foi estimada pelo modelo em 0,2 m.

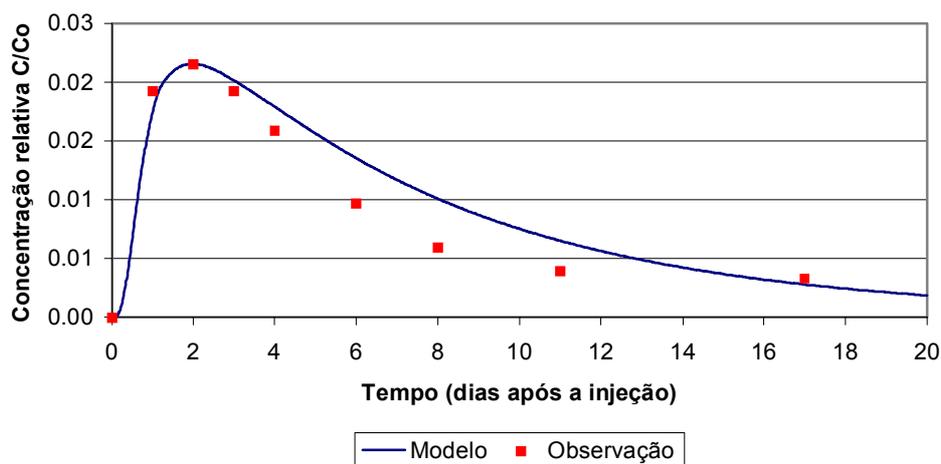


Figura 7. Concentração relativa (C/C_0) observada e modelo ajustado no poço P2

Considerando o gradiente hidráulico determinado de 0,07 m/m e o valor médio de condutividade hidráulica de $1,32E-5$ m/s, a velocidade de Darcy q é dada por $9,2E-7$ m/s na porção oeste do cemitério. A porosidade efetiva n_e foi estimada em 2%, a partir dos valores sugeridos por REBOUÇAS & CAVALCANTE (1987) *apud* MENEGASSE (1991) que citam porosidade efetiva n_e entre 0,1 e 2,0 % para o terço superior do aquífero cristalino; por MENEGASSE VELASQUEZ (1996) que menciona 3% no estudo desenvolvido pelo Centro de Pesquisa de Águas Subterrâneas (CEPAS), e pelos trabalhos em lâminas, de amostras indeformadas de solo do cemitério de Vila Nova Cachoeirinha, realizados por TÔRRES (1992), que calcula valores entre 9,8 e 2,12% (porosidade diminuindo com o aumento da profundidade). Desta forma, a velocidade linear média é dada por aproximadamente 8 cm/dia.

CONCLUSÃO

No cemitério, o embasamento está à cerca de 9,0 m de profundidade na cota mais baixa e 20,5 m no topo. O nível freático encontra-se entre 4,0 e mais de 16,0 m de profundidade. O solo do cemitério é formado pelo material de alteração das rochas graníticas, de caráter predominantemente argiloso (~ 43% de argila), pH =5,0, matéria orgânica entre 0,7 e 4,2% e capacidade de troca de cátions entre 10,2 e 109,0 mmolc/kg. A fração argila é constituída principalmente por caulinita e óxidos de ferro e alumínio.

A condutividade hidráulica do aquífero varia de $2,90 \times 10^{-8}$ a $8,41 \times 10^{-5}$ m/s. O gradiente hidráulico na porção oeste do cemitério é de aproximadamente 0,07 m/m; considerando o meio homogêneo e isotrópico e uma porosidade efetiva de 2%, a velocidade linear média foi estimada em 8 cm/dia.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo À Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio a este projeto. (Processos: 96/01250-3, 97/07511-6).

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA – ABGE (1990) *Manual de sondagens*. 3. ed. São Paulo, ABGE. 73 p. (Boletim n.3).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1997) *Construção de poços de monitoramento e amostragem* - (NBR 13895). Rio de Janeiro, ABNT. 21 p.
- DANTAS, A.S.L. (1990) *Geologia da faixa São Roque e intrusivas associadas na região entre São Paulo e Mairiporã, norte de São Paulo, SP*. São Paulo, 199 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE (1975) *Estudo de águas subterrâneas: região administrativa 1 - Grande São Paulo*. São Paulo, DAEE. 3 v.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE (1998) *Banco de dados pluviométricos do Estado de São Paulo: versão 1.0*. São Paulo, Secretaria de Recursos Hídricos, Saneamento e Obras/DAEE/CTH-USP. 1 CD-ROM.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA (1997) *Manual de métodos de análise de solo*. 2. ed. Rio de Janeiro, EMBRAPA. 212 p.
- EMPRESA METROPOLITANA DE PLANEJAMENTO DA GRANDE SÃO PAULO – EMPLASA (1974a) *Sistema cartográfico metropolitano da grande São Paulo: levantamento aerofotogramétrico* - Folha Vila Nova Cachoeirinha (SF 23 Y C III 4 SO F I 5). São Paulo, EMPLASA. (Escala 1:2.000).
- EMPRESA METROPOLITANA DE PLANEJAMENTO DA GRANDE SÃO PAULO – EMPLASA (1974b) *Sistema cartográfico metropolitano da grande São Paulo: levantamento aerofotogramétrico* - Folha Vila Nova Cachoeirinha (SF 23 Y C III 4 SO F I 6). São Paulo, EMPLASA. (Escala 1:2.000).
- EMPRESA METROPOLITANA DE PLANEJAMENTO DA GRANDE SÃO PAULO – EMPLASA (1974c) *Sistema cartográfico metropolitano da grande São Paulo: levantamento aerofotogramétrico* - Folha Casa Verde/Vila Nova Cachoeirinha/Limão (SF 23 Y C III 4 SO F III 2). São Paulo, EMPLASA. (Escala 1:2.000).
- EMPRESA METROPOLITANA DE PLANEJAMENTO DA GRANDE SÃO PAULO – EMPLASA (1974d) *Sistema cartográfico metropolitano da grande São Paulo: levantamento aerofotogramétrico* - Folha Casa Verde (SF 23 Y C III 4 SO III 3) São Paulo, EMPLASA. (Escala 1:2.000).

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA (1997) *Manual de métodos de análise de solo*. 2. ed. Rio de Janeiro, EMBRAPA. 212 p.
- FETTER, C.W. (1994) *Applied hydrogeology*. 3rd ed. Upper Saddle River, Prentice Hall. 691 p.
- LEPSCH, I.F. (1975) Classificação e mapeamento dos solos de São Paulo. In: MONIZ, A.C. (Coord.) (1975) *Elementos de pedologia*. 2. ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos. p. 377-390.
- MATOS, B. (2001) *Avaliação da ocorrência e do transporte de microrganismos no aquífero freático do cemitério de Vila Nova Cachoeirinha, município de São Paulo*. São Paulo, 114 p. Tese (Doutorado)– Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- MENDES, J.M.B.; PACHECO, A.; HASSUDA, S. (1989) Cemitérios e meio ambiente - a geofísica como método auxiliar na avaliação de sua influência nas águas subterrâneas. In: ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDOS SOBRE O MEIO AMBIENTE, 2., Florianópolis, 1989. *Anais*. Florianópolis, UFSC. v. 1, p. 50-57.
- MENEGASSE, L.N. (1991) *Estudo hidrogeológico das rochas metassedimentares do Grupo São Roque a NW da Grande São Paulo –critérios para locação de poços profundos*. São Paulo, 104 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- MENEGASSE VELASQUEZ, L.N. (1996) *Efeitos da urbanização sobre o sistema hidrológico: aspectos da recarga no aquífero freático e escoamento superficial – Área piloto: sub-bacias Sumaré e Pompéia, município de São Paulo*. São Paulo, 124 p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- OLIVEIRA, J.B.; CAMARGO, M.N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. (1999). *Mapa pedológico do Estado de São Paulo*. Campinas, Instituto Agrônomo/ EMBRAPA. (Escala 1:500.000).
- PREVEDELLO, C.L. (1996) *Física do solo*. Curitiba, Sociedade Autônoma de Estudos Avançados em Física do Solo. 446 p.
- ROSS, J.L.S.; MOROZ, I.C. (1997) *Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo*. São Paulo, USP/IPT/FAPESP. (Escala 1:500.000).
- SÃO PAULO (Estado) (1991) *Código Sanitário: regulamento da promoção, preservação e recuperação da saúde no campo de competência da Secretaria de Estado da Saúde (revisto e atualizado até dezembro de 1990)*. 4. ed. São Paulo, Imprensa Oficial do Estado. 412 p. (Decreto lei n. 12.342 de 27 de setembro de 1978).
- SILVA, V.R. (2000) *Ocupação territorial e qualidade de água subterrânea em maciço fraturado na região de Itaquera, São Paulo-SP*. São Paulo, 127 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

- TÔRRES, S.L. (1992) *O problema geo-ambiental da localização de cemitérios em meios urbanos: estudo 2*. São Paulo, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP. p. 1-33. (Relatório parcial; Processo 91/0360-6).
- WATERLOO HYDROGEOLOGIC (1998) *Visual MODFLOW for Windows*, version 2.7.1. 5 diskettes 3.5".