

AVALIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM ÁREA DE RECARGA DO AQUÍFERO GUARANI NA DEPRESSÃO PERIFÉRICA, ESTADO DE SÃO PAULO

Edson Gomes de Oliveira¹ & Daniel Marcos Bonotto²

Resumo – O presente trabalho foi realizado em áreas pertencentes à CRS-Mineração Indústria e Comércio Ltda. e Sibelco Mineração Ltda., as quais estão localizadas nas proximidades do município de Analândia, quase no centro do Estado de São Paulo. Esses locais constituem áreas de recarga do aquífero Guarani, tendo sido há vários anos realizadas atividades de lavra e tratamento de areia com diversos produtos químicos, bem como a disposição dos resíduos produzidos. A zona não saturada afetada pelas áreas de disposição de rejeitos foi investigada por intermédio da determinação da condutividade hidráulica em quatro furos perfurados para a realização de ensaios de infiltração. Os valores encontrados situaram-se na faixa de 4,7 a $8,7 \times 10^{-5}$ cm/s, os quais sugeriram pouca susceptibilidade à ocorrência de transporte de elementos químicos provenientes dos tanques e das lagoas de decantação, em virtude do tipo de solo existente na área (classificado como tendo condutividade hidráulica “ruim”). As informações geradas foram compatíveis com aquelas oriundas dos dados químicos obtidos em outros trabalhos para as águas superficiais e subterrâneas das áreas, os quais, ao serem comparados com os limites máximos de concentração estabelecidos pela legislação vigente, não indicaram a ocorrência de qualquer impacto ambiental relacionado com as atividades de mineração de areia.

Abstract – This investigation was carried out in areas belonging to CRS-Mineração Indústria e Comércio Ltda. and Sibelco Mineração Ltda., which are located around the Analândia municipality, nearly in the center of São Paulo State. These sites constitute recharge area of the Guarani aquifer, in which are taking place for several years anthropogenic activities related to the treatment of sand (with several chemicals) for industrial purposes, and, consequently, the waste disposal. The unsaturated zone affected by the waste disposal areas was investigated on determining the hydraulic conductivity in four boreholes drilled for performing the infiltration tests. The obtained values were between 4.7 and 8.7×10^{-5} cm/s, which suggested little susceptibility to the occurrence of transport of

¹ Departamento de Geologia Aplicada / Instituto de Geociências e Ciências Exatas-UNESP; Av. 24-A, No. 1515, C.P. 178, CEP 13506-900-Rio Claro-SP, e-mail: edsongo@rc.unesp.br

² Departamento de Petrologia e Metalogenia / Instituto de Geociências e Ciências Exatas-UNESP; Av. 24-A, No. 1515, C.P. 178, CEP 13506-900-Rio Claro-SP, e-mail: dbonotto@rc.unesp.br

chemicals from decantation tanks and drying ponds, due to the type of soils in the areas (considered of “low” hydraulic conductivity). The generated information were compatible with those providing from chemical data obtained for the surface and groundwaters, which, when compared with the maximum permissible concentration limits established by water authorities, did not indicate the occurrence of any environmental impact related to the sand mining activities.

Palavras-chave – condutividade hidráulica, zona não saturada, aquífero Guarani.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas tem havido uma crescente atenção à interação entre o desenvolvimento social e a utilização dos recursos naturais, especialmente dos bens minerais, porque a utilização inadequada desses recursos pode causar perigosos impactos ambientais. Contudo, o uso dos bens minerais e a proteção adequada do Meio Ambiente pode minimizar ou até mesmo neutralizar os efeitos nocivos dos impactos negativos, maximizando os aspectos positivos. No Estado de São Paulo, em decorrência do seu alto estágio de desenvolvimento sócio-econômico, tem havido uma série muito grande de problemas ambientais na área da mineração, especialmente naquelas que exploram a areia industrial na região conhecida fisiograficamente como Depressão Periférica.

Na Depressão Periférica, a atividade antrópica é grande, especialmente no que se refere às atividades agropecuárias, exploração de lavouras intensivas e extensivas, reflorestamentos, gado de leite e corte, horticultura, exploração de bens minerais tais como argilas, areias, água mineral, rochas ornamentais, calcários, rochas para brita, fundições, metalúrgicas, serrarias, além de outros tipos de indústrias de transformação primária e secundária de matérias-primas.

Todas essas atividades se interagem no que diz respeito à utilização dos espaços, acessos, energia elétrica, áreas verdes e especialmente na disputa de insumos primários tais como água e materiais de construção. Dentre eles, a água para consumo animal, industrial e humano tem sido um elemento de alta importância local e regional, motivo que reforça a execução do presente trabalho.

As empresas de mineração que exploram as areias industriais necessitam lavá-las para torná-las isentas, especialmente, de argilas e minerais ferruginosos. Para tanto, usam um processo que inclui a lavagem por atrição e defloculação dos minerais de argila, utilizando-se diversos produtos químicos, os quais, após o seu uso, são conduzidos, juntamente com as argilas defloculadas, para lagoas ou tanques de decantação. Contudo, nem todas essas lagoas, ou tanques, têm dispositivos eficientes de revestimento, ou impermeabilização que impeçam os elementos químicos de atravessarem as paredes ou taludes dos tanques e atingirem a zona não saturada e o lençol freático.

Dessa forma, esta pesquisa contribui para a avaliação da existência de impactos causados nas águas subterrâneas pelos produtos químicos utilizados nestes processos de lavagem, uma vez que, normalmente, são empregados reagentes como ácido sulfúrico, ácido clorídrico, hidróxido de sódio, silicato de sódio, cloreto férrico e polímeros orgânicos. Considerando-se que a água é o principal veículo de transporte dos elementos químicos nela dissolvidos e que o solo é o seu suporte estrutural, obviamente, para se proceder ao monitoramento dos elementos químicos procedentes dos tanques e lagoas de decantação é necessário se conhecer o comportamento hidrodinâmico da água na zona não saturada até atingir o lençol freático. Um parâmetro importante para isto é o coeficiente de condutividade hidráulica [1-5], cuja determinação é descrita neste trabalho conduzido em duas áreas localizadas no município de Analândia (SP), ambas situadas sobre zonas de recarga do aquífero Botucatu-Pirambóia (Guarani), o mais extenso de todo o sul e sudeste do Brasil.

DESCRIÇÃO DA REGIÃO DA PESQUISA

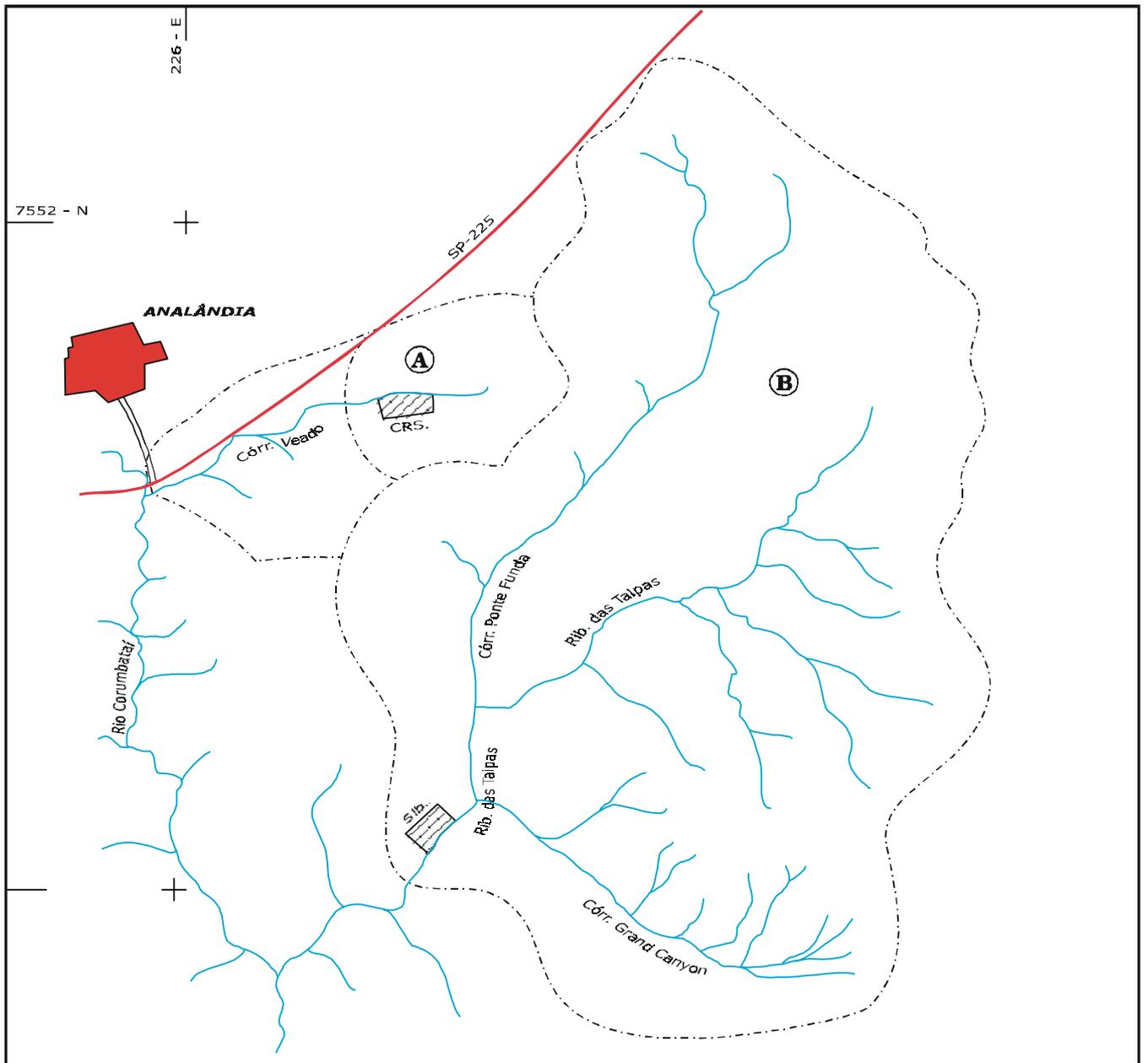
A região da pesquisa localiza-se no município de Analândia, situado no centro do Estado de São Paulo na zona do Médio Tietê, já bastante próximo das “Cuestas Basálticas”. É servida por toda a infra-estrutura necessária para o seu desenvolvimento, além de estar posicionada num local do Estado de alto consumo de bens primários e secundários. Dista 230 km de São Paulo, sendo acessada pelas Rodovias SP-330 (Anhanguera), SP-310 (Washington Luiz) e SP-225 (Brotas-Piraçununga). Tem os seguintes municípios como confrontantes: Itirapina a oeste, São Carlos ao norte, Piraçununga a leste e Corumbataí ao sul. Está situada geologicamente na Bacia Sedimentar do Paraná, em rochas arenosas e argilosas recentes, das Formações Botucatu e Pirambóia, Intrusivas Básicas da Formação São Bento e coberturas de alterações intempéricas.

A região de Analândia apresenta um clima do tipo Mesotérmico, do sub-tipo *Cwa*, conforme a classificação de Köppen, com inverno seco e verões quentes, sendo a sua estação chuvosa no verão. Esse tipo de clima é também denominado de "Clima Tropical de Altitude". Com relação ao índice pluviométrico, este varia entre 1100 mm e 1700 mm, sendo que a estação seca ocorre entre os meses de abril e setembro, verificando-se a maior intensidade no mês de julho. O montante total das precipitações no mês mais seco é menor que 30 mm e as isoietas médias anuais no Estado de São Paulo [6] indicam que a precipitação média anual da área é de 1340 mm. Os meses que apresentam maior índice pluviométrico são janeiro e fevereiro e as temperaturas dos meses mais quentes oscilam entre 22°C e 24°C, uma vez que, normalmente, a temperatura média do mês mais frio é inferior a 18°C, enquanto que a temperatura do mês mais quente é superior a 22°C. Conforme a classificação de Gaussen, o clima da região é considerado como sendo do tipo 4CTh (termoxeroquimênico atenuado-tropical quente de seca acentuada), que corresponde a curta estação quente, com três a

quatro meses de duração e apresentando um “Índice Xerotérmico” variável entre 400 e 100. O mês mais frio apresenta a temperatura superior a 15°C.

Duas áreas foram analisadas, ambas localizadas no município de Analândia, a uma distância de cerca de 4 km da cidade. Uma das áreas de pesquisa se situa em local denominado de “Fazenda São João”, na mina de areia industrial da Empresa “Sibelco Mineração Ltda.”, denominada de *Área Sul* no presente trabalho (Fig. 1). A outra área se situa em local denominado de “Sítio Santo André”, na mina da Empresa “C.R.S.- Mineração Indústria e Comércio Ltda.”, denominada de *Área Norte* neste trabalho (Fig.1). A primeira área tem por coordenadas geográficas básicas, centrais, as seguintes: Latitude- 22° 09' 56" S (7546,45km-N); Longitude- 47° 38' 13" W (228,10km-E). A segunda tem por coordenadas geográficas básicas, centrais, as seguintes: Latitude- 22° 07' 51" S (7550,3 km-N); Longitude- 47° 38'46" W (227,60 km-E).

Os solos predominantes nas áreas de pesquisa são compostos por areias quartzosas (AQ) e areias quartzosas latossólicas (AQ-LVA) nos locais onde ocorre o Arenito Botucatu. Ocasionalmente, nessas áreas, onde houver a influência de diabásios ou basaltos - por intrusão, ou extrusão - ocorre a presença de latossolo vermelho escuro (LE). A presença do Arenito Pirambóia na área é predominante, gerando, conseqüentemente, um solo do tipo latossolo vermelho amarelo (LV), barro argilo arenoso ou areno barrento. Predomina na área [7] a ocorrência de areia quartzosa profunda álica, com horizonte A fraco, moderado ou raramente proeminente, aumentando-se a argila em profundidade (areias quartzosas podzólicas), ou sem incremento de argila e com relação "areia fina/areia grossa" positiva, apresentando um matiz vermelho 2,5 YR e até amarelo (10YR) [8] Podem ser mosqueadas, predominando o caráter álico. Esses solos apresentam uma espessura maior que 200 cm e não exibem hidromorfismo antes de 80 cm de profundidade. Considerando que esses solos se desenvolvem sobre rocha predominantemente arenosa (Formação Pirambóia), é muito reduzida a ação dos processos pedogenéticos, ocasionando perfis pouco diferenciados, onde os processos de adição são intensos. Ocorre, normalmente, uma seqüência de horizontes A e C, sendo que, às vezes, aparecem indícios do horizonte B, no qual se verifica uma variação de cor e/ou um desenvolvimento incipiente de estruturas. O horizonte A apresenta uma estrutura granular pequena, fraca, associada com grãos simples, enquanto que o horizonte C não tem estrutura marcante, a qual, quando presente, é fracamente subangular. Quanto à consistência, ao longo do perfil, observa-se que esta é não plástica, não pegajosa e muito friável.



LEGENDA

- Ⓐ Microbacia do Córrego do Veado
- Ⓑ Microbacia do Rib. das Taipas
- - - Limite das Microbasias
- CRS. - Área de Pesquisa
- SP-225 Rodovia
- Cidade

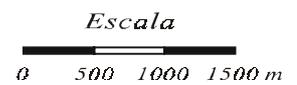


Fig. 1. Localização das áreas de exploração mineral investigadas neste trabalho.

Do ponto de vista hidrográfico, as áreas pesquisadas se situam dentro da Bacia Hidrográfica do Rio Corumbataí, que integra a *Bacia Hidrográfica* do Rio Piracicaba. Mais particularmente, as duas áreas de pesquisa estão localizadas dentro de duas micro-bacias: a *Área Norte* ocupa a micro-bacia do Córrego do Veado e a *Área Sul* ocupa a micro-bacia do Ribeirão das Taipas (Fig. 1). Por sua vez, em termos de hidrogeologia, as áreas se situam na zona de recarga da *Bacia Hidrogeológica* "Botucatu-Pirambóia", isto é, "Aqüífero Botucatu-Pirambóia" ("Aqüífero Guarani").

O Córrego do Veado flui no sentido E-W, ao longo de um vale aberto, cujos flancos norte e sul apresentam gradientes gerais que podem atingir até 15% e que possui um comprimento longitudinal da sua calha, desde a cabeceira até as sua confluência com o Rio Corumbataí, da ordem de 3.000 metros. Esse córrego apresenta uma vazão média de 24,9 L/s, sofrendo uma queda de aproximadamente 10% nos meses de estiagem. Por ser um córrego de pequeno comprimento e por nascer em cotas mais altas da Formação Pirambóia local, o gradiente geral do seu leito é da ordem de 2,3% e a área dessa microbacia é de aproximadamente 2,26 km². Essa calha de drenagem é alimentada, principalmente, pelas águas pluviais e, secundariamente, pelas restituições das águas subterrâneas que afloram sob a forma de exutórios naturais ou fontes. Levando-se em conta os dados obtidos dos poços de monitoramento e do lençol freático aflorante, observa-se que o fluxo das águas subterrâneas na Formação Pirambóia, na *Área Norte*, tem a direção geral de SE para NW (Fig. 2), com gradientes piezométricos da ordem de 0,07, ou 7% ou 4° (na realidade, o "gradiente hidráulico" é uma grandeza adimensional, porém, essas unidades foram usadas apenas para expressar uma visão geométrica do valor. Considerando que a "espessura" do pacote sedimentar local (sobre o qual se instalam os tanques de decantação) é pequena (máximo de 18 metros, a contar do nível de base) e que o solo local é bastante poroso, permeável, friável e de baixa compacidade, então, esses fatores juntamente com o estreitamento das linhas piezométricas contribuem para que o gradiente hidráulico seja baixo, quando comparado com a permeabilidade.

Na *Área Sul*, a principal expressão da água superficial está representada pelo Ribeirão das Taipas, que flui no sentido NE-SW, tem uma vazão média de 337,49 L/s e queda de aproximadamente 10% nos meses de estiagem. O gradiente geral do seu nível de base, contando-se desde a sua cabeceira até a confluência com o Rio Corumbataí, é da ordem de 2,0 %, sendo que em frente à área dos tanques de decantação (Fig. 3), onde foi traçada a rede fluxo subterrâneo, o gradiente é menor, da ordem de 1,3%. Nessa área, ou seja, no flanco norte do vale do ribeirão, a linha de fluxo da água subterrânea (Fig. 3) apresenta algumas características peculiares, que as diferenciam da outra área: a) a rede de fluxo apresenta gradientes mais fortes, que variam desde $i = 0,10$ (10 % ou 6°) até $i = 0,15$ (15% ou 8°); b) as direções médias dos vetores dos fluxos

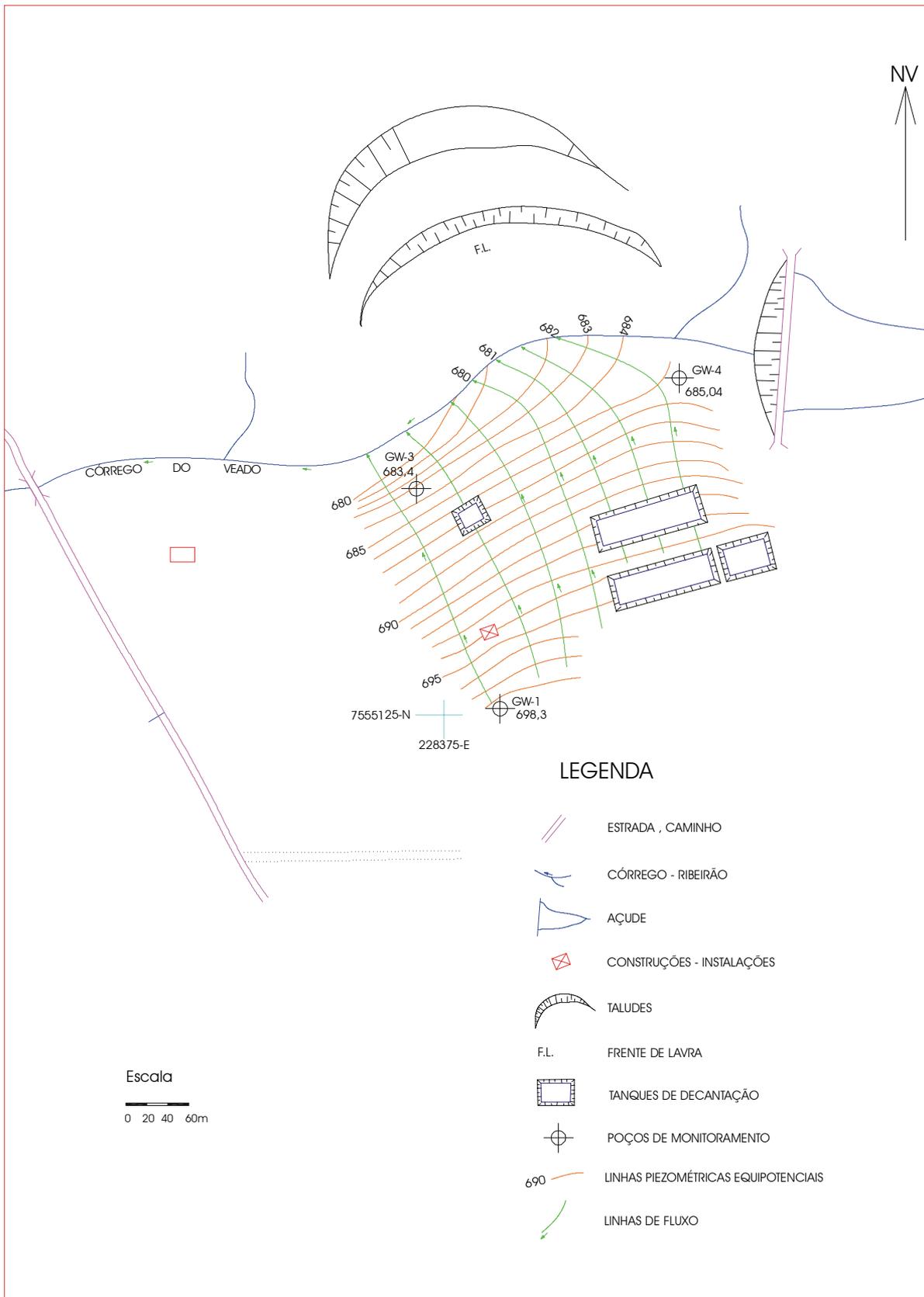


Fig. 2. Detalhe da rede de fluxo subterrâneo da *Área Norte*, município de Analândia (SP).

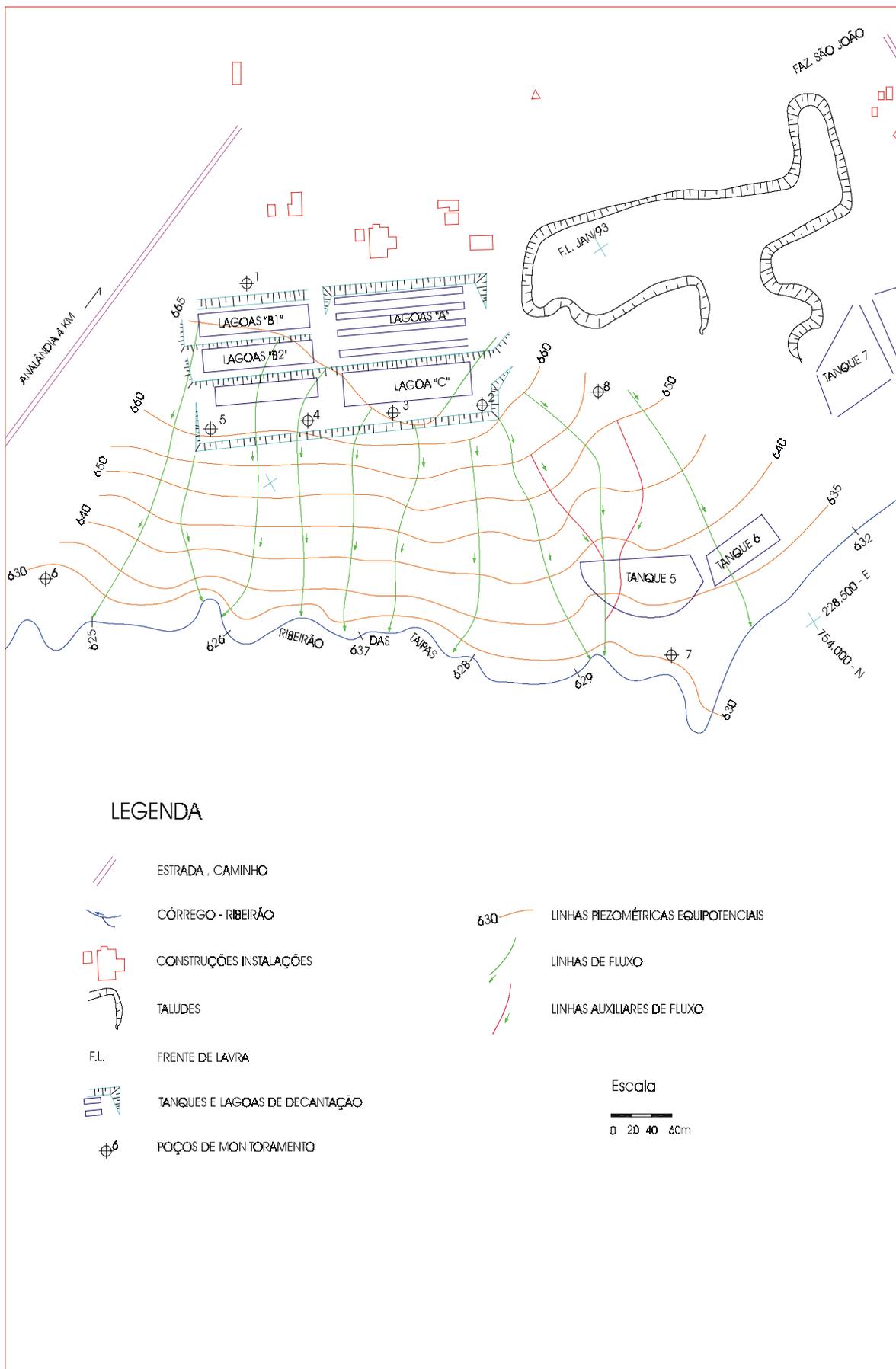


Fig. 3. Detalhe da rede de fluxo subterrâneo da *Área Sul*, município de Analândia (SP).

variam entre N-S e NW-SE (direções essas, normalmente esperadas), mas, entre os poços piezométricos de monitoramento N° 2 e N° 8, ocorrem algumas distorções das direções das linhas de fluxo, provocadas por dois fatores, sendo o segundo decorrente do primeiro. O primeiro fator refere-se à existência nesse local de uma linha de falha, que criou uma zona mais permeável nesse alinhamento, provocando um rebaixamento no nível d'água verificado no poço N° 8, e, conseqüentemente, alterando a rede de fluxo local. O outro fator é de caráter sedimentar, ou seja, a rede de fluxo está instalada sobre a Unidade Inferior do arenito Pirambóia, revelando um maior controle das suas direções, que não se subordinam totalmente ao gradiente hidráulico, mas também são controladas pelo caráter menos permeável e mais compacto dessa unidade. Tal fato é corroborado pela menor inflexão das linhas de fluxo junto da superfície livre do lençol (no ribeirão) como também um maior gradiente das mesmas.

ATIVIDADES DE MINERAÇÃO NA REGIÃO DA PESQUISA

As minerações nas áreas de pesquisa, após procederem a lavagem das areias, dispõem seus resíduos resultantes em tanques ou lagoas de decantação. Nesses tanques o material psamítico fino e pelítico (areias finas, siltes e argilas) é decantado e o fração líquida do efluente é recirculada para o sistema de lavagem. Contudo, tal fração líquida contém alguns elementos químicos dissolvidos, provenientes de alguns reagentes utilizados nos processos de defloculação, flotação e decantação, os quais, podem atravessar a barreira do solo argiloso e compactado do fundo dos tanques e fluir para o solo, para o lençol freático e, em seguida, para os córregos, ou então, serem diretamente dirigidos para a drenagem superficial, caso haja rompimento de lagoas, conforme se tem notícias, às vezes. O minério bruto, que é descarregado na Unidade de Tratamento, inicialmente passa por um processo de mistura com água, obtendo-se uma polpa constituída aproximadamente por 50% de água.

No caso da *Área Norte*, o Tratamento Mineral é realizado apenas pelo peneiramento da areia para retirada de pedriscos, pelotas de argila, concreções, seguido de lavagem em células de atrição com defloculantes de argila e posteriormente classificação hidráulica em hidrociclones. Com isso, extrai-se a areia fina, utilizada principalmente na indústria de fundição. Para esse fim, na indústria consumidora, ela é recoberta com resinas poliméricas e catalisadores. Nessa área, existem três tanques de decantação de argila, acima da Unidade de Tratamento e ainda mais um pequeno tanque de decantação abaixo dessa Unidade. Os tanques maiores têm 1400 m², o médio tem 600 m² e o menor tem 150 m². A função primordial desses tanques é receber a água da lavagem da areia, a qual vem carregada de sedimentos arenosos muito finos (“Argila AFS”), além das argilas defloculadas após os processos de atrição e químicos e ainda os produtos químicos restantes dos processos físico-

químicos da defloculação e da flotação. Nos primeiros tanques, ocorre a sedimentação dos materiais mais grosseiros e densos, como as areias finas e minerais pesados. Nos tanques seguintes são sedimentados os materiais mais finos, tais como os siltes e parte das argilas. Finalmente, nos últimos tanques, é sedimentada a fração final argilosa, saindo um efluente relativamente límpido, que é rebombeado para o circuito de lavagem, formando um circuito fechado, ou, então, descartado para o córrego. Dessa forma, os resíduos resultantes de todo o processamento mineral descrito são compostos por hidróxido de sódio, silicato de sódio, sais orgânicos e sulfonados para flotação, minerais argilosos e materiais particulados da granulometria de areia fina, inclusive as “argilas AFS”. Nas lagoas de decantação, o efluente recebe a adição de cloreto férrico, para acelerar a floculação da argila a ser sedimentada, procurando-se atingir o pH de 4,5 a 5,0 para que tal ocorra. Nessa área, a água sobrenadante da última lagoa é conduzida ainda até um tanque menor, onde, daí é rebombeada ao sistema de lavagem. Portanto, as águas de lavagem circulam num circuito fechado. As perdas de água do sistema, por evaporação ou infiltração (das lagoas) são compensadas por adução de água do córrego. O lodo que se acumula no fundo das lagoas é bombeado para tanques de decantação, onde ocorre um adensamento da argila, liberando a água que é lançada no córrego.

No caso da *Área Sul*, o processamento mineral é basicamente o mesmo, exceto que a fração de areias de granulometria média é submetida a um processo de flotação, para a eliminação de minerais pesados, de maneira a tornar a areia mais pura para alguns determinados usos industriais. Outra diferença com a *Área Norte* é que a escala de produção é dezenas de vezes maior do que a primeira, exigindo, conseqüentemente, lagoas e tanques de decantação com áreas maiores. Esse empreendimento tem, até o momento, 8 lagoas e 4 tanques, sendo que as lagoas tem uma dimensão média de 2800 m² cada e os tanques têm tamanhos diversos, variando entre 3.000 m² e 16.000 m².

METODOLOGIA DA PESQUISA

Material

A condutividade hidráulica da zona não saturada foi determinada *in situ* pelo Método do Rebaixamento, em furo de sondagem a percussão ou a trado, com nível variável, conforme as orientações disponíveis [9]. Para a execução desses ensaios são geralmente necessários os seguintes materiais, a maioria tendo sido utilizada nas áreas de pesquisa:

a) 5 tambores, com um volume médio de 200 litros cada, destinados ao abastecimento de água para os furos. Se o solo for muito arenoso ou muito fraturado, espera-se obter altas condutividades, conseqüentemente, gerando a necessidade de se ter mais tambores à disposição, que serão abastecidos à medida em que for sendo consumida a água do seu interior. Os tambores são preferíveis aos caminhões-pipa, ou equivalentes, porque normalmente os ensaios são executados em

locais de difícil acesso, ou distantes de água disponível para adução; portanto, os tambores são mais práticos para o transporte, podendo se aproximar bastante da "boca" da sondagem, além do que podem ser transportados em veículos utilitários leves.

b) Escarificador: trata-se de uma haste longa, de madeira (ou de outro material rígido e leve), com pregos cravados em sua ponta, de modo a possibilitar a escarificação das paredes do furo.

c) Tubo de PVC, com 12 cm diâmetro, com uma escala graduada, acoplada ou gravada no seu lado externo juntamente com uma mangueira de 0,5 cm de diâmetro, transparente, de modo a permitir o controle do nível d' água dentro do tubo.

d) Lama de vedação (normalmente bentonita) entre o tubo e as paredes do furo (pode-se usar também um *packer*, se estiver mais disponível).

e) Mangueiras de plástico para promover o transporte da água aduzida entre os tambores e o furo.

f) Veículo utilitário para transportar os tambores de água até o furo de sondagem. É sempre conveniente o emprego de veículos com tração nas 4 rodas.

Descrição do ensaio

Uma vez escolhidos os furos de sondagem nos quais seriam executados os ensaios, procedeu-se a limpeza dos mesmos, escarificando-se a sua parede com o escarificador, no trecho a ser ensaiado. O motivo dessa operação é para se evitar a ocorrência de superfícies lisas (resultantes da rotação da concha do trado ou do amostrador da sonda), mais impermeáveis do que a real. Em seguida, mediu-se a profundidade de cada furo e procedeu-se a introdução do revestimento de PVC na "boca" do furo, deixando a "boca" do tubo pelo menos 1,0 metro acima do nível do terreno. Depois, procedeu-se à vedação, com lama vedante, do espaço intersticial entre o tubo e a parede do furo, até pelo menos a base do tubo.

Estando os tambores cheios de água ao lado da "boca" do furo, procedeu-se ao enchimento do furo de sondagem até que o nível d'água atingisse o nível "zero" da escala milimetrada na lateral, acima da boca do furo. Manteve-se o fornecimento de água no furo para se assegurar o nível constante de água no tubo, durante pelo menos 20 a 30 minutos, período esse considerado suficiente para saturar o bulbo de umidade ao redor do furo.

Convém ressaltar que, naturalmente, no campo, as condições de saturação do maciço devem ser cuidadosamente observadas para determinar se a adução de água foi muito prolongada. Nesse caso, o furo pode estar atravessando um formigueiro, buraco de tatu, ou zona muito fraturada, situação que sugere o abandono do furo para emprego de outro.

Uma vez satisfeita a condição de saturação, encheu-se o tubo até um pouco acima do nível "zero". Cortando-se o fornecimento de água, o seu nível iniciou uma descida. Ao passar pelo

"zero", começou-se a medir o tempo com o cronômetro, observando-se quantos centímetros o nível da água atingia na escala. Aos 5 segundos, tomou-se nota do nível correspondente a esse tempo. Novamente, encheu-se o furo até o "zero" e mais uma vez cortou-se o fornecimento de água, determinando-se quantos centímetros a água descia, desta vez, em 10 segundos. Procedeu-se, assim, sucessivamente, aumentando-se o tempo para 30 segundos, 1 minuto, 2 minutos, 5, 10, 15, 20, 30 minutos, etc. Todos esses dados foram registrados em planilha adequada, para posterior cálculo da condutividade hidráulica.

O momento exato de se interromper o ensaio foi decidido observando-se o instante a partir do qual o tempo de algumas medidas se tornou bastante longo e o nível d'água (NA) abaixou pouco, com pelo menos quatro medidas sucessivas. Uma outra maneira de se proceder isto seria a inserção dos dados obtidos (tempo e variação do NA, ou rebaixamento) em um papel milimetrado e observação de quando os pontos sucessivos parassem de se ajustar a uma curva, tendendo a configurar uma reta, momento em que se efetuariam mais duas ou três medidas e se interromperia o ensaio, uma vez que isto significa que o fluxo de água se tornou constante no maciço.

Cálculo da condutividade hidráulica (K)

Efetuando-se uma regressão linear dos dados de "tempo" e "variação do nível d'água", obtém-se a melhor reta ajustada aos resultados, a partir da qual determina-se o coeficiente angular, parâmetro necessário para emprego da fórmula de cálculo da condutividade hidráulica "K". Deve-se tomar cuidado ao se realizar essa regressão linear, porque, mesmo em gráfico mono-logarítmico, nota-se que os pontos iniciais das medições não se ajustam a uma reta, uma vez que representam exatamente a fase em que o bulbo úmido está sofrendo influências das forças de adsorção e de capilaridade do meio poroso em que está fluindo e ainda não atingiu o estado de equilíbrio (*steady state*) de fluxo hidráulico com o mesmo. Conseqüentemente, o hidrogeólogo experiente deve desprezar os pontos que certamente não representam o comportamento real da frente de umidade.

O mesmo se dá quando, durante a medição, surgem pontos atípicos, excessivamente desviados da reta geral, demonstrando que o bulbo úmido atingiu um ponto de alto índice de vazios, o que aumentou, por alguns minutos, o vetor velocidade de uma certa região restrita da "frente", conseqüentemente alterando (de maneira retroativa e passageira) os valores dos índices. Para o cálculo da condutividade hidráulica "K" nas áreas de pesquisa, utilizou-se a seguinte fórmula proposta para este tipo de ensaio [9]:

$$K = dh/dt \times di^2 / 8 H_0(DL)^{1/2} \quad (1)$$

onde: K = condutividade hidráulica do trecho ensaiado (cm/s); h = rebaixamento do nível d'água (NA) (cm); t = tempo de rebaixamento (s ou min); di = diâmetro interno do revestimento (cm);

D = diâmetro do furo (cm); L = distância entre a extremidade inferior do revestimento e o fundo do furo (cm); H_0 = distância entre o nível "zero" e L/2 (cm).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para cada uma das áreas consideradas neste trabalho realizaram-se ensaios para duas lagoas (tanques) de decantação. Os dados referentes a cada furo estão apresentados na Tabela 1, enquanto que os valores registrados em cada ensaio realizado estão expressos na Tabela 2. Os resultados obtidos para o furo 1 da *Área Norte* estão representados nos diagramas ilustrados na Figura 4, que permitiram determinar um valor de K correspondente a $7,3 \times 10^{-5}$ cm/s. Os resultados obtidos para o furo 2 da *Área Norte* estão representados nos diagramas ilustrados na Figura 5, que permitiram determinar um valor de K correspondente a $4,7 \times 10^{-5}$ cm/s. Os resultados obtidos para o furo 1 da *Área Sul* estão representados nos diagramas ilustrados na Figura 6, que permitiram determinar um valor de K correspondente a $8,7 \times 10^{-5}$ cm/s. Os resultados obtidos para o furo 2 da *Área Sul* estão representados nos diagramas ilustrados na Figura 7, que permitiram determinar um valor de K correspondente a $5,4 \times 10^{-5}$ cm/s. Nas tabelas de classificação de condutividade hidráulica dos materiais, são considerados como tendo valores “ruins” (médios) aqueles que apresentam K entre 10^{-4} e 10^{-6} cm/s (Tabela 3), intervalo no qual se inserem os valores determinados nos ensaios realizados.

Tabela 1. Parâmetros dos furos utilizados nos ensaios conduzidos nas áreas de pesquisa.

Parâmetro	Unidade	Área Norte		Área Sul	
		Furo 1	Furo 2	Furo 1	Furo 2
Separação boca do revestimento - superfície do terreno	m	0,71	0,70	0,73	0,74
Separação superfície do terreno - sapata	m	0,72	0,73	0,70	0,69
Separação sapata - fundo do furo	m	0,52	0,47	0,30	0,49
Trecho ensaiado	m	0,72 -1,24	0,73-1,18	0,70-1,00	0,70-1,18
Diâmetro do furo	cm	15	15	15	15
Diâmetro interno do furo	cm	12	12	12	12

Segundo se verifica, os valores dos coeficientes obtidos para ambas as áreas nos horizontes medidos (solo do fundo das lagoas/tanques de decantação) confirmam que o fluxo hidráulico é maior no topo do que na parte inferior dos solos. Isso é resultado do próprio perfil pedogenético que originou solos mais laterizados e com estrutura mais porosa nas partes mais altas do perfil superior e solos mais estruturados, mais argilosos e compactos nos níveis inferiores do perfil.

Tabela 2. Resultados obtidos nos ensaios conduzidos nas áreas de pesquisa.

Tempo	Tempo acumulado (min)	Variação do nível d'água (cm)			
		Área Norte		Área Sul	
		Furo 1	Furo 2	Furo 1	Furo 2
5 s	0,08	1,5	0,5	1,4	0,4
10 s	0,25	2,7	0,8	2,5	0,7
15 s	0,5	4,0	1,1	3,7	1,0
30 s	1	7,6	2,0	6,9	1,9
1 min	2	13,5	4,5	13,1	3,8
2 min	4	28,6	8,0	26,5	7,3
3 min	7	40,3	10,9	36,7	9,9
5 min	12	57,9	16,5	53,6	15,0
10 min	22	88,5	28,5	81,0	26,0
15 min	37	109,0	38,0	99,5	34,0
20 min	57	114,5	44,5	107,5	39,5
25 min	82	121,5	55,5	111,8	47,9
30 min	112	127,0	57,5	116,4	51,3

Tabela 3. Classificação [10] dos materiais conforme sua condutividade hidráulica.

Condutividade Hidráulica (cm/s)												
10 ²	10 ¹	10	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	
Cascalhos			Areias puras			Areias muito finas			Argilas puras			
Areias grossas sem finos			Areias e cascalhos sem finos			Siltos e misturas de areias e argilas						
muito boa			boa			ruim			impermeável			

Deve-se ressaltar que, no caso presente, o tectonismo contribuiu para colocar solos igualmente evoluídos em níveis diferentes, razão porque, neste caso, não se deve extrapolar valores de condutividade hidráulica de um horizonte para outro, ainda que sendo no mesmo nível topográfico e com idêntica litologia, pois, existem falhas com rejeitos de até dezenas de metros, cuja consequência resulta nessas diferenças de comportamento hidráulico.

Outra consequência dessa diferença de comportamento hidrodinâmico do fluxo subterrâneo é que, no caso da *Área Norte*, o fluxo é mais livre e menos sujeito ao controle lito-pedológico, ao passo que na *Área Sul* acontece o contrário. Isto pode ser perfeitamente observado pelas linhas de fluxo que, na *Área Norte*, são mais homogêneas, de menor gradiente hidráulico e cujo vetor

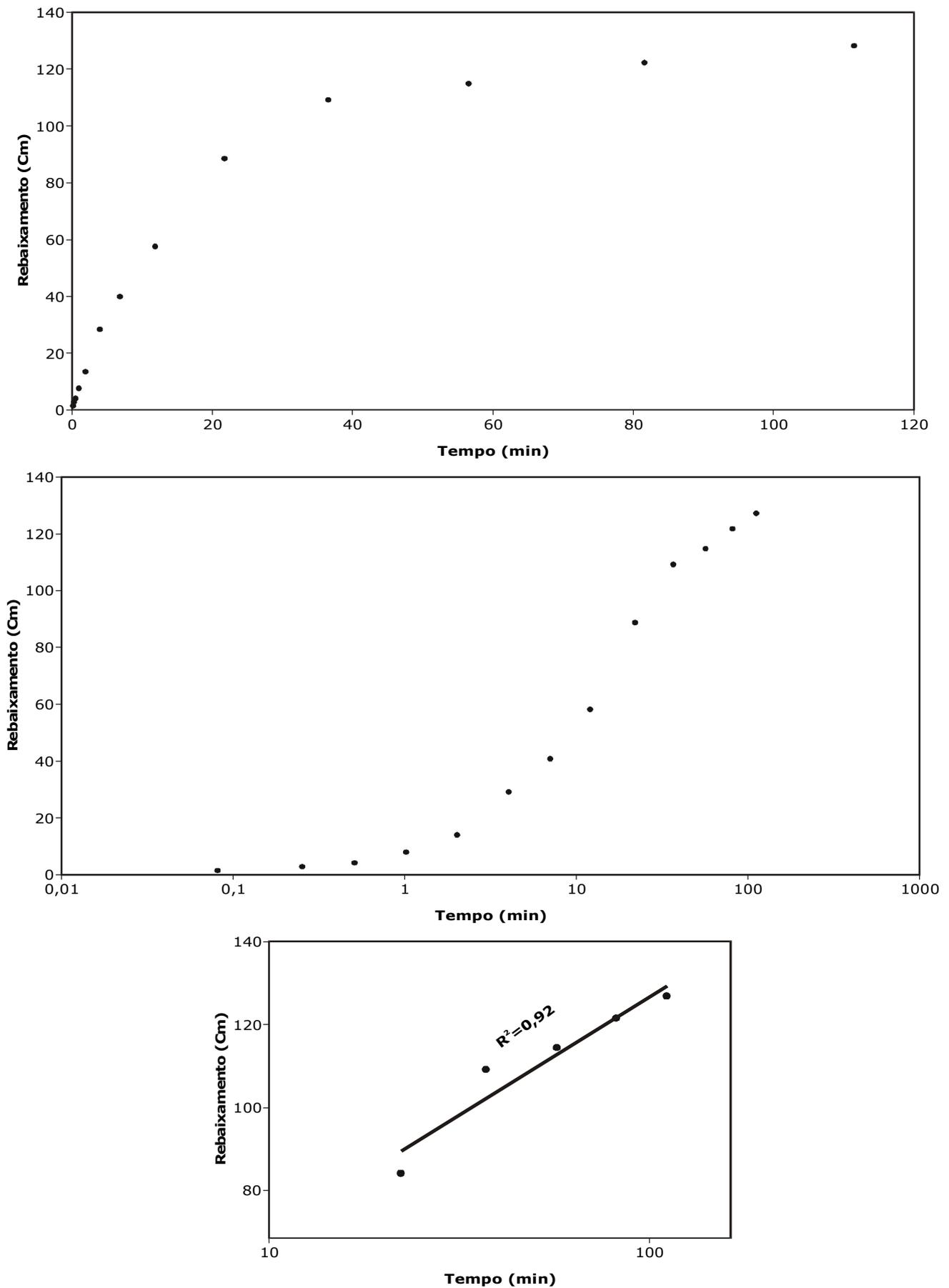


Fig. 4. Resultados obtidos nos ensaios realizados no furo 1 – Área Norte.

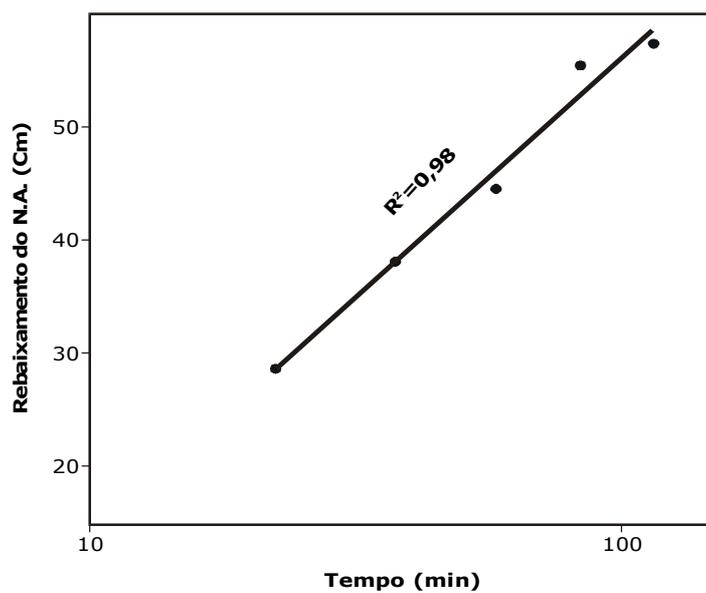
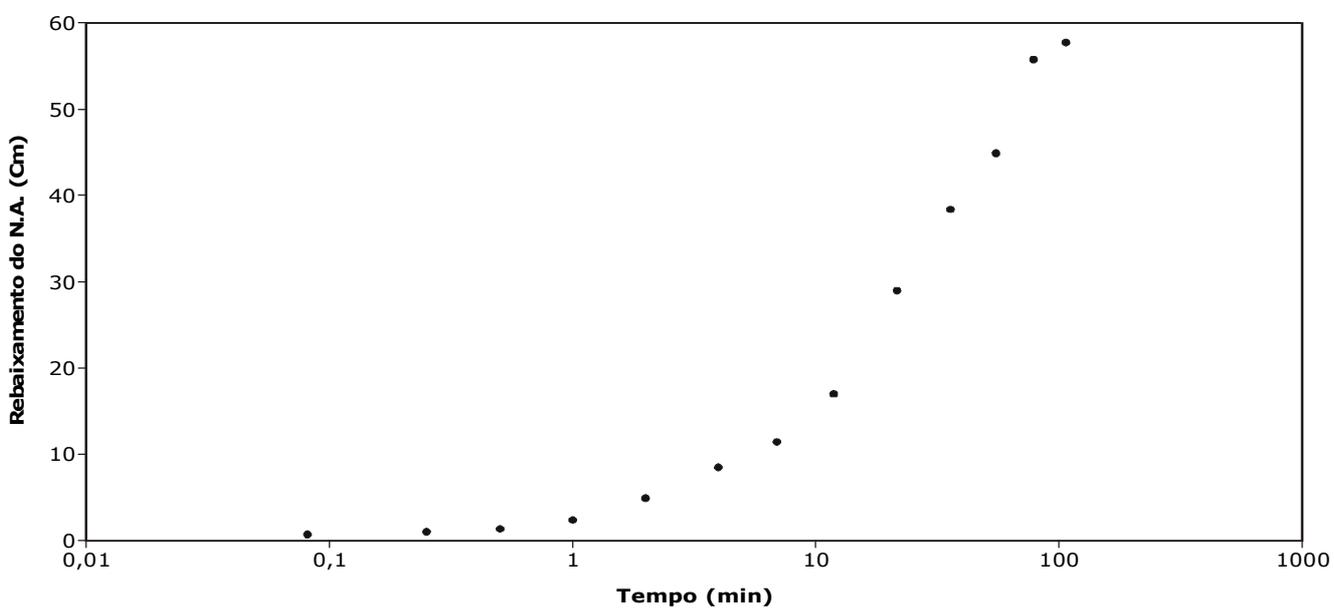
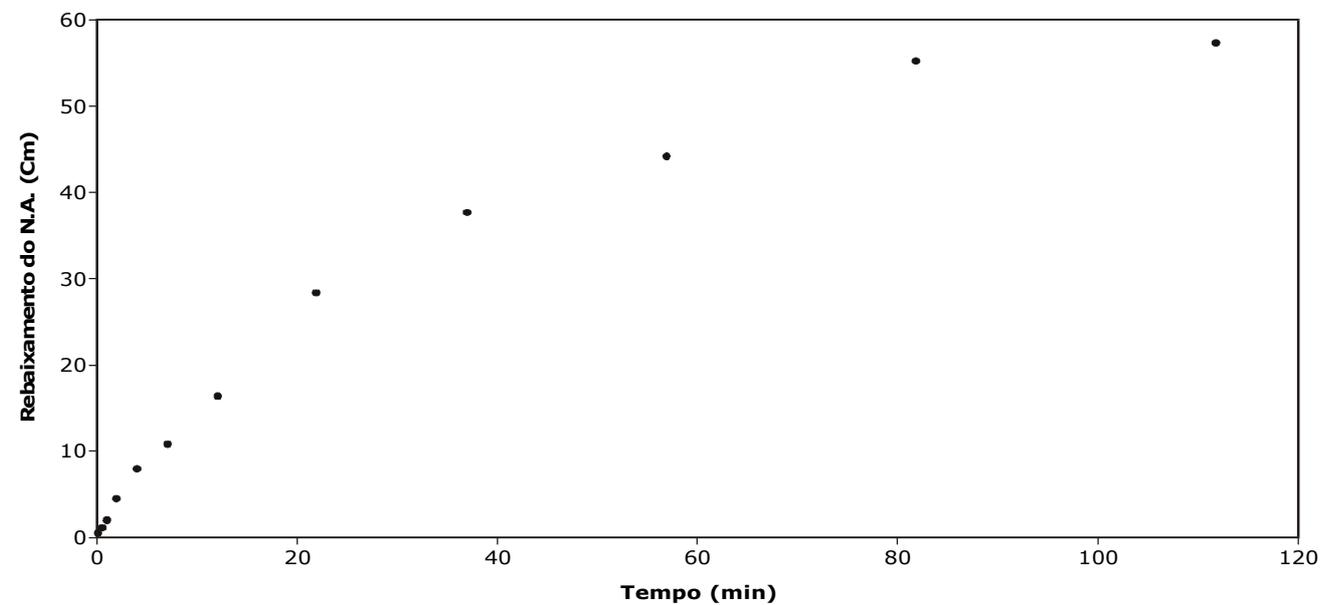


Fig. 5. Resultados obtidos nos ensaios realizados no furo 2 – Área Norte.

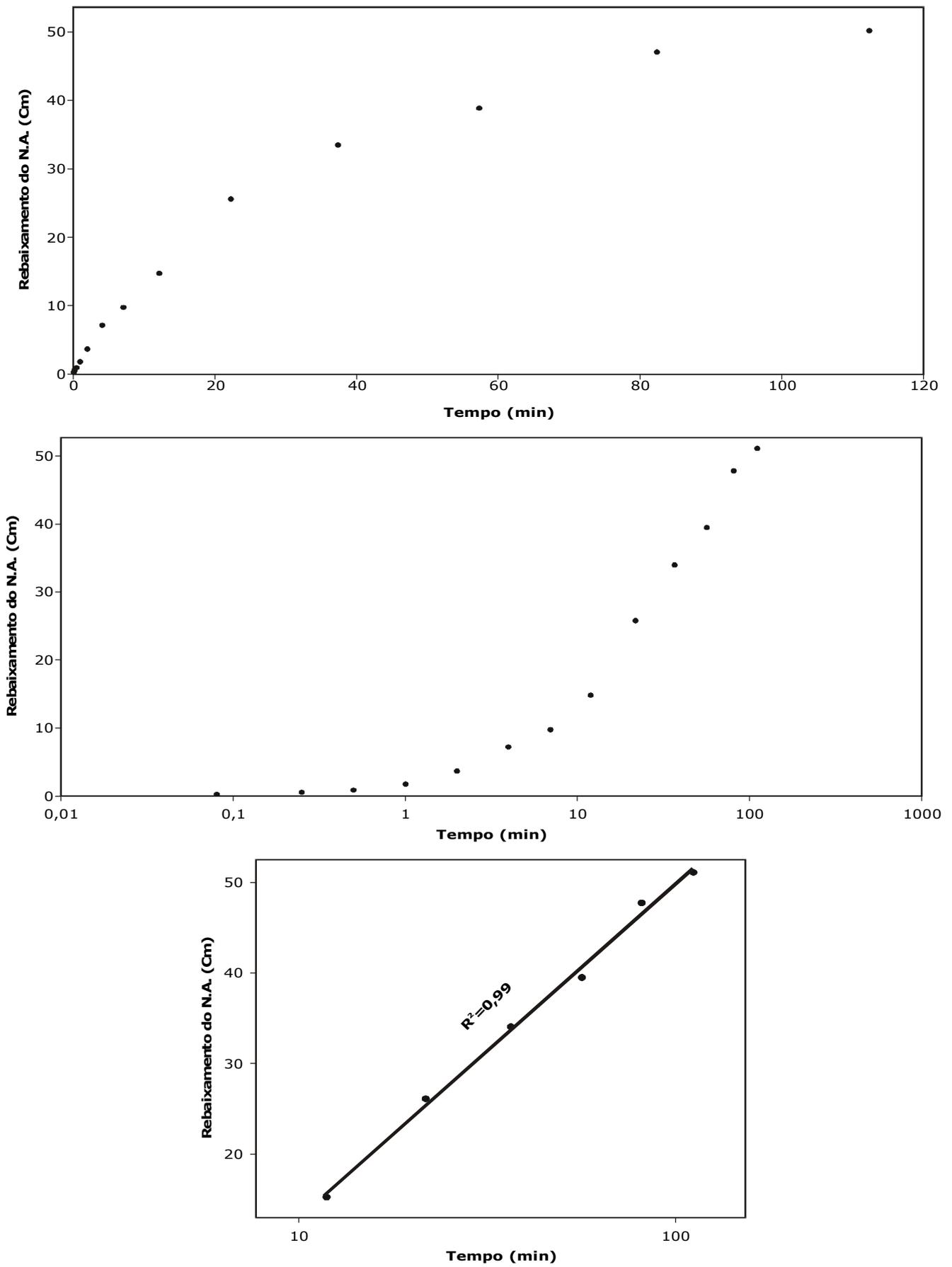


Fig. 6. Resultados obtidos nos ensaios realizados no furo 1 – Área Sul.

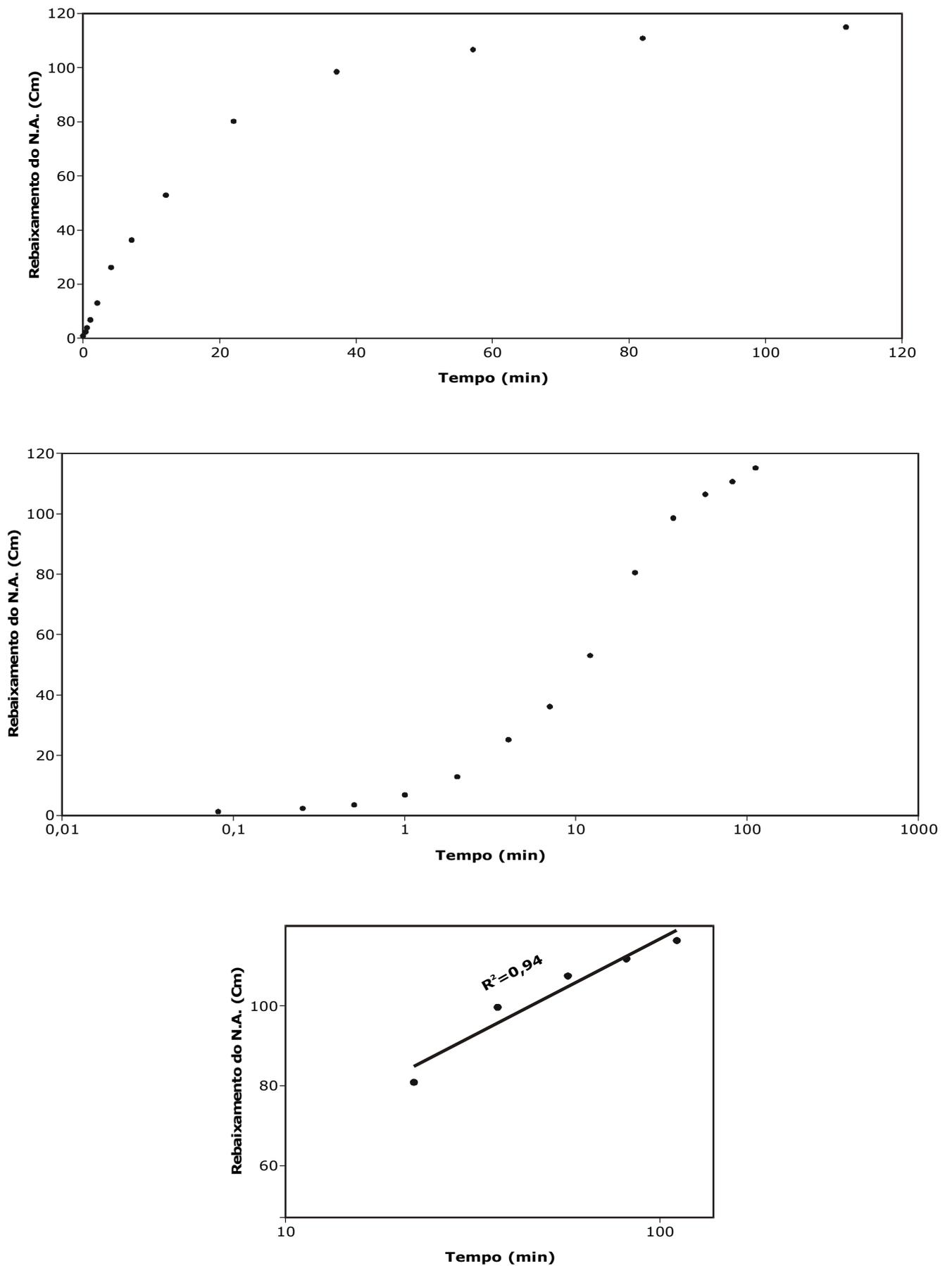


Fig. 7. Resultados obtidos nos ensaios realizados no furo 2 – Área Sul.

horizontal é mais flexionado para o vetor de *direção* do fluxo de água do nível de base local, que, no caso, é o Córrego do Veado. Essa flexão comprova que não existem "barreiras" lito-estruturais que restrinjam o fluxo hidráulico.

Entretanto, na *Área Sul*, observa-se que as linhas de fluxo são menos homogêneas, têm maior gradiente e sofrem muitas inflexões nos vetores de *direção*, sendo algumas, inclusive, voltadas para SE, contrárias à sua direção geral. Isso ocorre devido ao controle lito-pedológico e também tectônico-estrutural, porque existe na área um falhamento representado pela calha do Córrego do *Grand Canyon*, que se prolonga na direção NW, não sendo visível nos levantamentos geológicos de superfície, nem em fotos aéreas, por estar encoberta pelos solos de *creep* ou de colúvios existentes no local. Contudo, ele foi detectado pelo comportamento diferente das linhas de fluxo da água subterrânea. Para corroborar o fato, na região, a uma distância de 1.000 metros a NE do local, existe um outro falhamento com o mesmo comportamento, conforme indica o mapa geológico da região.

No que diz respeito ao transporte de elementos químicos provenientes de sua percolação pelo substrato dos tanques e das lagoas de decantação, em direção ao lençol freático, observou-se que, apesar do fato do solo ser muito arenoso, com alta porosidade, os valores de condutividade hidráulica (na faixa de $4,7-8,7 \times 10^{-5}$ cm/s) e os coeficientes de infiltração (entre 11,7 e 22,3 L/h/m²) sugeriram pouca susceptibilidade à ocorrência deste processo, de acordo com o tipo de solo existente na área (classificado como tendo condutividade hidráulica "ruim"). A baixa vulnerabilidade foi também evidenciada pelas análises químicas efetuadas por ocasião de outros ensaios (de solubilização e lixiviação) realizados na área, bem como pelos periódicos monitoramentos hidrogeoquímicos conduzidos. Os dados químicos obtidos nesses monitoramentos para as águas superficiais e subterrâneas foram comparados com os limites máximos de concentração estabelecidos pela legislação vigente, tendo sido verificado que os valores não indicaram a ocorrência de qualquer impacto ambiental relacionado com as atividades de mineração de areia nas áreas investigadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Cederstrom, D.J. Água Subterrânea – Uma Introdução. Centro de Publicações Técnicas da Aliança, Rio de Janeiro, 1964.
2. Todd, D.K. Hidrologia de águas subterrâneas. Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1959.
3. Castany, G. Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Dunod, Paris, 1982.
4. Custodio, E. & Llamas, R.M. Hidrologia subterrânea. Omega, Barcelona, 1976.
5. de Marsily, G. Quantitative Hydrogeology: Groundwater Hydrology for Engineers. Academic Press, Inc., New York, 1986.
6. Liazi, A., Conejo, J.G.L., Palos, J.C.F., Cintra, P.S. Regionalização hidrológica no Estado de São Paulo, Revista Águas e Energia Elétrica, São Paulo, N. 14, V. 5, 1988.
7. Oliveira, J.B. Solos do Estado de São Paulo: descrição das classes registradas no mapa pedológico. Boletim Científico do Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, N. 45, 1999.
8. Munsell. Soil Color Charts, Kollmorgen Corporation, Baltimore, 1994.
9. ABGE (Associação Brasileira de Geologia de Engenharia). Ensaio de permeabilidade em solos: orientações para sua execução no campo. Boletim 04, 1981.
10. Castany, G. Traité pratique des eaux souterraines. Dunod, Paris, 1967.