

CONHECIMENTO DO AQUIFERO BOTUCATU NA CIDADE DE ARARAQUARA — SP

Jacyro PIUCI*
Hélio Nóbile DINIZ**

RESUMO

O Aquífero Botucatu excede as demandas de abastecimento da Cidade de Araraquara, no Estado de São Paulo. Possui, em geral, águas com excelentes qualidades. Todavia, são necessários conhecimentos detalhados de suas características para embasarem concepções arrojadas de captações subsuperficiais, além de propiciarem subsídios que auxiliem no disciplinamento obrigatório do uso destas águas. Neste artigo são apresentados aspectos geológicos locais do aquífero e alguns resultados relacionados às propriedades hidráulicas em seis poços existentes, através do método de JACOB (1940). No presente artigo questionam-se os números encontrados através deste método.

ABSTRACT

The Botucatu Aquifer exceeds the needs of water supply in Araraquara (SP). In general its waters are of excellent qualities. Though it is necessary detailed knowledge of the characteristics of Botucatu Aquifer to outline foremost conceptions of ground water impounding besides, providing fundamentals for the obliged disciplinary of water use. This work presents geological features of the local aquifer and the outcomes related to hydraulics proprieties in 6 wells. Through "Jacob method" (1940) the data obtained are controverted.

1 INTRODUÇÃO

A ocupação do território onde está situada a cidade de Araraquara, "mora-da do sol" em linguagem tupi, iniciou-se pelo colonizador a quase dois séculos, quando o fluminense Pedro José Neto lá chegou no final do século 18. As condições, favoravelmente predominantes na parte leste do planalto ocidental do Estado de São Paulo, aliadas à presença de riquíssimos solos originados da decomposição de certas formações geológicas, são os determinantes mais importantes na geração de riquezas sociais para a região de Araraquara, desde o último quartel do século passado e intensivamente nas primeiras décadas do atual, quando a cafeicultura e, posteriormente, a pecuária leiteira e de corte, e a cana-de-açúcar, convergiram para tal bem-estar.

Observou-se, depois, principalmente na segunda metade deste século, crescente substituição para outros tipos de ocupações (lavouras em geral e citricultura) que animam um modesto, porém progressista, parque industrial e uma tendência a maior integração com a vida metropolitana. Durante os últimos anos, as "plantations" de cana para finalidades de produção de álcool tomam lugares de modalidades de usos anteriores, em grandes extensões.

A maior parte da cidade está construída em cima de rochas sedimentares alteradas da Formação Adamantina (com espessuras de algumas dezenas de metros) e uma parte menor de seu assentamento desenvolve-se sobre derrames basálticos intemperizados da Formação Serra Geral, identificada principalmente pela presença de solo marrom averme-

* Departamento de Águas e Energia Elétrica — DAEE — Rua Riachuelo, 115 — São Paulo, SP — Brasil.

** Instituto Geológico — SAA — Caixa Postal 8772 — São Paulo, SP — Brasil.

lhado argiloso (com espessura de 20 a 30 metros) que é característico da alteração do basalto. Ambas formações geológicas favorecem a ocupação territorial urbana existente, devido a apresentarem-se com topografia muito pouco acidentada, resultado de um relevo suave esculpido por erosão diferencial, onde as estruturas geológicas não proporcionaram heterogeneidade forte para condicionamento de desníveis topográficos mais acentuados. Além disso, os terrenos com cotas mais elevadas propiciam arejamento salutar. Estas feições climáticas e geomorfológicas favorecem sobremaneira uma expansão na parte setentrional dos limites urbanos, principalmente a nordeste, com rumo à cidade vizinha de Américo Brasiliense (acompanhando a ferrovia, tendência geral das cidades de espigões no planalto ocidental paulista). Os limites periféricos do setor noroeste da cidade estão estabelecidos pela calha do Ribeirão das Cruzes. Na periferia meridional, o crescimento da cidade está sujeito à interferência da Rodovia Washington Luiz (São Paulo-São José do Rio Preto) e à da variante (Ribeirão Preto-Bauru). Ao sul desta estrada, onde se instalou o aeroporto, existe uma área significativa de afloramentos da Formação Botucatu para a qual se recomendam cuidados especiais com sua preservação, pois existem razões para supor que, sendo área de recarga do principal aquífero para o abastecimento da cidade, determinados tipos de ocupação de seus solos poderiam produzir efeitos degenerativos no aquífero explorado.

O consumo d'água humano projetado para o final desta década na cidade de Araraquara (população prevista de 160.000 habitantes para 1990) soma 570 l/s. Por outro lado, as limitações atuais (360 l/s), existentes nas duas captações superficiais que abastecem a maior parte do consumo público, implicariam um déficit de 210 l/s, caso não fossem utilizadas as águas subterrâneas dos aquíferos ocorrentes. Todavia, na opção pelos recursos hídricos de subsuperfície, existe uma necessidade imperativa de conhecimento destas águas, em suas formas de jazimento e renovação, conforme trabalho inédito de PIUCI (1985). Nisto, a compreensão da hidráulica dos meios

porosos é imprescindível à otimização binária custo-productividade e para subsidiar com clareza o entendimento dos aspectos relacionados às recargas e conservação dos aquíferos, já que, do ponto de vista da qualidade físico-química natural, em geral não apresentam restrições aos diversos usos, particularmente nos domínios aflorantes. Do cadastramento dos poços existentes na cidade de Araraquara e suas adjacências, conclui-se que três aquíferos são explorados: Bauru, Serra Geral e Botucatu. Destes, o Aquífero Botucatu se destaca em função de sua grande potencialidade hídrica na área. Neste artigo, são analisados alguns aspectos hidráulicos relevantes do Aquífero Botucatu, baseando-se nos principais ensaios de bombeamento realizados em poços profundos na cidade de Araraquara, particularmente os coeficientes de transmissibilidade (T) e de armazenamento (S).

2 HISTÓRICO E DISCUSSÃO METODOLÓGICA

Os primeiros estudos sobre fluxo de água, através de tubos capilares com seção circular, foram feitos por HAGEN (1839) e POISEUILLE (1846), quando concluíram que a velocidade (v) do fluxo é proporcional ao gradiente hidráulico (i): $v \sim i$ (equação simplificada de HAGEN-POISEUILLE). DARCY (1856) confirmou esta equação através de aplicações em filtros de areia, somando aos conhecimentos de HAGEN e POISEUILLE o conceito de *coeficiente de permeabilidade* (K), conhecidos universalmente como lei de Darcy: $v = Ki$ (lei de Darcy simplificada). Esta lei, que fundou o aspecto teórico da hidrologia das águas subterrâneas, é válida quando aplicada em regime de fluxo laminar ou viscoso (menores velocidades) e não em regime de transição ou turbulento (maiores velocidades), embora existam fluxos em meios porosos que não obedecem à lei de Darcy. Por exemplo, esta não validade da lei de Darcy é um fenômeno que, segundo HAUSMAN (1980), parece ocorrer no Aquífero Serra Geral.

A primeira aplicação da lei de Darcy, para o cálculo do fluxo de água em um poço, foi feita por DUPUIT (1863). DU-

PUIT, partindo de analogia entre a equação modificada por DE PRONY (1804) para a lei da resistência dos fluidos proposta por DE COULOMB (1800) e a lei de Darcy, deduziu a expressão teórica da velocidade do fluxo para o interior do poço, gravitacionalmente, considerando uma superfície cilíndrica e arbitrária que o envolve. Para conseguir esta analogia entre a lei da resistência de DE COULOMB (modificada por DE PRONY), e a lei de Darcy, DUPUIT usou apenas o primeiro termo de uma série infinita, obtendo, assim, uma similaridade entre sua expressão, quase teórica, conforme DUPUIT (1854), e a fórmula empírica de DARCY. Então, em um aquífero livre com coeficiente de permeabilidade (k) e espessura saturada (H), um poço totalmente penetrante com raio (r_0) que seja bombeado com vazão (Q), propiciará uma coluna d'água (h_0) dentro do poço e uma superfície de rebaixamento até uma distância (R), onde: $Q = \pi k (H^2 - h_0^2) \log_e (R/r_0)$ (equação de DUPUIT). Entretanto, esta expressão é válida somente para o regime de equilíbrio, ou seja, quando não existe débito de água no aquífero, enquanto é explotado (neste caso há recarga do aquífero nas adjacências do cone de depressão). Esta condição impede sua praticidade, pois os aquíferos reais não estão em equilíbrio.

THIEM (1870) foi o pioneiro e o mais notável em trabalhos que foram desenvolvidos no campo das águas subterrâneas na Alemanha, durante as últimas décadas do século 19, e publicou uma série importante de seus resultados. Todavia, foi seu filho Gunther, dando continuidade aos trabalhos do pai, quem trouxe contribuição significativa para soluções práticas na hidrologia das águas subterrâneas (THIEM, 1906). Neste trabalho, THIEM desenvolveu seu método de investigação, considerando que: em um aquífero livre, com coeficiente de permeabilidade (k) e espessura (m), um poço totalmente penetrante bombeado (Q) resultará em rebaixamentos (s_1 e s_2) nos níveis d'água de dois poços de observação (1 e 2) afastados (r_1 e r_2) do anterior. Usando a lei de Darcy e aplicando adaptação para a fórmula de DUPUIT, THIEM conseguiu a expres-

são: $k = Q(\log_e r_2 - \log_e r_1) / 2\pi m(s_1 - s_2)$ (equação de THIEM). Esta equação possibilita o conhecimento de uma característica importante do aquífero, que é o *coeficiente de transmissibilidade* (T) através do produto (km) entre o coeficiente de permeabilidade (k , primeira característica importante do aquífero) e a espessura saturada (m). O método de THIEM foi amplamente praticado, mesmo com a limitação prática do regime de não equilíbrio. Entretanto, FORCHHEIMER (1886) já tinha inaugurado o estudo teórico do fluxo das águas subterrâneas, através da aplicação de cálculo diferencial (matemática avançada), na Áustria. FORCHHEIMER foi o primeiro a usar a equação de LAPLACE (laplaciano) para os fenômenos do fluxo d'água subterrânea, sendo que uma das suas maiores contribuições foi a determinação do relacionamento entre superfícies equipotenciais e as linhas de fluxo. Nos EUA, muitos trabalhos do mestre austríaco foram duplicados por Charles Sumner Slichter; por exemplo, SLICHTER (1899). Porém, somente no século seguinte é que aparece o primeiro compêndio que trata, sistematicamente, da mecânica dos fluidos aplicada ao fluxo d'água subterrâneo (MUSKAT, 1937).

Dois anos antes, THEIS (1935) publica um artigo, a partir do qual foi possível a introdução do conceito de *coeficiente de armazenamento* (S) através de analogia hipotética entre a lei do fluxo do calor e aplicação da lei da continuidade (conservação da massa). Assim, a teoria matemática da condução do calor ficou largamente aplicável à teoria hidráulica. A maior vantagem da proposição de THEIS é que pode ser aplicada mesmo sem atingir-se um estado de equilíbrio hidráulico no cone de rebaixamento e, por isto, conhecida como fórmula do não equilíbrio ou regime transitório (neste caso não há recarga do aquífero, daí a praticidade da fórmula de THEIS, pois os aquíferos reais geralmente estão nesta condição): $s = Q W(u) / 4\pi T$ (equação simplificada de THEIS), onde: s (rebaixamento do nível d'água no poço de observação, em metros); Q (vazão do poço bombeado, em metros cúbicos por hora); T (coeficiente

de transmissibilidade, em metros quadrados por hora ou metros cúbicos por hora por metro rebaixado); $W(u) = \int_0^{\infty} e^{-u}/u \, du = (-0,5772 - \log_e u + u - u^2/2.2! + u^3/3.3! - u^4/4.4! + \dots)$; $u = r^2S/4Tt$, onde: r (distância entre os poços bombeado e de observação, em metros); S (coeficiente de armazenamento, adimensional); t (tempo desde o início do bombeamento, em horas).

Em aquíferos livres (descomprimidos), onde as zonas saturadas não apresentam grandes espessuras, o coeficiente de armazenamento equivale à sua porosidade efetiva. Por outro lado, em aquíferos sob pressão (com confinamento), onde a equação de THEIS e seu método gráfico para cálculo de T e S têm aplicação conveniente, soma-se à sua porosidade o efeito da incompressibilidade da água e da elasticidade das rochas, proporcionando maior quantidade de água a ser extraída por unidade de volume do aquífero, em relação a um aquífero descomprimido com a mesma porosidade. Além das condições hipotéticas estabelecidas para a aplicabilidade eficaz da equação de THEIS, admitidas também para o regime de equilíbrio (homogeneidade, isotropia, geometria plana e horizontal etc.), a necessidade de um poço de observação localizado na área de abrangência do cone de rebaixamento limita sobremaneira a praticidade de tal método.

JACOB (1940) concluiu que a equação simplificada de THEIS, quando u é suficientemente pequeno ($u > 0,05$; nestes casos, tempo t suficientemente longo e distância entre os poços bombeado e de observação r suficientemente curta), pode ser substituída (usando apenas os dois primeiros termos, $-0,5772 - \log_e u$, da série função de u) por: $s = 0,183Q/T \log(2,25Tt/r^2S)$ (equação simplificada de JACOB). Nesta equação, quando o poço é bombeado com vazão (Q) invariável e considerando-se que o coeficiente de transmissibilidade (T) e o coeficiente de armazenamento (S) são características constantes do aquífero, o rebaixamento (s) do nível d'água no poço de observação varia em função de $\log t/r^2$. Mas, se r também é fixo, a função passa a ser do tipo: $s = \log C_1 t$ onde C_1 representa todos os termos constantes da equação

simplificada de JACOB. O método THEIS-JACOB pode ser tratado em linguagem programada (HONYK, 1980). Por outro lado, em papel semilogarítmico, desenha-se a função: $s = \log C_1 t$, onde o tempo t é plotado em escala logarítmica. Neste gráfico obtido, a equação de THEIS, modificada por JACOB, não pode ser aplicada para os primeiros tempos, onde a função não é retilínea, pois, neste trecho da curva, o valor de u supera 0,05.

A partir da equação simplificada de JACOB, e da reta inclinada no papel semilog (rebaixamento em função do tempo), calcula-se o valor do coeficiente de transmissibilidade (T), através da equação: $T = 0,183Q/\Delta s$, onde: Q é a vazão do poço bombeado em m^3/h e s é a variação do rebaixamento entre dois tempos (t_1 e t_2), em metros, cuja relação (t_2/t_1) seja uma dezena (um ciclo logarítmico).

Neste método para cálculo de T , o poço de observação pode ser o próprio poço bombeado, pois na equação simplificada de JACOB, quando r tende para zero, ou seja, o poço de observação se aproxima muito do poço bombeado e o tempo fica suficientemente longo, é possível obter-se valores reais para o coeficiente de transmissibilidade. Este parâmetro hidráulico — dimensionalmente em metros cúbicos por hora por metro rebaixado ($m^3/h/m$) — tem sido usado com outros nomes: capacidade ou vazão específica quando os rebaixamentos são medidos no poço bombeado e passando a constante 0,183 igual a um. Procedimento, este, conveniente para evitar-se confundi-lo com a mesma grandeza física hidráulica (T) quando tratada com outro dimensional: em unidade de área por unidade de tempo (p. ex. m^2/dia). O coeficiente de armazenamento (S) será calculado a partir da aplicação da equação simplificada de JACOB e usando-se a mesma reta construída em papel semilog. Assim, calcula-se o valor de S por: $S = 2,25Tt_0/r^2$, onde: t_0 (tempo inicial) é o valor obtido pela intersecção, por prolongamento da reta, $s = f(t)$, com o eixo do rebaixamento (s), que neste caso é igual a zero. A praticidade deste método é limitada devido à não existência do poço de observação para a maio-

ria dos poços de bombeamento. Todavia, é possível encontrar-se valores para S se o poço de observação estiver, hipoteticamente, localizado muito próximo do poço bombeado, pois, assim, a distância (r) entre os dois poços passa a ser o próprio raio do poço bombeado.

HUBBERT (1940) publicou importante trabalho sobre hidráulica dos meios porosos. Neste artigo, HUBBERT deduziu a lei de Darcy a partir das equações gerais de Navier-Stokes e introduziu o conceito de potencial de força, mais geral que o conceito de potencial de velocidade introduzido por FORCHHEIMER (1886). Com o fim da guerra, em 1945, os conhecimentos da hidráulica dos meios porosos passaram a ser, cada vez mais, extensivamente desenvolvidos para inúmeros casos particulares. A conceituação matemática aplicada ao movimento das águas subterrâneas toma rumos teóricos de altas resoluções. Por outro lado, exceto alguns trabalhos preliminares, como aquele inédito de ALVAREZ et alii (1976) e os publicados de FRANÇA & AYALA (1978); ALVAREZ et alii (1980); CRUZ & SILVA (1980); LEÃO (1980); RODRIGUES & BRAGA (1984); SOUZA & OLIVEIRA (1984), os modelos analógicos, matemáticos ou mistos para investigar o fluxo das águas subterrâneas com suporte nas últimas gerações de computadores, indicam que há, na área de abrangência da conceituação teórica sobre o assunto, uma distância brutal entre aplicações cotidianas para casos reais brasileiros (aqüíferos e captações) e o modo como este ramo das geociências é digerido nos centros de pesquisas avançadas internacionais; tais como os trabalhos publicados durante três décadas por pesquisadores norte-americanos, entre os quais se destacam REMSON et alii (1965 e 1971); PRICKETT & LONNQUIST (1971) e BEAR (1979).

3 CONDIÇÕES DE OCORRÊNCIA DO AQUÍFERO BOTUCATU

A cidade de Araraquara e adjacências está assentada próximo da borda nordeste da Bacia do Paraná. A síntese de suas características geológicas locais limita-se, aqui, às formações potencial-

mente mais ricas em recursos hídricos de subsuperfície e favoráveis a captações para abastecimento. Assim, descreve-se conforme DAEE & UNESP (1982), na seqüência estratigráfica normal, desde a formação mais antiga, sobreposta discordantemente à Formação Corumbataí, conhecida também como Estrada Nova (considerada localmente um aquíclodo), até as coberturas recentes. A Formação Pirambóia (Grupo São Bento) tem características de gênese flúvio-lacustre com depósitos de canal e de planície de inundação incluindo arenitos finos a médios, friáveis, avermelhados, siltico-argilosos, de estratificação cruzada ou plano-paralela, lamitos e arenitos-argilosos de cores variadas e raras intercalações de natureza arenoconglomerática. Recobrimdo totalmente esta formação, na área estudada, e aflorando na parte meridional, a sudeste e sudoeste, das adjacências da cidade, ocorre a Formação Botucatu (Grupo São Bento), constituída por arenitos eólicos avermelhados, de granulação fina e média, bem selecionados, friáveis e com estratificações cruzadas de médio a grande porte, depósitos fluviais restritos de natureza arenoconglomerática e camadas localizadas de siltitos e argilitos lacustres. Tamponando a Formação Botucatu, exceto nas adjacências sulinas (sudeste e sudoeste) da área, ocorre a Formação Serra Geral (Grupo São Bento), constituída por rochas vulcânico-toleíticas de traps basálticos, de coloração cinza a negra, com eventuais ocorrências de arenitos intertraps, finos a médios, de estratificação cruzada tangencial. Capeando a Formação Serra Geral e pequena porção da Formação Botucatu aflorante a sudeste, predominantemente nas cotas mais elevadas, ocorre a Formação Adamantina (Grupo Bauru), supratrap, ocasionalmente em manchas isoladas, constituída por depósitos fluviolacustres com predominância de arenitos finos e muito finos, cores creme e vermelha, às vezes com cimentação e nódulos carbonáticos e lentes de siltitos arenosos e argilitos, em bancos máciços, podendo apresentar estratificação plano-paralela e cruzada de pequeno a médio porte. Ocorrem ainda aluviões em geral, incluindo areias inconsolidadas de granulação variável, ar-

gilas e cascalheiras fluviais subordinadamente, em depósitos de calhas e/ou terraços, conspicuamente nas adjacências a sudoeste da área. Em várias perfurações ocorrem intrusões diabásicas, em forma de sill, às vezes com uma dezena de metros de espessura, encaixadas no pacote de arenitos (Botucatu-Pirambóia) infratrap e na zona de contato com a Form. Corumbataí. Em superfícies, outras dessas intrusões, em forma de diques, ocorrem a sudeste da área.

Os arenitos infratrap com fácies fluvial (Fm. Pirambóia) do Grupo São Bento depositaram-se durante o Triássico superior, depois de ocorrido um grande hiato, sobre uma superfície erosiva, preexistente, no topo do Grupo Passa Dois. O ambiente deposicional passou para seco, com aparecimento do paleodeserto de Botucatu. Movimentações tectônicas ocorridas em diferentes fases, durante largo tempo geológico até o Cenozóico, que atingiram toda a extensão da Bacia do Paraná, provocaram soerguimentos, basculamentos e abaulamentos dos arenitos infratrap, extravasamentos pulsativos de traps basálticos e intrusões diabásicas. Os derrames basálticos colocaram em submersão a maior parte do topo dos antigos campos de dunas continentais e eventuais deposições arenosas intertraps. Por outro lado, parece que não atingiram as cotas mais altas destas paleodunas na parte onde estes arenitos eólicos afloram fortemente silicificados. Nas janelas do Botucatu, posteriormente, depositaram-se formações cretácicas e cenozóicas. Durante o quaternário as águas de precipitações atmosféricas preenchendo os espaços vazios do pacote de arenitos infratrap passam a ser água subterrânea. Esta, sucintamente, é a configuração temporal-espacial concernente ao Aquífero Botucatu (Fig. 2.1 e 2.2).

O potencial hidráulico da Formação Pirambóia é inferior àquele apresentado pela Formação Botucatu, embora suas características hidrodinâmicas sejam semelhantes. Entretanto, os poços que atingiram o topo da subsequente Formação Corumbataí (aquicludo) — totalmente penetrantes no aquífero — não apresentam conteúdo técnico suficiente que justifique uma separação entre as

duas formações aquíferas (Botucatu-Pirambóia) com finalidades de estudo das suas feições hidrológicas distintas. Assim sendo, por enquanto, este pacote de rochas sedimentares clásticas psamíticas é tratado como um só aquífero, com o nome consagrado pelo uso: Aquífero Botucatu. A porosidade total e efetiva de certas partes do topo do Botucatu está limitada pelo efeito da ação do fenômeno da silicificação ou cimentação por precipitações silicosas. Não cabe neste artigo discutir a gênese deste fenômeno, todavia é relevante considerar estas ocorrências, em função das implicações negativas que têm sobre volumes d'água disponíveis para exploração e positivas quanto ao caráter inerente ao confinamento. Exemplo espetacular desta silicificação poderá ser observado, a céu aberto, na Pedreira São Bento.

Em região de clima tropical úmido (tipo Cwa, segundo Wladimir KOEPPEN) a precipitação, excedendo a soma de todas as parcelas com caráter efêmero no ciclo hidrológico, propicia um fluxo estacional de água descendente, em terrenos suficientemente permeáveis, graças à influência da capilaridade e sob ação do campo gravitacional. Esta parcela de água que se infiltra propende a ocupar todos os vazios interligados dos meios porosos. Doutro lado, os gradientes hidráulicos naturais existentes nas superfícies continentais, em processo geral de dissecação intempérico-erosiva, possibilitam escoamento por gravidade, às vezes rápidos ou muito lentos, destas águas infiltradas livres. Estes dois fenômenos (infiltração e escoamento) são os geradores da maioria dos aquíferos. Por exemplo, em aquíferos onde as superfícies de suas águas estiverem em equilíbrio com as pressões atmosféricas, os movimentos das águas infiltradas são rápidos e, ao contrário, em aquíferos sob pressões litostáticas, havendo dificuldades para descargas, estas águas possuem tempo geológico de residência. Estas duas situações acontecem com muita nitidez no Aquífero Botucatu onde, nas partes aflorantes, as águas infiltradas, com tempo de residência estacional, contribuem com a maior quantidade do volume escoado em superfície; e, nas partes comprimidas, permanecem quase

Fig. 2.1- MAPA GEOLÓGICO DA REGIÃO DE ARARAQUARA-SP.

REVISÕES	REV.	APR.	DATA
ANTÔNIO C. ROQUEJANI	J.PIUCI	M.F.C. LOPES	FEV/86

- OBSERVAÇÕES:**
- UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS**
- HOLOCENO**
- Qa Depósitos aluviais, areias e argilas, conglomerados na base.
- PLIOCENO-PLEISTOCENO**
- TQcv Depósitos coluviais de espigão, areias com matriz argilosa; cascalhos de limonita e quartzo na base.
- CRETÁCEO**
- grupo Baur.**
- Ka FORMAÇÃO ADAMANTINA - Arenitos finos a muito finos, com teor de matriz variável, lamitos e siltitos, cores creme e vermelho.
- grupo São Bento.**
- JKsg FORMAÇÃO SERRA GERAL - Basaltos toleíticos em derrames tabulares superpostos e arenitos inter-traps.
- Tr Jb FORMAÇÃO BOTUCATU - Arenitos finos a médios, estratificação cruzada de grande porte, cores creme e vermelho.

- CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS E GEOLÓGICAS**
- Perímetro urbano
 - Reservatório existente
 - Curso d'água
 - Rodovia pavimentada
 - Rodovia sem pavimentação
 - Estrada de ferro
 - Contato definido
 - Contato inferido
 - Poço profundo no aquífero Botucatu
 - Poço profundo no aquífero Baur / Serra Geral
 - Sondagem Elétrica Vertical
 - Seção geológica

- REFERÊNCIAS**
- Mapa geológico do Estado de São Paulo. Folha de Araraquara. DAEE/UNESP - 1982. Escala - 1:250.000.
 - Mapa geológico da região 6. DAEE - 1974. Escala - 1:250.000.
 - Mapa geológico - Semidetalhe do centro-leste de São Paulo. PETROBRAS - 1971. Escala - 1:100.000.
 - Mapa geológico do Estado de São Paulo. IPT - 1981. Escala - 1:500.000.
- BASE CARTOGRÁFICA**
 Carta do Brasil - IBGE - 1973
 Escala - 1:50.000

PROJETADO JACYRO PIUCI
 DESENHADO Sérgio Roberto da Costa Melo
 VERIFICADO
 DATA JULHO/84
 APROVADO MAHOEL F.C. LOPES



TÍTULO
 MAPA GEOLÓGICO DA REGIÃO DE ARARAQUARA - SP.

ESCALA
 NÚMERO DO DESENHO

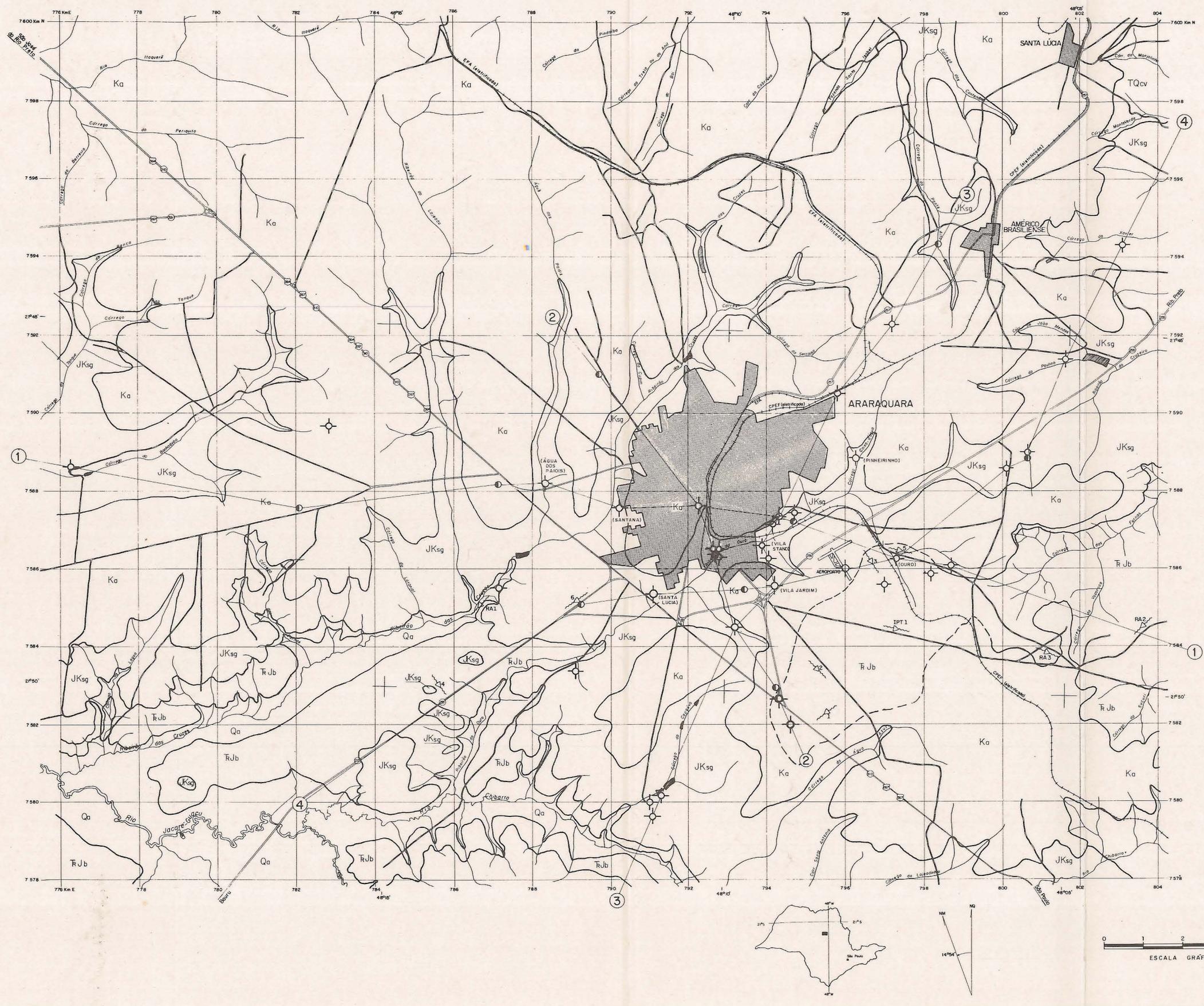


Fig.2.2-SEÇÕES GEOLÓGICAS DA REGIÃO DE ARARAQUARA-SP.

REVISÕES	REV.	APR.	DATA
DES. ANTONIO C. ROQUEJANI	J. PIUCI	M.F.C. LOPES	FEV/86

OBSERVAÇÕES:

UNIDADES LITOSTRATIGRÁFICAS

- CRETÁCEO**
- Grupo Adullá: **Ka** - FORMAÇÃO ADAMANTINA - Arenitas finas a muito finas, com teor de matriz variável, lamitos e siltitos, cores creme e vermelho.
- TRIASSICO-CRETÁCEO**
- Grupo Bertioga: **JKsg** - FORMAÇÃO SERRA GERAL - Basaltos tefalíticos em derrames tabulares superpostos e arenitos intertraps.
- São Bento: **RJb** - FORMAÇÃO BOTUCATU - Arenitas finas a médias, estratificação cruzada de grande porte, cores creme e vermelho.
- PERMIANO**
- Passo das Pedras: **RJp** - FORMAÇÃO PRAMBÓIA - Arenitas finas a médias com matriz silício-argilosa, estratificação cruzada de médio a grande porte, cor vermelho claro.
- Pc** - FORMAÇÃO COFUMBATA - Arenitas muito finas, siltitos, lamitos e folhetos, níveis de calcários oolíticos e coqueiros, cores predominantemente lídicas e cinza.

CONVENÇÕES

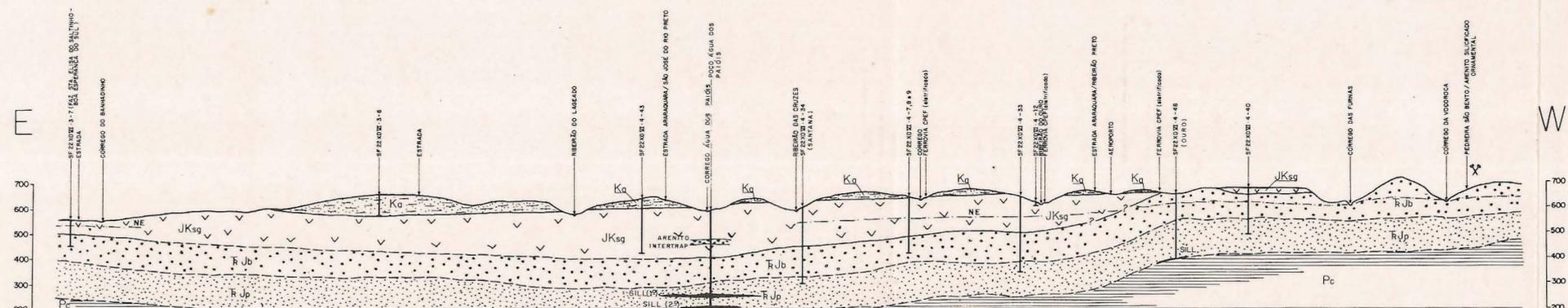
- Contato definido
- - - Contato inferido
- ⊥ Poca profunda
- S.E. Sondagem Elétrica Vertical
- NE - - - - - Nivel D'Água

- REFERÊNCIAS**
- 1 - Mapa geológico do Estado de São Paulo. Folha de Araraquara. DAEE/UNESP - 1982. Escala - 1:250.000.
 - 2 - Mapa geológico da região 6. DAEE - 1974. Escala - 1:250.000.
 - 3 - Mapa geológico - Semidetalhe do centro-leste de São Paulo. PETROBRAS - 1971. Escala - 1:100.000.
 - 4 - Mapa geológico do Estado de São Paulo. IPT - 1981. Escala - 1:500.000.
- BASE CARTOGRÁFICA
Carta do Brasil - IBGE - 1973
Escala - 1:50.000.

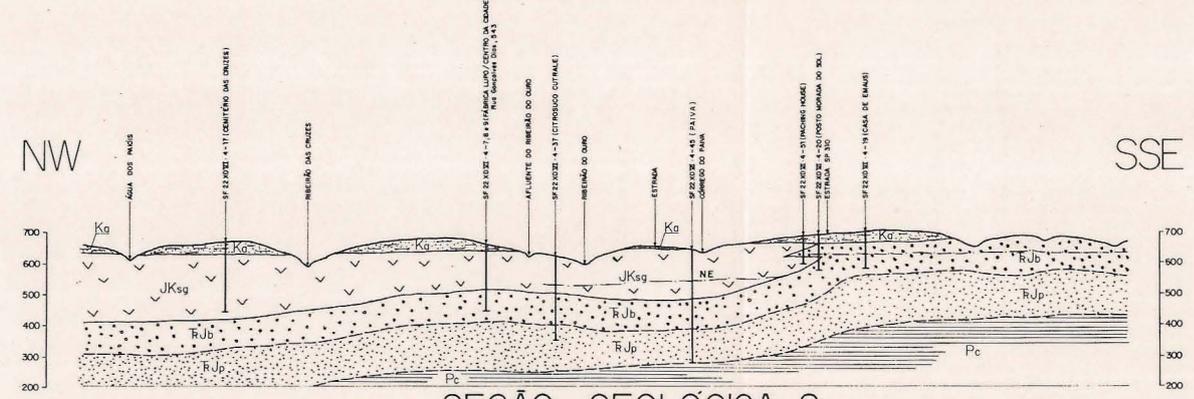
PROJETADO	JACYRO PIUCI
DESENHADO	SERGIO ROBERTO DA COSTA MELO
VERIFICADO	
DATA	JULHO/84
APROVADO	MANOEL F.C. LOPES
APROVADO	

SECRETARIA DE OBRAS E DO BEM AMBIENTE
DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA

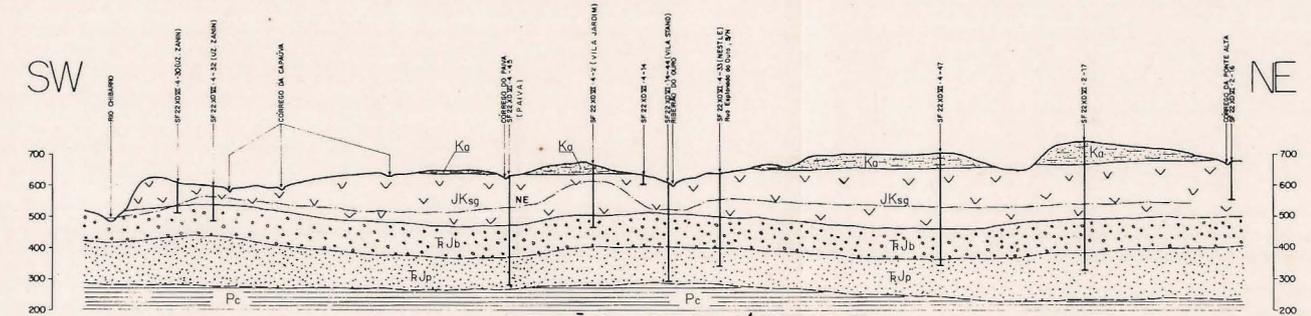
TÍTULO	SEÇÕES GEOLÓGICAS DA REGIÃO DE ARARAQUARA - SP.
ESCALA	
NÚMERO DO DESENHO	



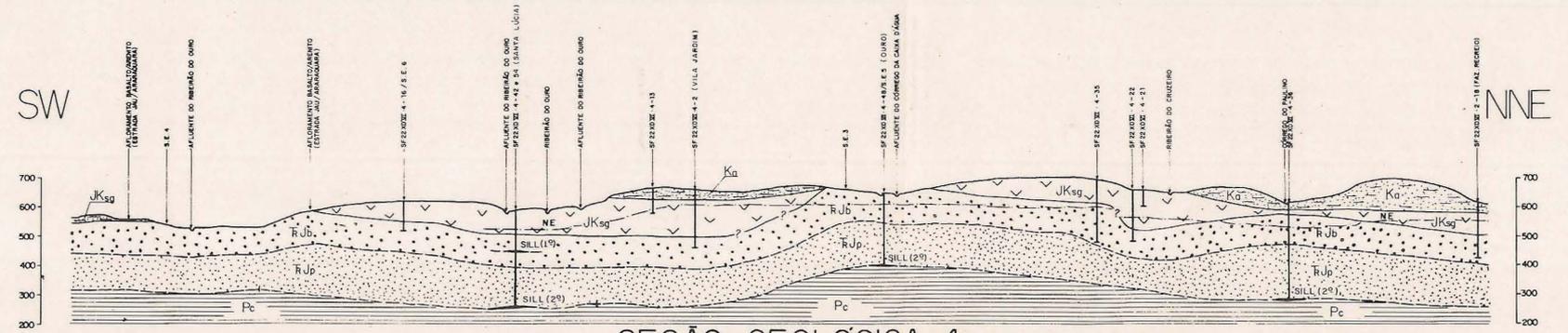
SEÇÃO GEOLOGICA 1



SEÇÃO GEOLOGICA 2



SEÇÃO GEOLOGICA 3



SEÇÃO GEOLOGICA 4

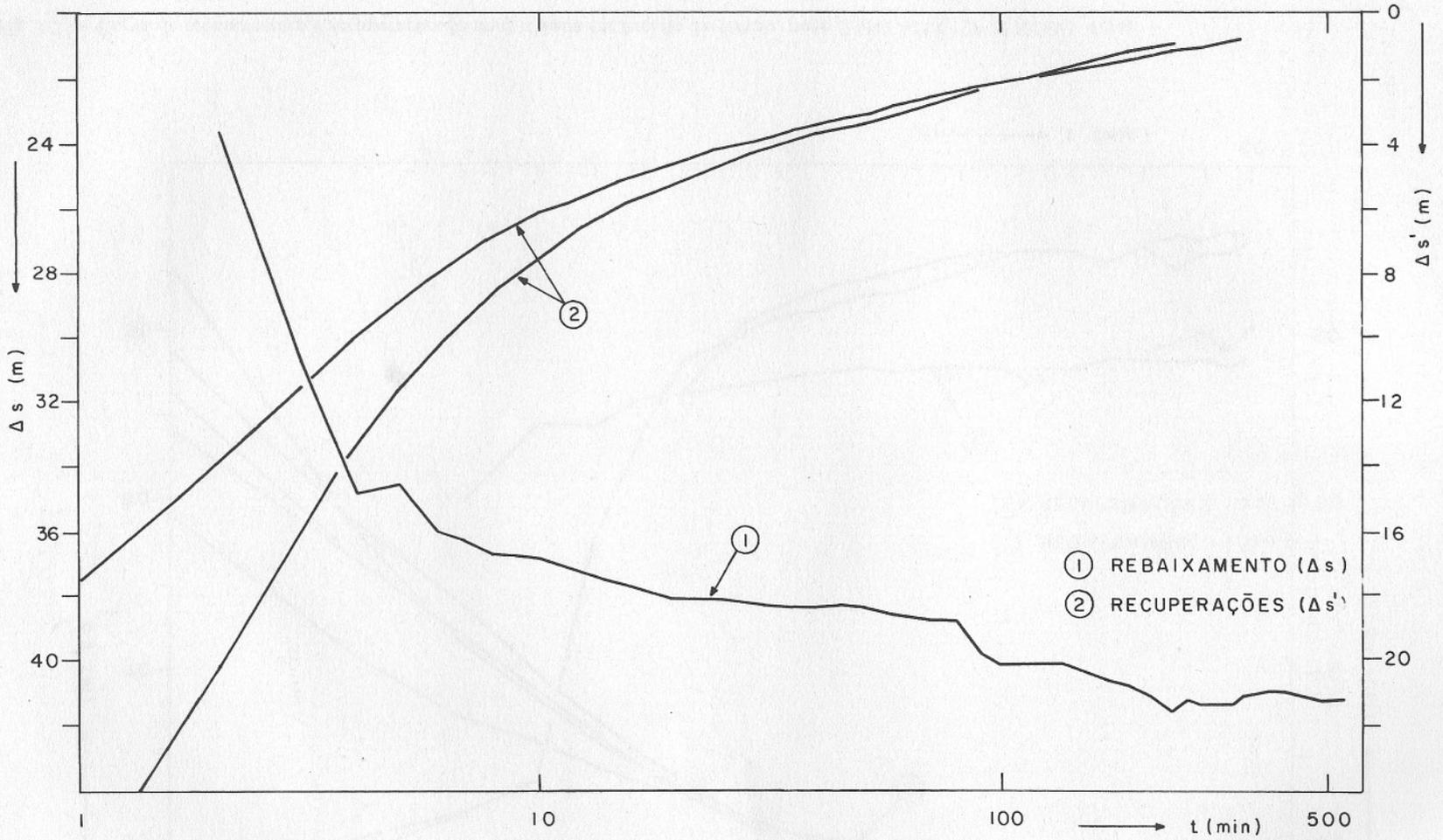


Fig. 3.1 — Curva de rebaixamento e recuperação do nível d'água em função do tempo; poço VILA JARDIM (SF 22 XD VI. 4-2).

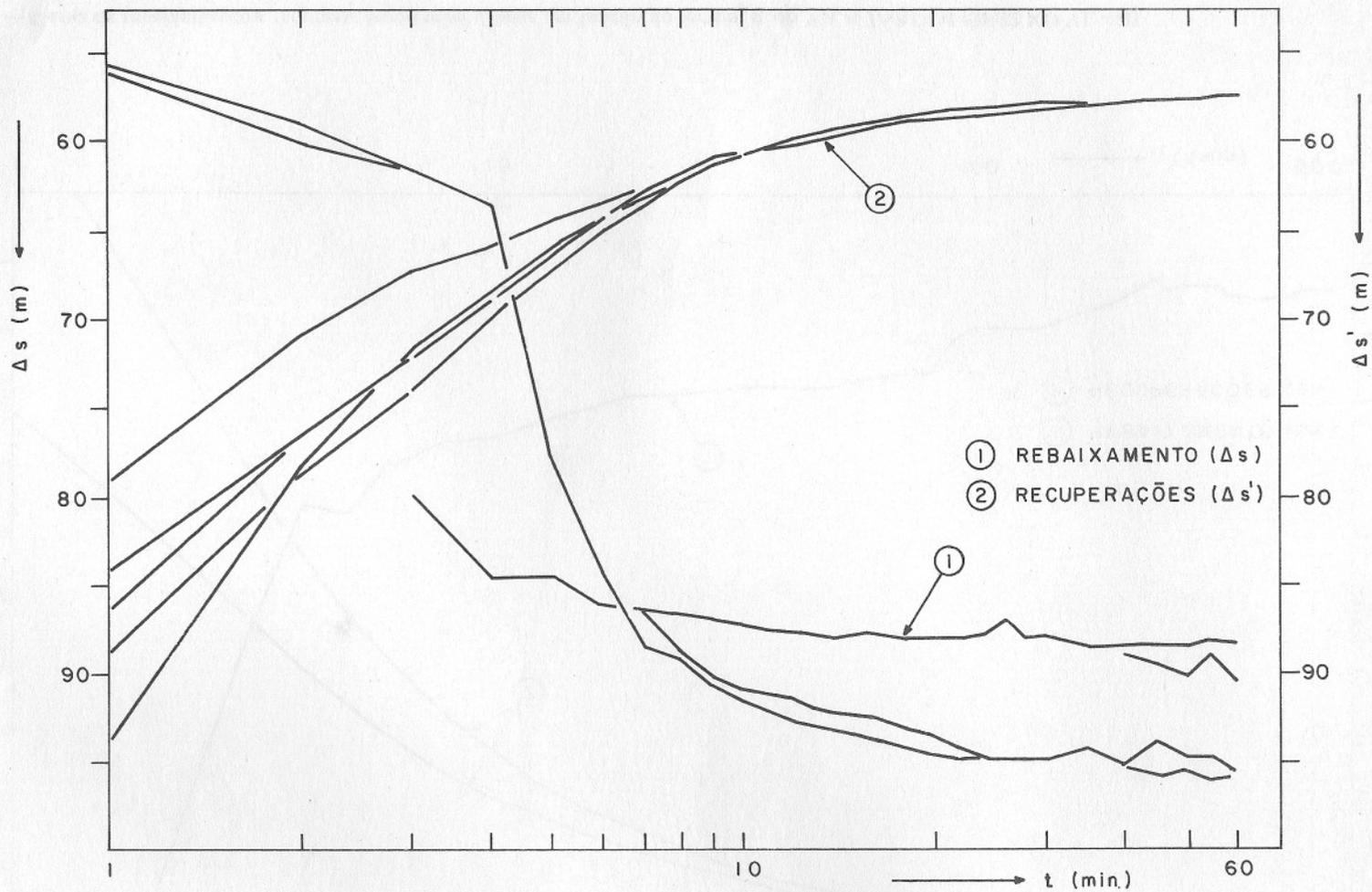


Fig. 3.2 — Curva de rebaixamento e recuperação do nível d'água em função do tempo; poço SANTANA (SF 22 XD VI. 4-34).

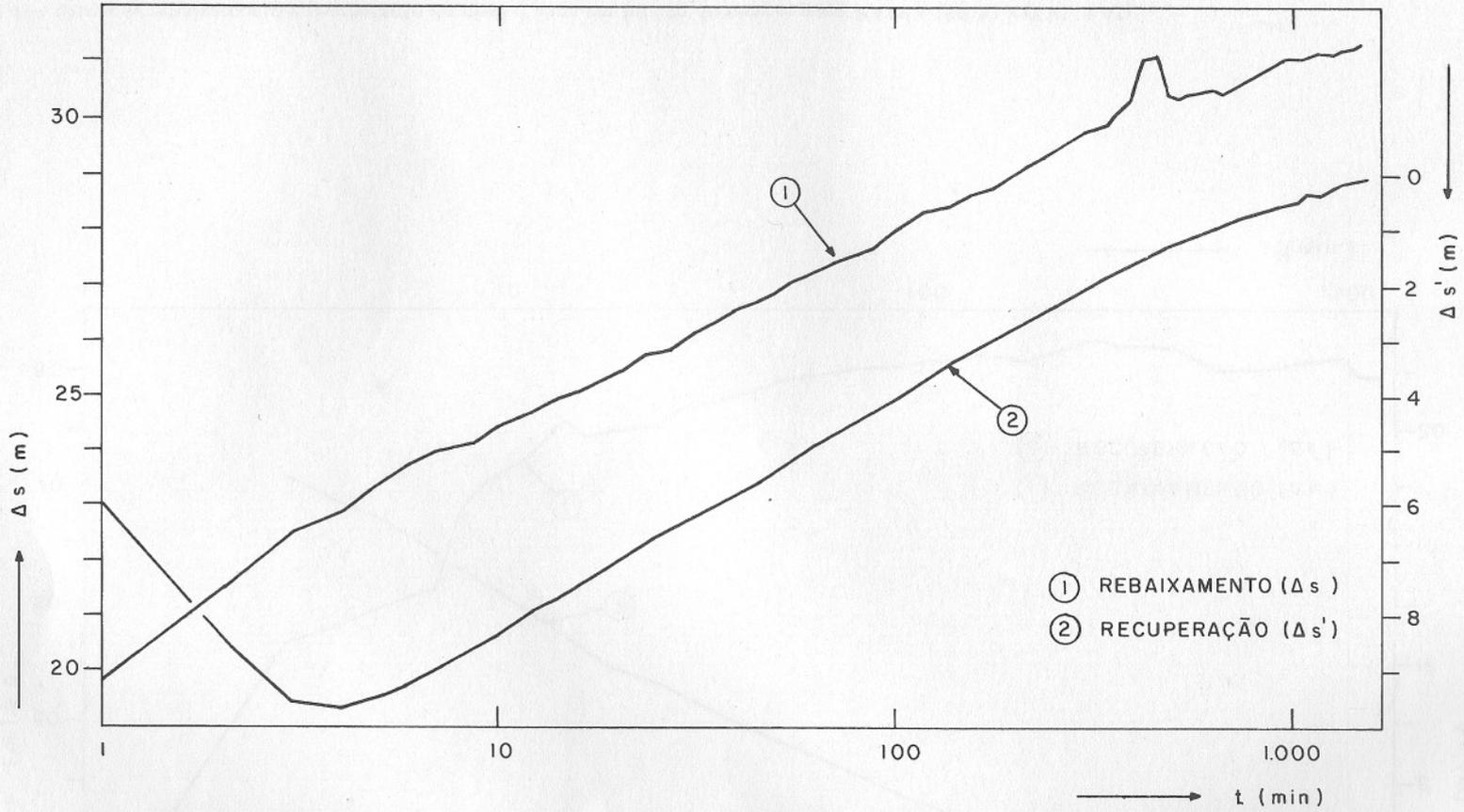


Fig. 3.3 — Curva de rebaixamento e recuperação do nível d'água em função do tempo para o poço VILA STAND (SF 22 XD VI. 4-44).

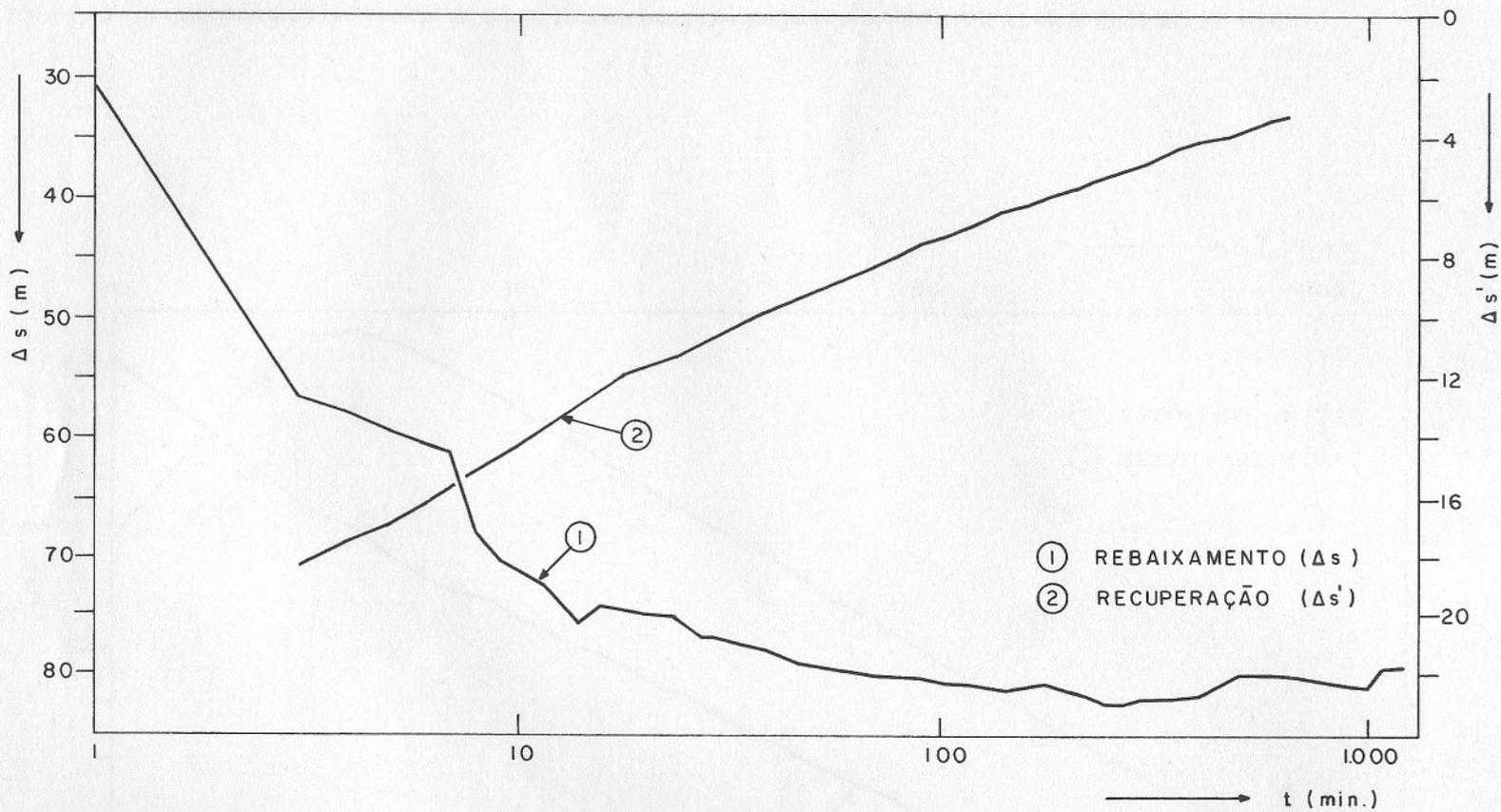


Fig. 3.4 — Curva de rebaixamento e recuperação do nível d'água em função do tempo; poço PAIVA (SF 22 XD VI. 4-45).

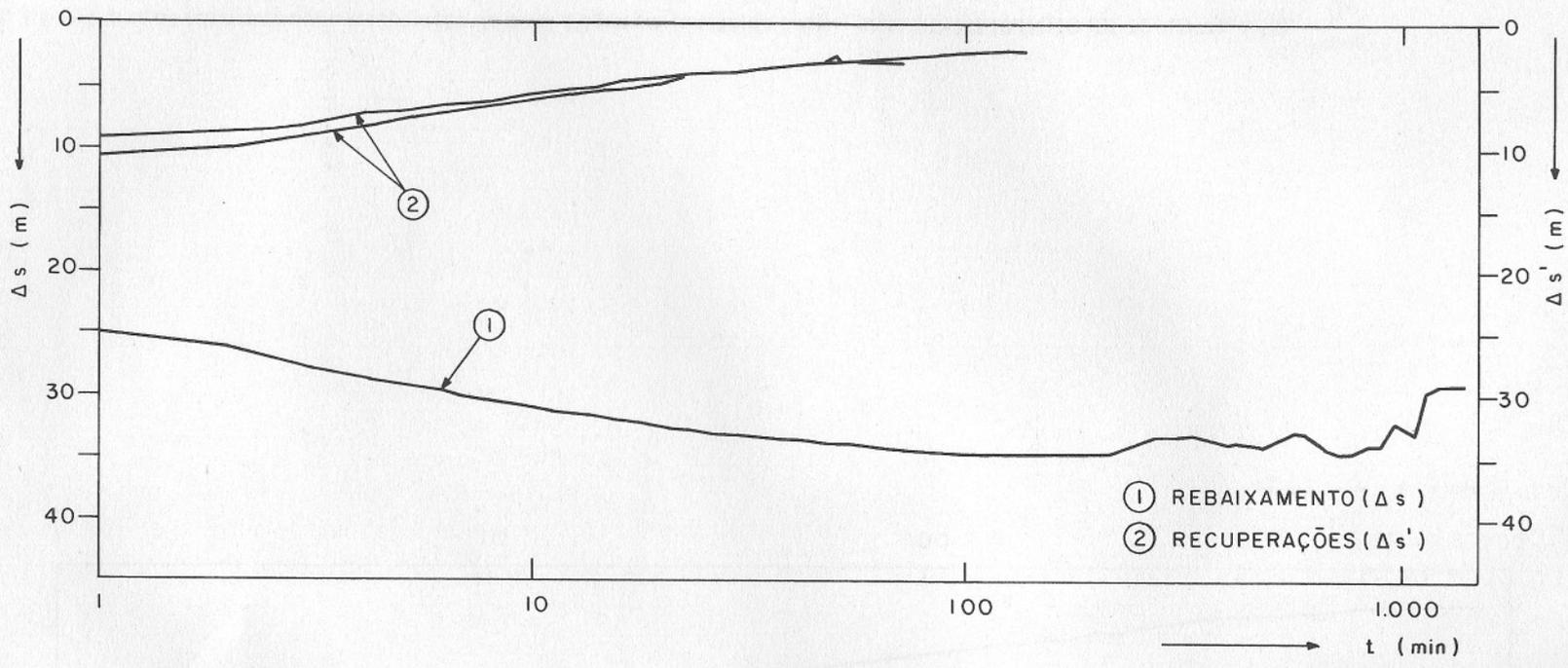


Fig. 3.5 — Curva de rebaixamento e recuperação do nível d'água em função do tempo; poço do OURO (SF 22 XD VI. 4-48).

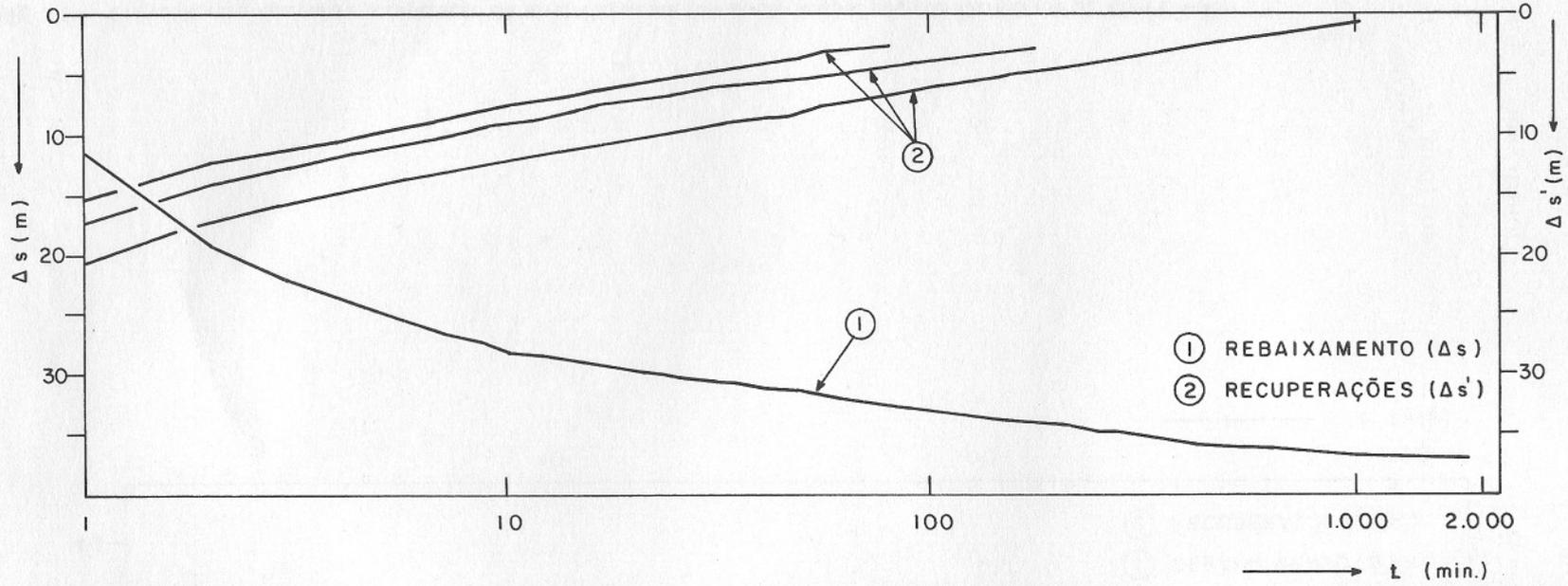


Fig. 3.6 — Curva de rebaixamento e recuperação do nível d'água em função do tempo; poço PINHEIRINHO (SF 22 XD VI. 4-58).

estacionadas, considerando o lapso da civilização humana (SILVA, 1984). Em trecho do Rio Jacaré-Guaçu, um balanço hídrico simplificado mostra que, a partir das precipitações, 76% são evaporadas, transpiradas ou fazem parte dos tecidos das coberturas vegetais, 18% são infiltradas ($243 \times 10^3 \text{ m}^3$ de água por Km^2 de afloramento durante um ano hidrológico), 6% são de escoamento tipo enxurrada e que o deflúvio do rio é formado por cerca de 76% das reservas reguladoras (estacionais) das águas subterrâneas (PIUCI & CAMPOS, 1984). A cidade de Araraquara, por estar localizada em uma área onde ocorre o Aquífero Botucatu desde livre até confinado, possui uma zona de transição no aquífero, a qual pode cambiar de regime hidráulico, em função da variação das descargas impostas. Este caráter peculiar tem fundamental importância para as obras de captações de águas e para o não-desequilíbrio dos recursos hídricos. Por exemplo, explorações excessivas do aquífero nesta zona de transição e em suas imediações poderão solicitar reservas reguladoras às vezes com qualidades comprometidas para o consumo e, embora estimativas das reservas permanentes permitam perspectivas otimistas nos futuros projetos de captações, é necessário conhecer-se as reservas exploráveis e os recursos explotáveis, pois, geralmente, não se tem dado devida importância à distinção entre "reserva de água subterrânea" e "recursos de água subterrânea".

As características hidrodinâmicas que melhor definem um aquífero, para efeito da formulação de seu uso, através de dispositivos de captação, são obtidas com ensaios de bombeamento. São três estes caracteres: coeficiente de permeabilidade (K), coeficiente de transmissibilidade (T) e coeficiente de armazenamento (S). Entretanto, a praticidade do controle da evolução do cone de rebaixamento, com inerentes riscos de interferências, bem como a definição da vazão e o regime de exploração, podem ser equacionados conhecendo-se a transmissibilidade (T) e o armazenamento (S), calculados pelo método THEIS-JACOB. Neste método, o valor da permeabilidade (K) pode ser estimado pela equação de

THIEM, dividindo-se o valor da transmissibilidade (T) encontrado pela espessura do aquífero. Doutro lado, mapas confeccionados para estes três parâmetros hidráulicos dependem da quantidade de pontos ensaiados (pois as tendências são feitas através de interpolações, permitindo maior grau de precisão à medida que a malha diminui), da qualidade dos ensaios, bem como dos resultados surgidos nas interpretações selecionadas. Por causa destas dependências, estes tipos de mapas são usados, geralmente, com certas cautelas até quando venham a ser produzidos com base em números de medidas mais ajustadas à realidade local. Assim, neste artigo, limita-se o conhecimento da hidráulica do Aquífero Botucatu às vizinhanças de alguns poços construídos e ensaiados com critérios convenientes e com relativo grau de confiabilidade, deixando-se para uma outra oportunidade a elaboração de mapas de tendência dos três coeficientes hidrodinâmicos caracterizadores do Aquífero.

4 CONCLUSÕES

Os elementos propedêuticos para compreensão das propriedades hidráulicas do Aquífero Botucatu em Araraquara foram obtidos a partir de ensaios de bombeamento em seis poços profundos cadastrados pelo DAEE: Vila Jardim (SF22XDVI.4-2); Santana (SF22XDVI.4-34); Vila Stand (SF22XDVI.4-44); Paiva (SF22XDVI.4-45); Ouro (SF22XDVI.4-48); Pinheirinho (SF22XDVI.4-58). As curvas de rebaixamento (Δs) e recuperação ($\Delta s'$), mostradas nas figuras 3.1 a 3.6 para estes poços, permitem concluir:

- 1) Em geral, as recuperações são mais apropriadas para obtenção de valores das características hidráulicas do Aquífero, sendo que as curvas construídas para um mesmo poço apresentam forte tendência de superposição ou paralelismo, principalmente para tempos superiores a 10 minutos (p. ex.: Fig. 3.2; 3.5 e 3.6), possibilitando representação de funções matemáticas equivalentes;
- 2) As curvas de rebaixamento apresentam irregularidades provenientes das deficiências no sistema de bombeamento

e/ou insuficiência no desenvolvimento do poço (p.ex., Fig. 3.5, para tempos maiores que 150 minutos);

3) As curvas podem ser interpretadas como funções lineares, quando tomadas intervalarmente. Assim, os valores encontrados para T e S são definidos como valores intervalares;

4) Os coeficientes de transmissibilidade (T) e de armazenamento (S) variam em função da evolução do nível d'água no poço. Sendo que ambas funções, quando logarítmicas, poderão ser representadas convenientemente com retas e respectivos coeficientes angulares;

5) A simetria entre as curvas de rebaixamento e recuperação em um mesmo poço, particularmente para t maior que 10 min., possibilita aferição dos valores de T e S obtidos e serve como parâmetro para aquilatar-se o grau de desenvolvimento que o poço atingiu (Fig. 3.3; 3.5 e 3.6);

6) Os valores obtidos para T e S, através das curvas de rebaixamento e recuperação, usando-se o método THEIS-

JACOB, não estão isentos de aproximações às vezes grosseiras e quiçá incorretas. Estas imprecisões são introduzidas principalmente pela aleatoriedade com que são eleitos os pontos de tangência na curva, mesmo para intervalos de tempo bem definidos. Por exemplo, no poço Paiva (Fig. 3.4) os valores de T obtidos na curva de recuperação crescem de 2,78 a 4,66m²/h e no poço Ouro (Fig. 3.5) os valores de T obtidos na curva de rebaixamento aumentam desde 4,70m²/h (p/t = 10 min.) até 11,0m²/h (p/t = 100 min.), enquanto que, em duas curvas de recuperação deste mesmo poço, os valores de T variam crescentemente de 5,55 a 9,48m²/h;

7) Embora sabendo-se, a priori, que os valores de T e S obtidos através do método gráfico de THEIS-JACOB são aproximados, é necessário que estes valores sejam discutidos, na tentativa de melhorar os resultados. Normalmente tem-se usado o intervalo entre 10 e 100 min., todavia não está claro o motivo de não serem escolhidos tempos maiores.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ, C; CRUZ, W.B. da; PEIXOTO, C. A. de M. 1976 Modelo matemático do Aquífero Beberibe. Recife, SUDENE, CONESP-OESA. (Inédito.)
- 1980 Modelo matemático do Aquífero Beberibe. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 1.º, Recife, 1980. Anais. Recife, ABAS. p. 169-79.
- BEAR, J. 1979 *Hydraulics of groundwater*. New York, McGraw-Hill. (Series in water resources and environment engineering.)
- BISWAS, A.K. 1972 *Hystory of hydrology*. 2.ed. Amsterdam, North-Hollan, 336p.
- CRUZ, W.B. da & SILVA, A.B. da 1980 Modelo de simulação digital do Aquífero Cárstico do Jaíba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 1.º, Recife, 1980. Anais. Recife, ABAS. p.359-74.
- DAEE & UNESP 1982 Mapa geológico do Estado de São Paulo: Araraquara. São Paulo. Escala 1:250.000.
- DARCY, H.P.G. 1856 *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Paris, V. Dalmont. 674p.
- DE COULOMB, C.A. 1800 *Expériences destinées à déterminer des fluides et les lois de leur résistance dans les mouvements très lents*. (Mémoires de l'Institut National des Sciences et Arts, v.3)
- DE PRONY, G.C.F.M.R. 1804 *Recherches physico-mathématiques sur la théorie des eaux courantes*. Paris.
- DUPUIT, A.J.E.J. 1854 *Traité théorique et pratique de la conduite et de la distribution des eaux*. Paris, Carilian-Goeury.
- 1863 *Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux courantes*. 2nd. ed. Paris, Dalmont.
- FÖRCHHEIMER, P. 1886 *Über die Ergiebigkeit von brunnenanlagen und sickerschlitzen*. Zeitschrift der Architekten-und Ingenieur-Verein zu Hannover, 32 (7): 539-64.
- FRANÇA, H.P.M. de & AYALA, P.G. de. 1978 Simulação analítica da exploração de águas subterrâneas; modelo Simaq. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30.º, Recife, 1978. Resumos. Recife, SBG. p. 349-50.
- HAGEN, G.H.L. 1839 *Ueber die Bewegung des Wassers in engen cylindrischen Rohren*. Poggendorff Annalen, 46: 423-42.
- HAUSMAN, A. 1980 Avaliação qualitativa de aquíferos fissurados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 1.º, Recife, 1980. Anais. Recife, ABAS. p. 537-44.
- HONYK, W.J. 1980 Programa para a calculadora programável Texas TI-59 para determinação das propriedades hidrodinâmicas, rebaixamento a uma certa distância de um poço e seu raio de influência. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 1.º, Recife, 1980. Anais. Recife, ABAS. p.99-118.
- HUBBERT, M.K. 1940 *The theory of ground-*

- water motion. *Journal of Geology*, Chicago, Ill., 48 (8): 785-944.
- JACOB, C.E. 1940 On the flow of water in an elastic artesian aquifer. Washington, D.C., Transaction American Geophysical Union.
- LEÃO, M.I. 1980 O uso do modelo Hele-Shwau vertical para o estudo de aquíferos costeiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 1.º Recife, 1980. Anais. Recife, ABAS. p. 247-67.
- MEINZER, O.E. 1942 *Physics of the Earth-IX; hydrology*. New York, McGraw-Hill. 712p.
- MUSKAT, M. 1937 *The flow of homogeneous fluids through porous media*. New York, McGraw-Hill. 763p.
- PIUCI, J. 1985 Relatório preliminar das condições de ocorrência e aproveitamento de águas subterrâneas na cidade de Araraquara. São Paulo, Secretaria de Obras e do Meio Ambiente / Departamento de Águas e Energia Elétrica. 56p. (Inédito.)
- J & CAMPOS, H.C.N.S. 1984 Potencial do Aquífero Botucatu na Região de Araraquara — SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 3.º, Fortaleza, 1984. Anais. Fortaleza, ABAS. v. 1 p.323-42.
- POISEUILLE, J.M.L. 1846 *Recherches expérimentales sur le mouvement des liquides dans les tubes de très petites diamètres*. Paris, Académie de Sciences, Mém. sav. étrang., v.9 p. 433-545.
- PRICKETT, T.A. & LONNQUIST, C.G. 1971 Selected digital computer techniques for ground water resource evaluation. Urbana, Ill., Illinois State Water Survey. (Bulletin, 55.) Traduzido no Boletim 41, Serviço Geológico. DGOH-MOP. Madrid. 127p.
- REMSON, I.; APPEL, C.A.; WEBSTER, R.A. 1965 Groundwater models solved by digital computes. *Journal of the American Society of Civil Engineers*, HY3, May. p. 133-47.
- REMSON, I.; HORNBERGER, G.M.; MOLZ, F.J. 1971 *Numerical methods in subsurface hydrology; with an introduction to the finite element method*. New York, Mc Graw-Hill. 389p.
- RODRIGUES, I.L. & BRAGA JR., B.P.F. 1984 Sistema de gerenciamento de águas para complexos industriais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 3.º, Fortaleza, 1984. Anais. Fortaleza, ABAS. v. 1 p. 388-404.
- SILVA, R.B.G. da. 1984 Contribuição dos isótopos ambientais no conhecimento dos mecanismos de circulação das águas do Aquífero Botucatu — Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 3.º, Fortaleza, 1984. Anais. Fortaleza, ABAS. v.2 p. 81-93.
- SLICHTER, C.S. 1899 Theoretical investigation of the motion of ground waters. U.S.G.S. 19th Annual Report, pt. 2: 295-384.
- SOUZA, R.B. de & OLIVEIRA, A.R.B. de. 1984 Um modelo analógico a resistências elétricas para cálculo do fluxo de um fluido incompressível num meio poroso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 3.º, Fortaleza, 1984. Anais. Fortaleza, ABAS. v.1 p. 473-82.
- THEIS, C.V. 1935 The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *Transaction American Geophysical Union*, Washington, D.C., pt. 2., 16: 519-24.
- THIEM, A. 1870 Die Ergiebigkeit artesischer Bohrlocher, Schachtbrunnen, und Filtergalerien. *Journal fur Gasbeleuchtung und Wasserversorgung*, 14: 450-67.
- THIEM, G. 1906 *Hydrologische Methoden*. Gebhardt, Leipzig. 56p.