

ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARDO(SP)

POR

Osmar Sinelli

Resumo -- Trata-se de bacia hidrográfica extensa, 4097km², com modelo hidrogeológico constituído pelos aquíferos Serra Geral, Botucatu e Pirambóia.

O aquífero Serra Geral, porosidade e permeabilidade fissural, não confinado, é o segundo em importância apresentando uma taxa de infiltração equivalentes a 14,5% da precipitação pluviométrica e uma recarga profunda da ordem de 13%. Apresenta alta vulnerabilidade à poluição, água de boa qualidade e quimicamente é caracterizado pela seqüência catiônica $rCa > rNa > rMg > rK$.

O aquífero Botucatu/Pirambóia apresenta-se em parte livre (1477km²) e confinado em 2620km². É o mais importante da região com uma taxa de infiltração, na zona de recarga, da ordem de 19% da precipitação pluviométrica, o que caracteriza área de alto risco à poluição, apresenta uma recarga profunda igual a 4,5%. A seqüência química catiônica é representada na região não confinada por $rCa > rMg > rK > rNa$ e na região confinada $rCa > rNa > rMg > rK$. A velocidade aparente de circulação de suas águas, valor médio para a bacia, é da ordem de 2,3 m/ano.

O comportamento piezométrico destas Formações frequentemente são mascarados pelos níveis estáticos da Formação Serra Geral provocando falsas interpretações.

INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica do rio Pardo abrange parte da 6^a região administrativa do Estado de São Paulo localizando-se sobre o eixo de desenvolvimento São Paulo-Brasília.

Todas as cidades situadas na bacia apresentam como fonte principal de abastecimento a água subterrânea extraída dos aquíferos Serra Geral, Botucatu e Pirambóia.

O modelo hidrogeológico na bacia é complexo em virtude dos fluxos verticais existentes entre as aluviões, Formação Serra Geral, Formação Botucatu e Formação Pirambóia. Os fluxos horizontais, dominantes, são perturbados pela enorme quantidade de estruturas intrusivas-diabásios- que cortam as Formações Botucatu e Pirambóia, principais armazenadores da bacia.

O elevado aumento no consumo de água subterrânea, nos últimos 20 anos, bem como o crescimento da demanda, que deverá ocorrer nos próximos anos, devido a acréscimo ocasionado pela neces-

sidade de aumento da produção agrícola com a utilização de irrigação, a perfuração de poços de forma desordenada e sem uma legislação pertinente foram os principais motivos que nos levaram a iniciar estudo amplo e detalhado que deverá contribuir para um melhor conhecimento hidrogeológico regional, auxiliar na racionalização da exploração e a proteção desses recursos contra a poluição.

Os resultados aqui apresentados são parciais e foram frutos graças ao apoio que recebemos da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo e ao Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE).

LOCALIZAÇÃO E ASPECTOS DO MEIO NATURAL

A figura 1 situa a localização da área em estudo, partes média e baixa da bacia hidrográfica do rio Pardo (SP).

Trata-se de região situada na parte Nordeste do Estado de S. Paulo, cobrindo uma superfície de 4097km², entre os paralelos de 21º00' e 21º45' de latitude Sul e os meridianos de 47º30' e 48º00' de longitude Oeste de Gr.

O relevo é essencialmente condicionado pelo entalhamento realizado pelo rio Pardo e por seus afluentes. A feição dominante é a existência (Leste) de grandes testemunhos tabuliformes sobressaindo em meio a uma superfície levemente ondulada. Esses testemunhos se distribuem em forma de elevações isoladas ou em forma de plataformas interfluviais, amplas e contínuas. O relevo regional é definido pelas altitudes máximas de 970m, Sudeste da bacia, e mínimas de 465m a Noroeste.

No tocante a vegetação original somente em regiões restritas encontram-se o campo cerrado. No mais toda vegetação original praticamente foi devastada sendo transformada pela atividade agropastoril.

A cana de açúcar é a responsável pelo desenvolvimento atual agrícola com menores áreas destinadas ao milho, soja, algodão e amendoim. O grande ciclo da cana de açúcar teve seu início há 35 anos.

Completando o quadro do meio natural a região se caracteriza por cobertura de solos derivados do intemperismo atuante sobre as rochas básicas; à mistura de produtos de alteração destas rochas mais os arenitos das Formações Botucatu e Pirambóia e outros de distribuição mais restrita como os aluviais, hidromórficos e os poucos desenvolvidos litossolos.

Elementos do Clima

Os valores médios mensais - período de 1941 a 1980 - da precipitação, evapotranspiração potencial e evapotranspiração real para a bacia hidrográfica são apresentados na tabela 1.

Meses	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual mm
P	270	234	162	54	54	18	18	18	54	153	162	270	1467
EP	112	110	100	77	56	49	49	63	77	91	105	112	1001
ER	112	110	100	77	56	49	50	54	91	91	105	112	965

Tabela 1. - Valores médios mensais da precipitação, evapotranspiração potencial e evapotranspiração real (1941-1980)

O gráfico do balanço hidrológico é apresentado, para o mesmo período, na figura 2.

Fluviometria

Os dados fluviométricos foram computados a partir de 1941 junto às estações fluviométricas. Para efeito de interpretação esses dados correspondem às diferenças entre os valores médios anuais observados em duas estações.

Com a finalidade de estimar o valor mínimo do escoamento subterrâneo construímos o gráfico da figura 3, em que são representados os valores mínimos anuais do deflúvio subterrâneo, tendo em vista que é esta parte do deflúvio total que é responsável pela alimentação do curso de água na época de estiagem e indicador da potencialidade dos aquíferos. O valor mínimo encontrado foi da ordem de $30\text{m}^3/\text{s}$ o que representa um escoamento mínimo subterrâneo de $9,3 \times 10^8\text{m}^3/\text{ano}$.

HIDROGEOLOGIA

A região em estudo pertence à Bacia do Paraná, parte Nordeste. A seção geológica apresentada na figura 4 mostra o comportamento das principais Formações que ocorrem na área. Melhores detalhes a respeito da geologia podem ser encontrados em Soares et al 1973, Sinelli, 1971 a e b; Sinelli, 1984.

Em vista do quadro geológico apresentado pela bacia hidrográfica podemos representar o modelo hidrogeológico de acordo com o diagrama da figura 5. O comportamento hidrogeológico da bacia será descrito obedecendo o diagrama apresentado.

Aluviões

As aluviões são encontradas em extensas planícies de inundação associados ao rio Pardo. Conforme pode ser observado no mapa da figura 6, são depósitos de larga extensão ocupando uma área equivalente a 257km^2 . Geologicamente são depósitos formados por cascalhos e areias recobertas por camada de argilas. A seção geológica apresentada na figura 7 é um bom exemplo desses depósitos, localizados ao longo do rio Pardo e junto à Usina da Pedra no município de Serrana (SP).

A maior parte do material que constituem esses depósitos foram originados dos arenitos das Formações Botucatu e Pirambóia, apresentando ainda contribuição de basaltos e diabásios da Formação Serra Geral. A sua gênese está relacionada às várias fases de dificuldades do rebaixamento do nível de base, na área dos diabásios, e alongamento do curso do rio por erosão remontante. A espessura total do depósito aluvionar atinge cerca de 6 metros. As argilas superficiais não ultrapassam os 3 metros sendo de 3 metros as areias e cascalhos da base. A associação areia + cascalho apresenta elevada porosidade e permeabilidade em vista de que a água aí existente é pouco mineralizada, indicação de alta taxa de circulação. Trata-se de aquífero de alto potencial e baixo custo.

Formação Serra Geral

A Formação Serra Geral é representada no mapa da figura 8 por rochas de composição basáltica (toleítica) originada pela atividade magmática fissural, concomitante a processos magmáticos subterrâneos que deram origem aos sills, diques e lacólitos (estruturas dômicas). Intercalados nessas rochas, ou mesmo recobrindo-as, podem ocorrer camadas sedimentares arenosas pertencentes à Formação Botucatu.

Esta parte da Bacia do Paraná é caracterizada por apresentar domínio de rochas básicas intrusivas que se formaram durante o Jurássico superior e o Cretáceo inferior.

Os traços estruturais da região não são complexos, observando-se lineamentos que representam fraturas ou falhas. Os falhamentos são de caráter normal representando ajustes de blocos. A história da sinéclise da Bacia do Paraná foi complexa devido às oscilações frequentes na sua subsidência; comportamento que imprimiu reflexos tectônicos mais evidentes nesta porção da bacia, caracterizado por intenso fraturamento observado nas fotografias aéreas e imagens de satélite. Do ponto de vista estrutural a bacia hidrográfica do rio Pardo revela algumas características que podem assim ser sumariadas:

Regiões onde os falhamentos aparecem com maior intensidade - Norte de São Simão, SSW de Serrana, área compreendida entre as cidades de Santa Rosa do Viterbo, Cajuru e Santa Cruz da Esperança. As direções das falhas são N40W, N50W, e NE.

O armazenamento de água subterrânea nestas rochas é condicionada ao seu potencial de fissuras e apresentam-se como o segundo mais importante aquífero. As vazões médias de poços perfurados nesta Formação dão valores da ordem de $20\text{m}^3/\text{h}$, sendo que em alguns lugares, como é o caso de Sales de Oliveira existem poços com vazões da ordem de $90\text{m}^3/\text{h}$. A espessura desta Formação cresce para oeste e pode ser avaliada observando-se as linhas de isopacas (figura 8). Esse comportamento não é homogêneo devido as rochas intrusivas existentes.

A potencialidade desse aquífero, bem como, as característi-

cas hidrodinâmicas são de difícil avaliação tendo em vista o seu interrelacionamento com os aquíferos das Formações Botucatu e Pirambóia.

Uma avaliação, preliminar, da potencialidade da Formação Serra Geral, em água subterrânea, pode ser efetuada em função dos dados fluviométricos e pluviométricos da bacia hidrográfica. Os cálculos foram efetuados por diferença entre as estações fluviométricas, (figura 1), levando-se em conta a porção Noroeste da bacia hidrográfica região onde se apresentam as maiores espessuras das rochas básicas e onde a cobertura é total.

$$\text{Área de exposição} = 423 \text{ km}^2$$

$$\text{Escoamento total} = 129 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$$

$$\text{Escoamento subterrâneo} = 89 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$$

$$\text{Escoamento superficial} = 40 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$$

$$\text{Precipitação pluviométrica na área} = 620 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$$

$$\text{Taxa de infiltração} = 89/620 \times 100 = 14.5\%$$

Verifica-se que o escoamento básico subterrâneo representa 14.5% da precipitação pluviométrica e 68% do escoamento total indicando portanto, tratar-se de Formação com elevada porosidade fissural e permeabilidade.

A recarga profunda pode ser relativamente avaliada levando-se em consideração a evapotranspiração real anual da área e o escoamento total:

$$423 \times 0.965 = 408 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anos} = \text{Evap. Real}$$

Cálculo da Recarga profunda:

$$620 - (408 + 129) = 83 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$$

Verifica-se portanto que a recarga profunda nas rochas básicas (sistemas de fraturas) da Formação Serra Geral equivale a praticamente 13% da precipitação pluviométrica.

Sistema aquífero Serra Geral + Botucatu + Pirambóia

O modelo hidrogeológico apresentado na figura 5 sintetiza a situação hidrogeológica, que ocorre na maior parte da bacia hidrográfica (2275km²), onde a seqüência estratigráfica é formada pelas Formações Serra Geral, Botucatu e Pirambóia, constituindo os aquíferos Serra Geral, Botucatu e Pirambóia tendo por base a Formação Estrada Nova (Grupo Passa Dois) que constitui na realidade o aquíclode do sistema.

A partir de 1976 os poços perfurados nesta parte da bacia procuram perfurar as três Formações e, a título de exemplo a fi-

gura 11 mostra uma perfilagem elétrica executada em poço com 250m de profundidade. Nessa perfilagem é fácil a identificação dos basaltos alterados, diabásio maciço, arenito Botucatu e o arenito da Formação Pirambóia caracterizado por um aumento no teor de argila associada a uma granocrescência da fração arenosa.

Uma análise isolada, por aquífero, é complexa, devido principalmente ao fluxo vertical existente entre essas Formações, torna-se importante entretanto, tecer algumas considerações a respeito de dados levantados na bacia hidrográfica:

Formação Botucatu: unidade genética de ambiente desértico constituído por arenitos de granulação fina a média, subsidiariamente com frações finas e grosseiras. O teor de argila e silte é ao redor de 5%. Sua distribuição aflorante (zona de recarga) é de 825 km², mapa da figura 9, e apresenta uma espessura média ao redor de 60 metros. Esta Formação aflora a Leste de Ribeirão Preto e, a Oeste mergulha subjacente aos basaltos, iniciando aqui as condições de aquífero confinante.

O mapa de contorno estrutural desta Formação é visto na figura 10.

Formação Pirambóia: unidade genética de ambiente fluvial constituída por arenitos de granulação fina a média, ocorrendo na sua parte basal arenitos conglomeráticos. O teor de silte e argila é da ordem de 20%. A espessura máxima desta Formação na bacia é da ordem de 160 metros.

O aquífero da Formação Pirambóia apresenta-se livre (zona de recarga) em área equivalente a 652km², fig. 12. Em toda a área de afloramento desta Formação, bem como da Formação Botucatu, ocorrem intrusões de diabásio.

Os poços perfurados exclusivamente na Formação Pirambóia, situados a Sudeste da bacia, apresentam vazões da ordem de 35m³/h, com vazão específica da ordem de 6.0m³/h/m. O coeficiente de permeabilidade é da ordem de 8,4cm/h, o coeficiente de armazenamento é de $1,5 \times 10^{-2}$ e transmissividade de 6.0m²/h.

Na situação em que o aquífero Pirambóia está confinado e o aquífero Botucatu livre - região de Serrana, Serra Azul as principais características encontradas são:

vazão média = 60m³/h com amplitude máxima de 120m³/h

transmissividade de 8.4m²/h

coeficiente de armazenamento de 2×10^{-2}

Como realizamos para a Formação Serra Geral podemos avaliar, de forma preliminar, a potencialidade, em água subterrânea, do sistema aquífero Serra Geral + Botucatu + Pirambóia; em função dos dados fluviométricos e pluviométricos da bacia hidrográfica, levando-se em consideração os valores dos deflúvios entre as estações.

área total (entre as estações) = 1886 km²

Formação Serra Geral = 428 km²

Formação Botucatu = 806 km²

Formação Pirambóia = 652 km²

O escoamento total (por diferença) = 736 x 10⁶ m³/ano

Escoamento subterrâneo = 499 x 10⁶ m³/ano

Escoamento superficial = 237 x 10⁶ m³/ano

Precipitação pluviométrica na área total = 2766 x 10⁶ m³/ano

Precipitação pluviométrica nas Formações Botucatu e Pirambóia é igual a 2138 x 10⁶ m³/ano.

Como a contribuição da Formação Serra Geral ao escoamento básico subterrâneo é da ordem de 14,5% da precipitação pluviométrica, em sua área de ocorrência, a contribuição ao escoamento subterrâneo será de: 91 x 10⁶ m³/ano e, por diferença, a contribuição ao escoamento básico subterrâneo efetuado pelas Formações Botucatu e Pirambóia será de: (499 x 10⁶ m³/ano) - (91 x 10⁶ m³/ano) = 408 x 10⁶ m³/ano, que correspondem a uma taxa mínima de infiltração e equivalentes a 19% da precipitação pluviométrica.

Levanto-se em consideração os valores da evapotranspiração e o escoamento total encontrados para a bacia, tabela 1, podemos calcular a infiltração real que irá produzir a recarga profunda, ou seja:

$$1886 \times 0.965 = 1821 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{ano} = \text{Evap. Real}$$

2766 - (1821 + 736) = 209 x 10⁶ m³/ano = Recarga profunda nas três formações. Como a participação da Formação Serra Geral é de 13% da precipitação pluviométrica (81 x 10⁶ m³/ano) a recarga profunda nas formações Botucatu e Pirambóia será:

(209 x 10⁶ m³/ano - (81 x 10⁶ m³/ano) = 128 x 10⁶ m³/ano = 4,5% da precipitação pluviométrica.

Análise do Comportamento Piezométrico

A análise do comportamento piezométrico em um sistema aquífero, como o apresentado pela bacia hidrográfica do rio Pardo, é complexa e de difícil interpretação. O primeiro passo foi o de selecionar os níveis piezométricos de poços perfurados nas Formações Botucatu e Pirambóia por serem estas as Formações que constituem o principal aquífero da bacia. De posse dos dados construímos mapa piezométrico, que indicou anomalia na região de Ribeirão Preto. Com a finalidade de elucidar melhor o comportamento construímos um perfil topográfico, paralelo ao rio Pardo, onde plotamos os dados relativos às medidas e, observamos qual deveria ser a tendência real do nível piezométrico para as Forma-

ções Botucatu e Pirambóia. O perfil da figura 13 ilustra bem essa situação. Observa-se neste perfil, que parte da reta coincide na realidade com os valores obtidos para os níveis dinâmicos e não estáticos. Nessas condições, estabelecemos uma hipótese de trabalho no qual a anomalia apresentada é resultado de uma drenança, ou melhor da extração de água relativa à Formação Serra Geral, que apresenta comportamento de aquífero livre e que os rebaixamentos verificados na região de Ribeirão Preto correspondem a água extraída da Formação Serra Geral, não comprometendo o sistema Botucatu e Pirambóia, como pode ser visualizado pelo mapa piezométrico corrigido apresentado na figura 14.

HIDROQUÍMICA

Para efeito de estudo hidroquímico foram analisadas águas provenientes de três anos de precipitação pluviométrica, cinco fontes, oito pontos de águas superficiais e vinte poços profundos situados em toda a bacia hidrográfica.

Neste trabalho, somente apresentaremos os resultados de interpretação relativa às águas subterrâneas dos poços profundos.

A coleta, análises físico-química e química seguiram a orientação apresentada por Rodier, 1971 e Brown et al, 1970.

A tabela 2 apresenta a localização dos poços (cidades), litologia, parâmetros físico-químicos e composição química.

Interpretação

Temperatura -- é praticamente homogênea em todas as amostras

pH-- varia de 5,5 a 7,7. Há um aumento do pH no sentido Oeste, no sentido da direção do fluxo subterrâneo.

Condutibilidade e Mineralização-- os menores valores são observados na zona de recarga dos aquíferos Botucatu e Pirambóia, parte montante da bacia e os maiores valores são encontrados a jusante coincidindo com as direções de fluxo subterrâneo.

Cátions-- o comportamento dos cátions e ânions pode ser melhor visualizado observando-se o mapa com diagramas de Stiff, figura 15 que mostra claramente um enriquecimento no sentido Leste-Oeste, ou seja da região do aquífero livre para o aquífero confinado. Com relação aos cátions as amostras podem ser subdivididas em três grupos: (r = meq/l)

- a) - $rCa > rMg > rK > rNa$, característica das águas do aquífero livre Botucatu e Pirambóia - região Leste da bacia.
- b) - $rCa > rMg > rNa > rK$, correspondendo a parte média da bacia e caracteriza águas em aquífero livre e sistema Serra Geral + Botucatu + Pirambóia.
- c) - $rCa > rNa > rMg > rK$, característica da região Oeste e a-

Localização	TQC	pH	Conductividade $\times 10^{-3}$ umhocm ⁻¹	CO ₂ (1)	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SiO ₂	Litologia
Inhumirim	26	5.5	3.7	25.9	1.9	0.7	1.3	2.3	0.1	5.0	6.0	15.0	F. Piramboia
S. Simão	26	5.5	2.8	31.0	1.9	1.5	0.5	1.3	0.5	2.0	18.3	14.0	F. Botucatu
B. Quirino	26	5.5	4.7	22.3	4.0	2.3	1.3	2.3	0	0	30.3	26.5	F. Botu+Piram.
Sta. Mariana	26	5.5	3.6	23.8	2.3	1.7	1.3	1.5	0	0	21.0	24.0	F. Botucatu
Serra Azul	26	5.5	3.5	33.3	2.9	1.8	1.3	1.3	0	0	23.0	20.5	F. Botu+diab.
Serrana	26	5.5	5.2	25.4	4.0	2.2	2.5	2.0	0	0	32.0	19.0	F. Botu+Piram.
Jardinópolis	26	6.0	10.8	19.6	8.0	2.5	5.0	9.3	0	0	55.0	22.5	F. S. Geral+Bot.
Rib. Preto	26	5.5	27.1	21.3	3.4	1.2	0.3	1.4	0	0	15.0	21.5	F. S. Geral+Bot.
Rib. Preto	26	6.0	8.0	19.0	6.5	2.6	2.5	3.3	2.0	0	37.0	27.0	F. S. Geral+Bot.
Cruz Posse	26	6.3	16.7	2.6	24.5	3.5	5.0	2.8	0	5.0	97.5	30.0	F. S. Geral+Bot.
Sertãozinho	26	7.7	16.1	3.0	24.0	1.6	5.0	3.4	0	4.0	99.3	25.0	F. S. Geral+Bot.
Cândia	26	6.4	15.5	0	5.1	0.2	28.8	1.0	0	0	91.5	32.0	F. S. Geral+Bot.
Pontal	26	6.6	21.8	6.9	30.0	1.5	13.8	2.5	0	15.0	110.0	20.0	F. S. Geral+Bot.
F. S. Carlos	26	6.0	10.8	0	10.4	3.2	6.3	1.0	0.7	10.0	48.0	48.0	F. S. Geral
Lagoa Canoas	26	6.0	27.2	8.0	31.8	7.7	16.8	2.3	0.2	0	164.0	63.0	F. S. Geral
S. Oliveira	26	6.1	11.1	13.2	12.4	3.8	3.8	1.4	0.1	0	61.0	46.0	F. S. Geral
B. Paulista	26	6.5	16.3	34.4	17.0	6.8	5.0	4.8	0.4	15.0	81.0	28.0	F. S. Geral+Bot.
Cravinhos	26	6.0	4.1	19.6	1.8	2.4	1.3	4.1	0	3.0	21.0	24.0	F. S. Geral+Bot.
Brodosqui	26	6.0	8.3	19.0	7.4	3.6	1.3	3.5	0	1.0	48.0	30.0	F. S. Geral+Bot.

Tabela 2. Parâmetros Físico-Químicos e Composição Química (Mg/l)

aquífero Botucatu Pirambóia confinado.

Verifica-se um aumento na concentração do íon cálcio no sentido da direção do fluxo subterrâneo, e uma diminuição do teor de magnésio, havendo uma evolução do íon sódio. Este comportamento, é verificado também para a sílica e, de acordo com Garrels, 1967 é devido à formação e precipitação de argilo-minerais por evolução do equilíbrio químico a partir dos elementos químicos existentes em solução.

Anions-- praticamente o único ânion presente é o HCO_3^- - cuja concentração aumenta de 5 a 20 vezes no sentido Oeste.³

Sílica-- apresenta teores mais elevados até a região de Ribeirão Preto diminuindo de Cruz das Posses para Oeste, região do aquífero Botucatu Pirambóia confinado.

AVALIAÇÃO DA VELOCIDADE APARENTE DE CIRCULAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

Podemos calcular a velocidade aparente de circulação das águas subterrâneas para o aquífero Botucatu Pirambóia aplicando-se a lei de Darcy que pode ser expressa por:

$$Q = k \times i \times S \quad (1) \quad \text{onde}$$

Q representa o volume de água de escoamento (m^3/h) através de uma secção transversal S (m^2) por um gradiente hidráulico i e uma permeabilidade k (m/h).

A lei de Darcy pode igualmente ser escrita sob a forma:

$$Q = v \times n \times S \quad (2) \quad \text{onde}$$

n representa a porosidade eficaz do aquífero e v a velocidade aparente de circulação através da secção S.

Combinando-se as equações (1) e (2) temos:

$$k \times i \times S = v \times n \times S \quad \text{ou}$$

$$v = k \times i / n \quad (3)$$

Os valores médios obtidos em laboratório para arenitos da Formação Botucatu e Pirambóia, paralelos à estratificação, forneceram o resultado de:

$$k = 1,8 \times 10^{-4} \text{ cm/s} \quad \text{e} \quad n = 0,15$$

O valor de i, medido no mapa piezométrico, foi de 0.006.

Aplicando-se a equação (3) temos:

$$v = (6.48 \times 10^{-3}) (0.006) / 0.15 = 2,27 \text{ m/ano}$$

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo hidrogeológico, apresentado para a bacia hidrográfica do rio Pardo, é complexo devido ao interrelacionamento vertical existente entre os aquíferos e a interferência estrutural ocasionada pelas rochas intrusivas básicas, que funcionam como barreiras ao fluxo subterrâneo.

A potencialidade dos aquíferos são elevadas caracterizando, na região, várias opções para uma exploração racional e planejada.

O aquífero, não confinado, da Formação Serra Geral (2275 km²) apresenta uma taxa de infiltração da ordem de 14,5% da precipitação pluviométrica com uma recarga profunda estimada em 13%, $83 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$.

A qualidade de suas águas é boa como característica química apresenta a seguinte seqüência catiônica $r\text{Ca} > r\text{Mg} > r\text{Na} > r\text{K}$.

Em virtude do comportamento livre deste aquífero e da alta taxa de infiltração apresenta-se como de alto risco à poluição.

O aquífero Pirambóia, apresenta-se livre em área de 652 km² com vazão específica da ordem de $6 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, permeabilidade de 8,4 cm/h. Do ponto de vista químico suas águas apresentam baixas concentrações, excelente qualidade e como característica química apresenta a seguinte seqüência catiônica: $r\text{Mg} > r\text{Ca} > r\text{Na} > r\text{K}$. Nesta parte da bacia em que apresenta comportamento livre e alta taxa de infiltração demonstra condições de vulnerabilidade quanto à poluição.

O sistema aquífero Botucatu/Pirambóia, regiões de Serrana e Serra Azul, apresenta uma vazão específica da ordem de $10 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ e uma taxa de infiltração de 19% da precipitação pluviométrica indicando tratar-se de aquífero com alta vulnerabilidade à poluição, agravado pelo fato desta região estar ocupada na sua totalidade pelo plantio de cana de açúcar e possuir alta densidade de usinas açucareiras. A recarga profunda nessas duas Formações correspondem a 4,5% da precipitação pluviométrica equivalentes a $128 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$. Quimicamente são águas de excelente qualidade e a seqüência catiônica é representada por $r\text{Ca} > r\text{Mg} > r\text{K} > r\text{Na}$.

O sistema Serra Geral, Botucatu e Pirambóia apresenta a maior distribuição em área, 2275 km² apresentando comportamento diferenciado. Dados químicos revelaram que o confinamento somente se processa a partir de Cruz das Posses, Oeste de Ribeirão Preto apresentando como característica química a seqüência catiônica $r\text{Ca} > r\text{Mg} > r\text{K}$.

Nesta região, em que os aquíferos Botucatu e Pirambóia se apresentam confinados, a vulnerabilidade à poluição é baixa permanecendo entretanto, elevada para o aquífero Serra Geral.

A região de Ribeirão Preto apresenta o sistema como um só conjunto e como aquífero livre, salvo alguns pontos mais localizados e situados a Oeste da cidade, apresentado como característica química a seqüência catiônica $rCa > rMg > rNa > rK$.

Os valores médios da velocidade aparente de circulação da água subterrânea na bacia hidrográfica do rio Pardo é de 2,3m/ano.

BIBLIOGRAFIA

- BROWN, E., SKOUGSTAD, M.W., FISHMAN, M.J. - 1970 - Methods for collection and analysis of water samples for dissolved minerals and gases. Book 5, Laboratory analysis, United States Geological Survey Water Resources, 160 p.
- GARRELS, R.M. - 1967 - Genesis of some groundwaters from igneous rocks. Research in geochemistry, v.q. John Wiley and Sons Inc. N.Y.
- RODIER, J. - 1971 - L'analyse chimique et physico-chimique de l'eau. Dunod Paris 700 p.
- SINELLI, O. - 1971a - Geologia e Água Subterrânea no Município de Ribeirão Preto. Anais do XXV Congresso Brasileiro de Geologia, São Paulo, v.2, p. 17-34.
- SINELLI, O. - 1971b - Considerações gerais sobre a tectônica no Município de Ribeirão Preto. Anais do XXV Congresso Brasileiro de Geologia, São Paulo, v.2, p. 145-151.
- SINELLI, O., SOUZA, A., DAVINO, A., SANCHES, J.L. - 1984 - As intrusivas básicas e suas implicações na prospecção de água subterrânea. Anais do 3º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Fortaleza.
- CORREA, P.C., SINELLI, O., PENALVA, F., WERNICK, E., SOUZA, A., CASTRO, P.R.M. - 1973 - Geologia do Nordeste do Estado de São Paulo. Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Geologia, Aracaju, v. 1, p. 209-229.

ABSTRACT-- The rio Pardo Basin, in São Paulo, Brazil, with an area of 4097km², is constituted of three important aquifer systems located in the Northern Parana Basin.

The Serra Geral aquifer, fissured and unconfined, present an infiltration rate of 14.5% ($488 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{year}$) of rain precipitation and a deep recharge rate of 13% ($430 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$). This behaviour characterizes a high risk for pollution. Ground Water in this system involves predominantly calcium-magnesium bicarbonate types which are good for human consumption. Chemically it is characterized by the cationic sequence $r\text{Ca} > r\text{Mg} > r\text{Na} > r\text{K}$. The Botucatu-Piramboia aquifer is the best system in the region and presents an unconfined behaviour in 1458km² and a confined aquifer in 2387km². The aquifer has an infiltration rate of 19% of rain precipitation, in the recharge area, and a deep recharge rate of 4.5%. At the unconfined area it presents a high risk for pollution. The chemical sequence of cationic elements is represented by $r\text{Ca} > r\text{Na} > r\text{Mg} > r\text{K}$ (unconfined aquifer) and $r\text{Ca} > r\text{Na} > r\text{Mg} > r\text{K}$ (confined aquifer). Ground Water flow directions are parallel to trends of increasing concentrations of dissolved solids. However, these trends are sometimes obscured in areas of leakage or mixing. Ground water flow rates are 2.3m/year. The potentiometric contours for the Botucatu and Pirambóia formations are sometimes obscured by the static level of the Serra Geral aquifer.

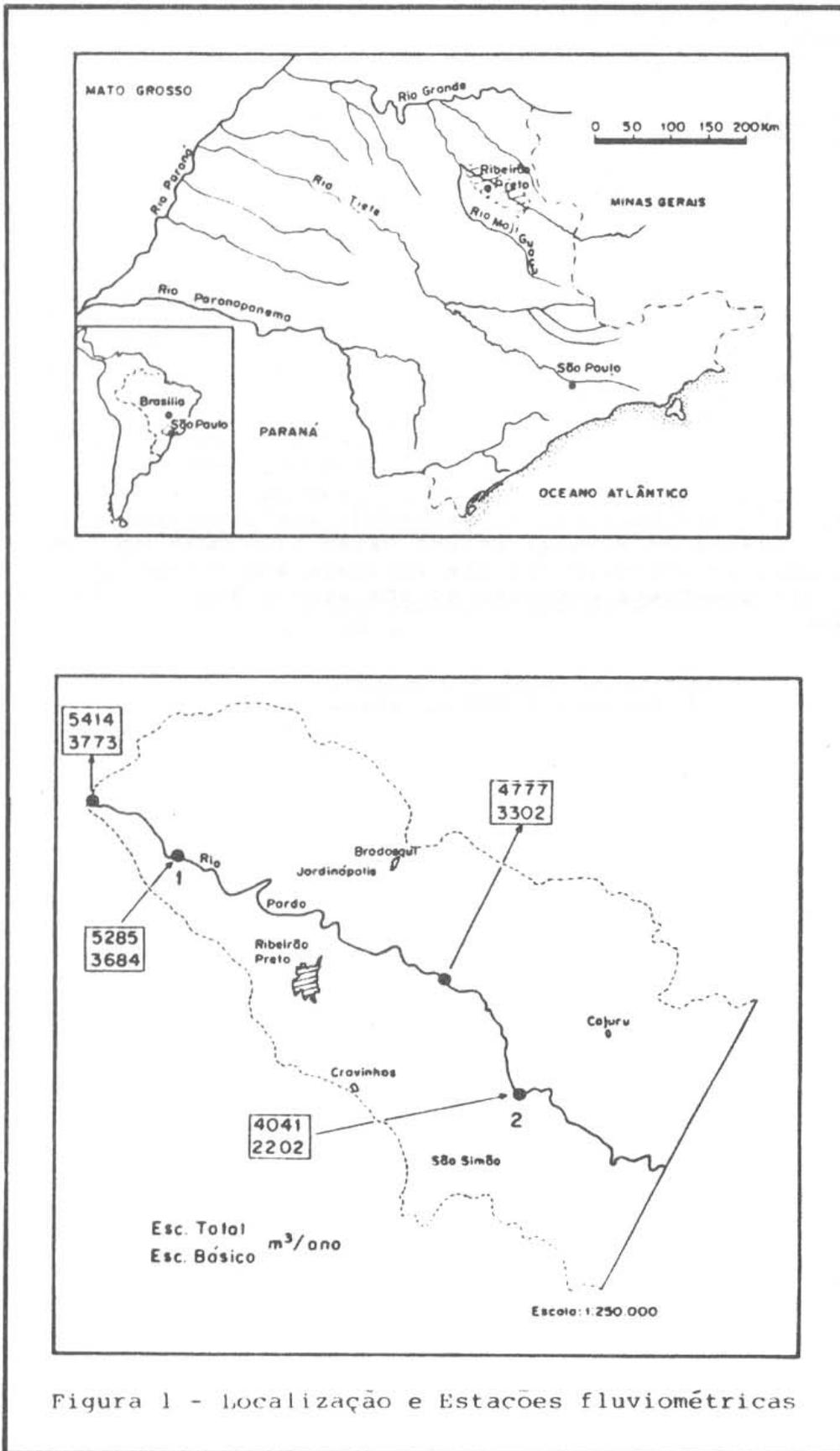


Figura 1 - Localização e Estações fluviométricas

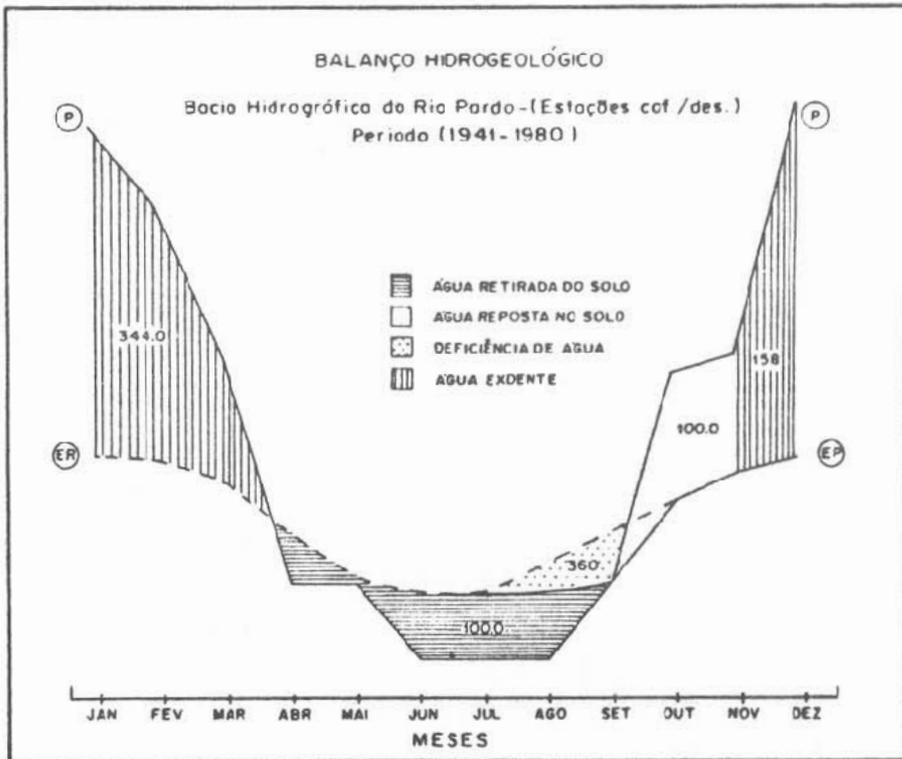


Figura 2

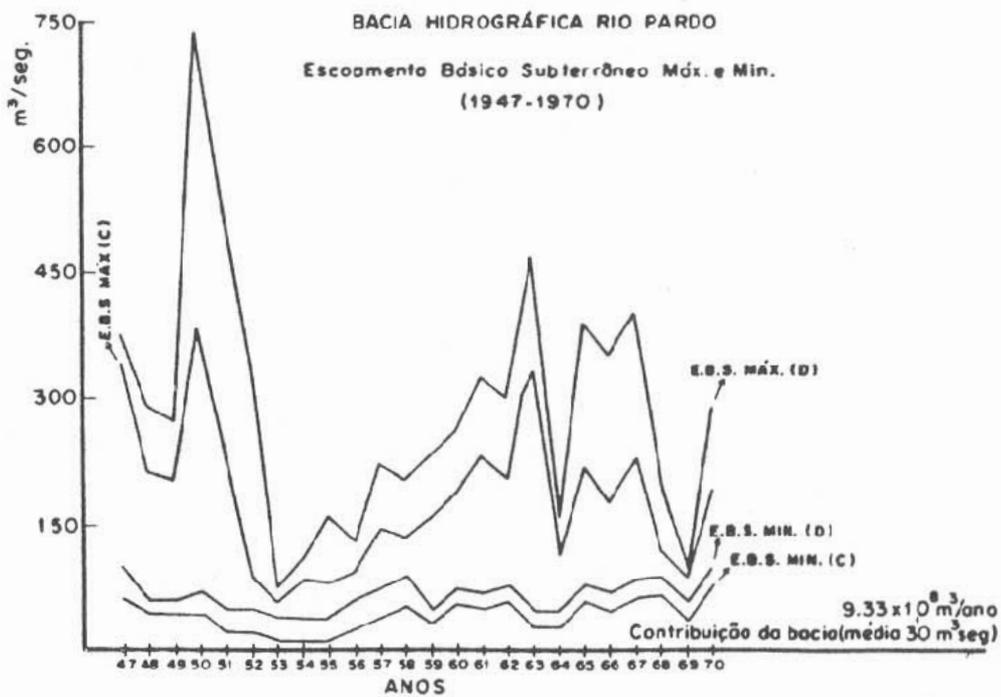


Figura 3



Figura 4

MODELO HIDROGEOLÓGICO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARDO (SP)

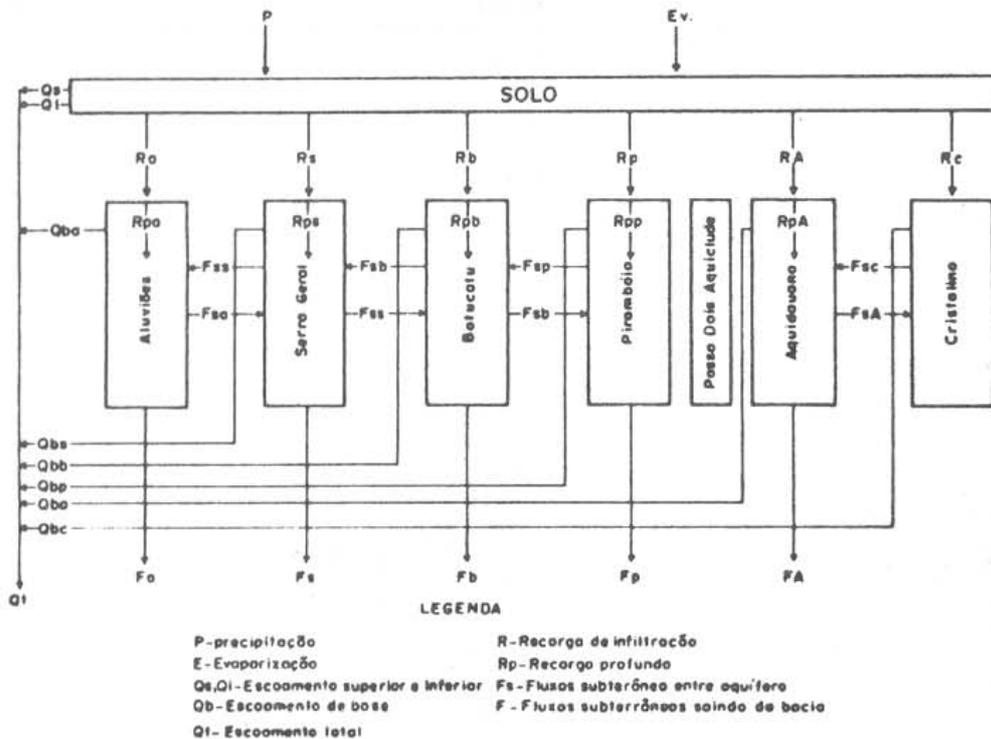
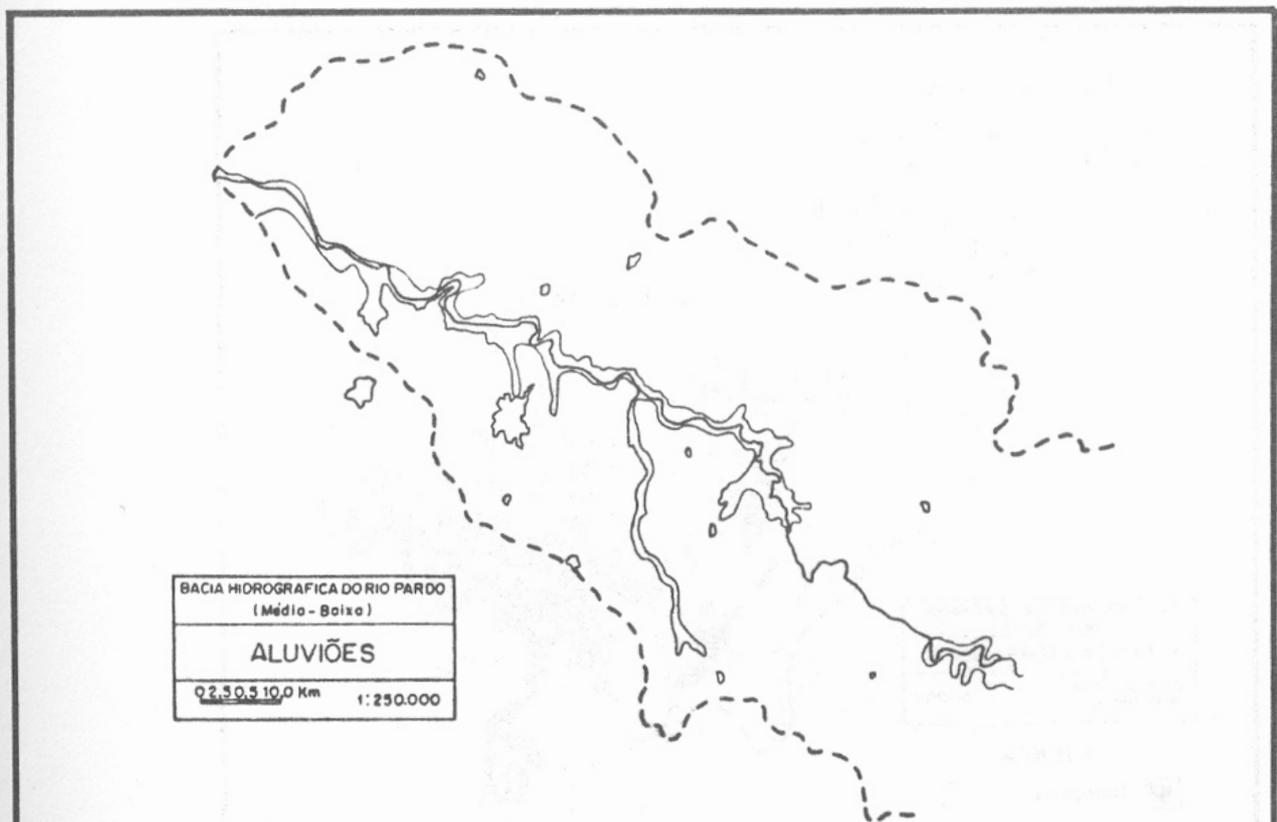


Figura 5



-Figura 6 -

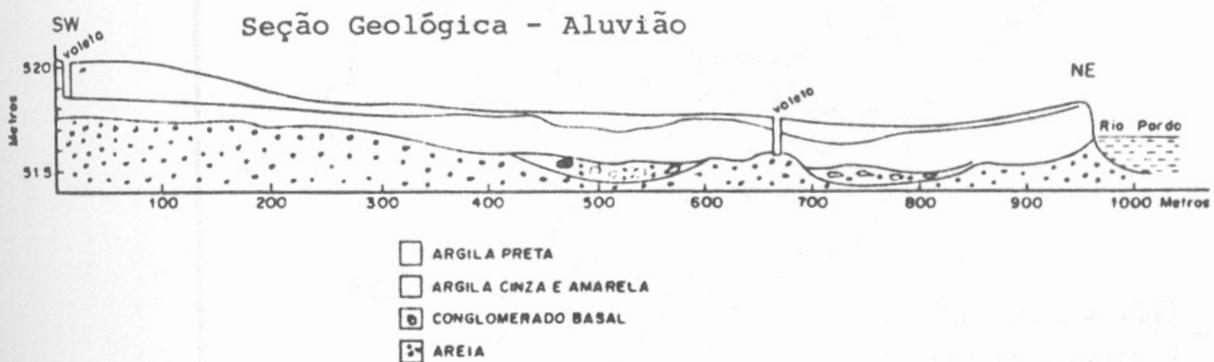
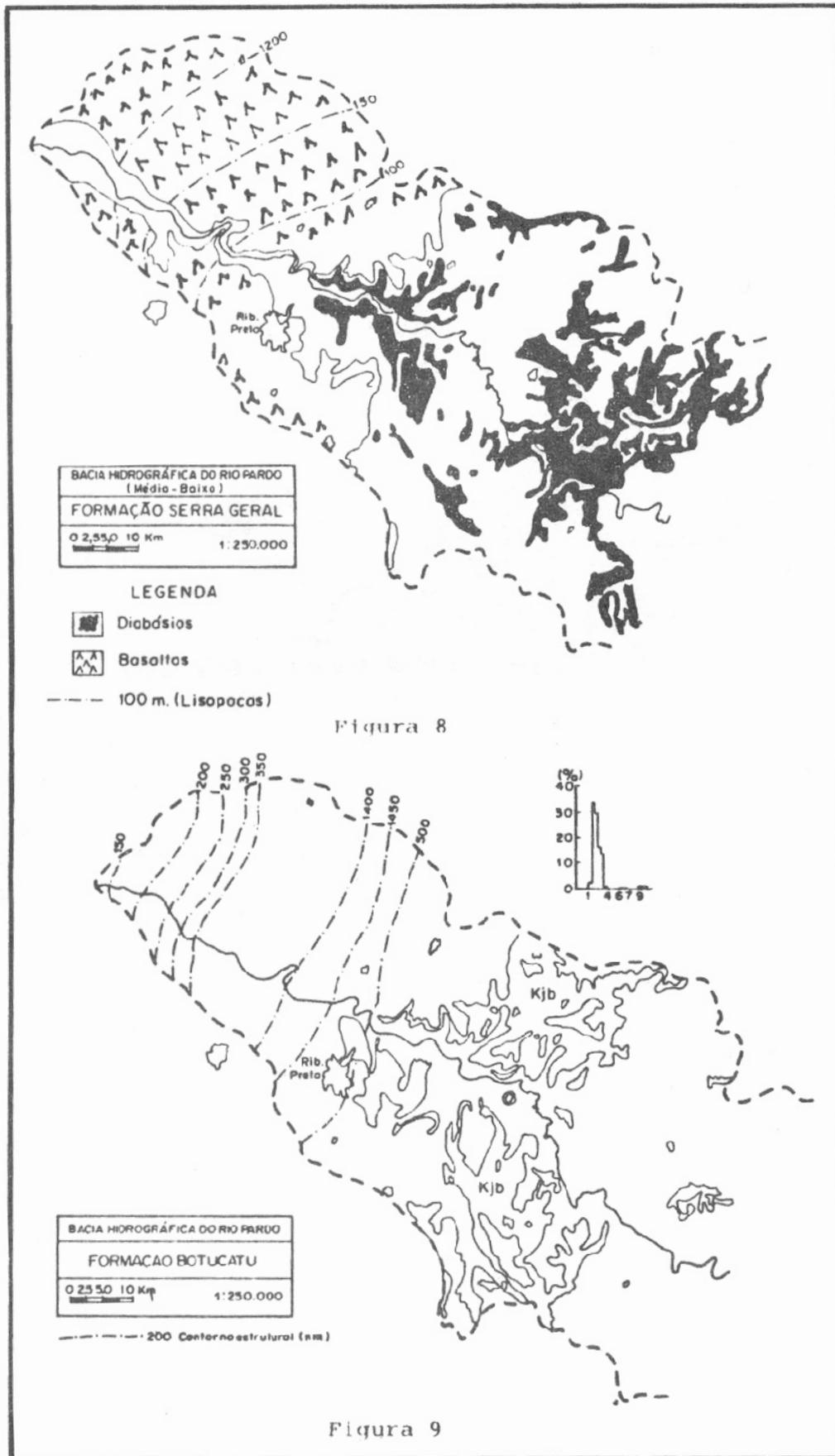


Figura 7



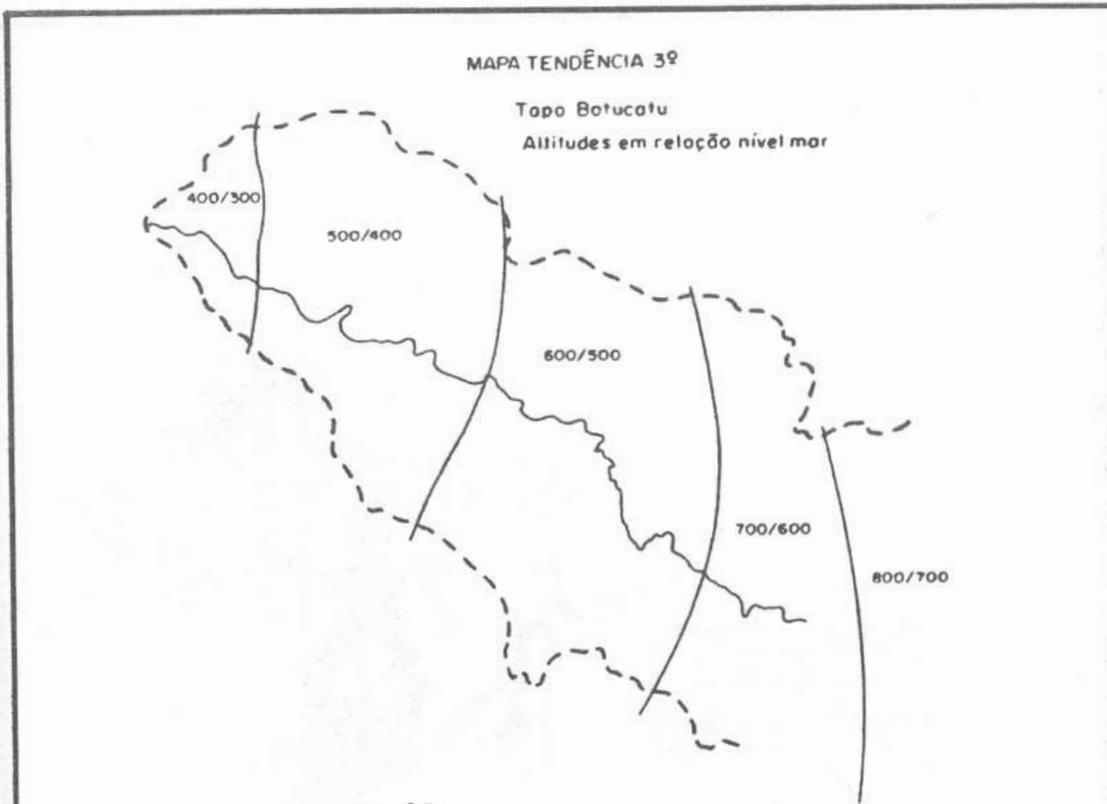


Figura 10

PERFILAGEM ELÉTRICA E ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

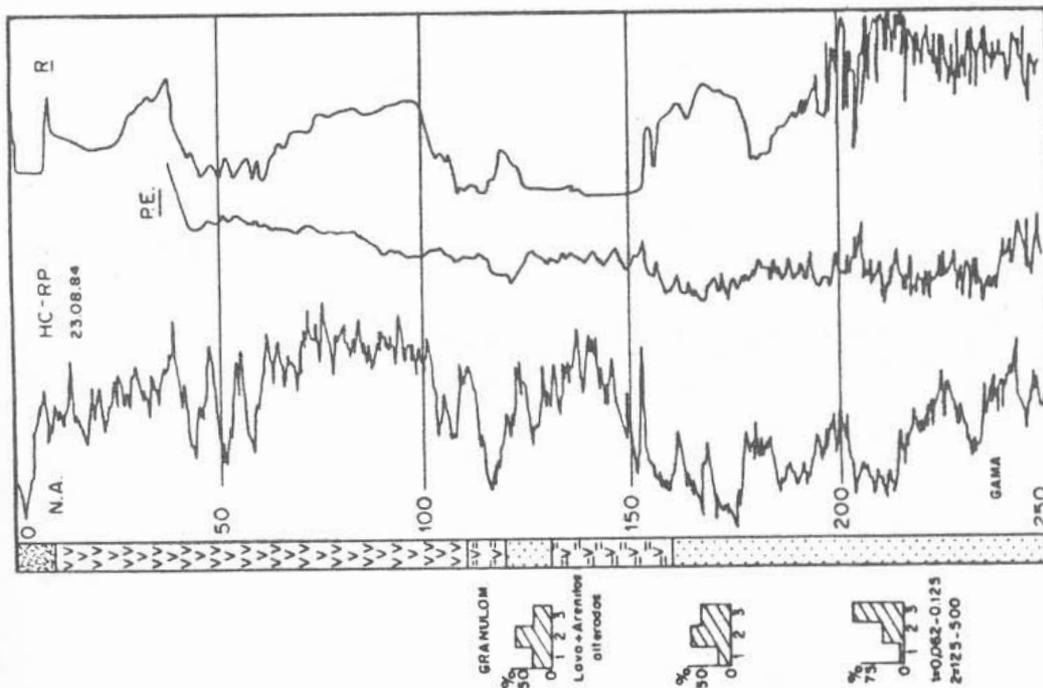


Figura 11

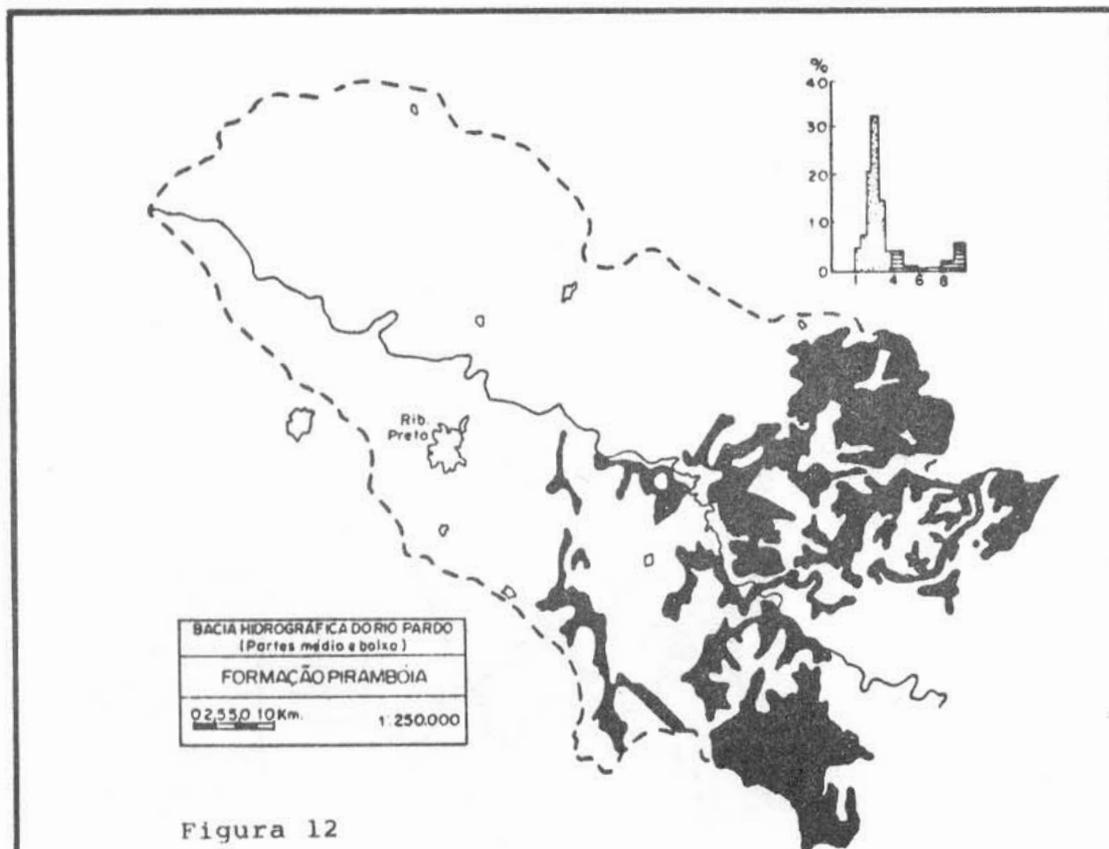


Figura 12

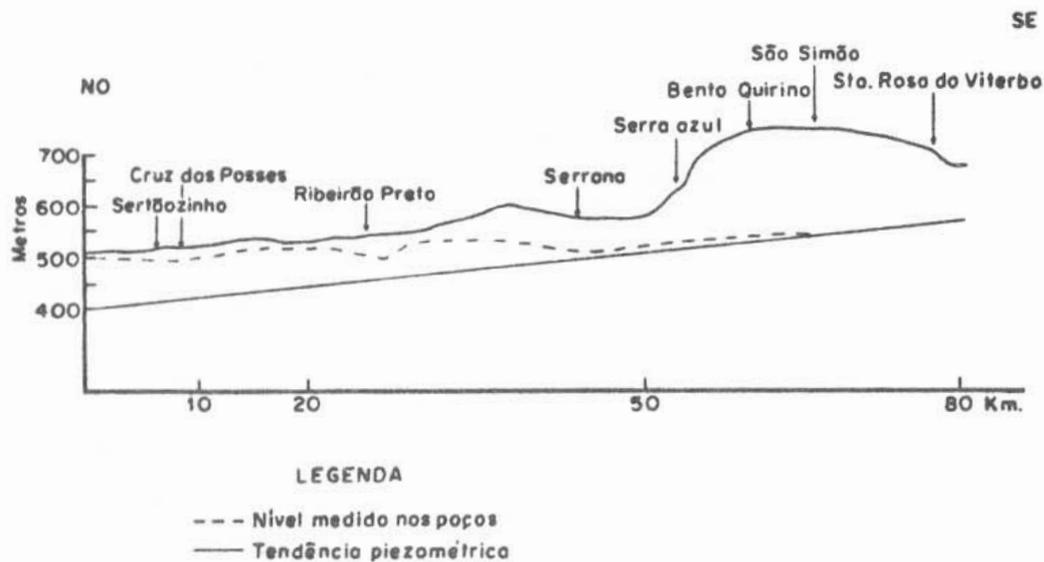


Figura 13 - Perfil comportamento nível piezométrico

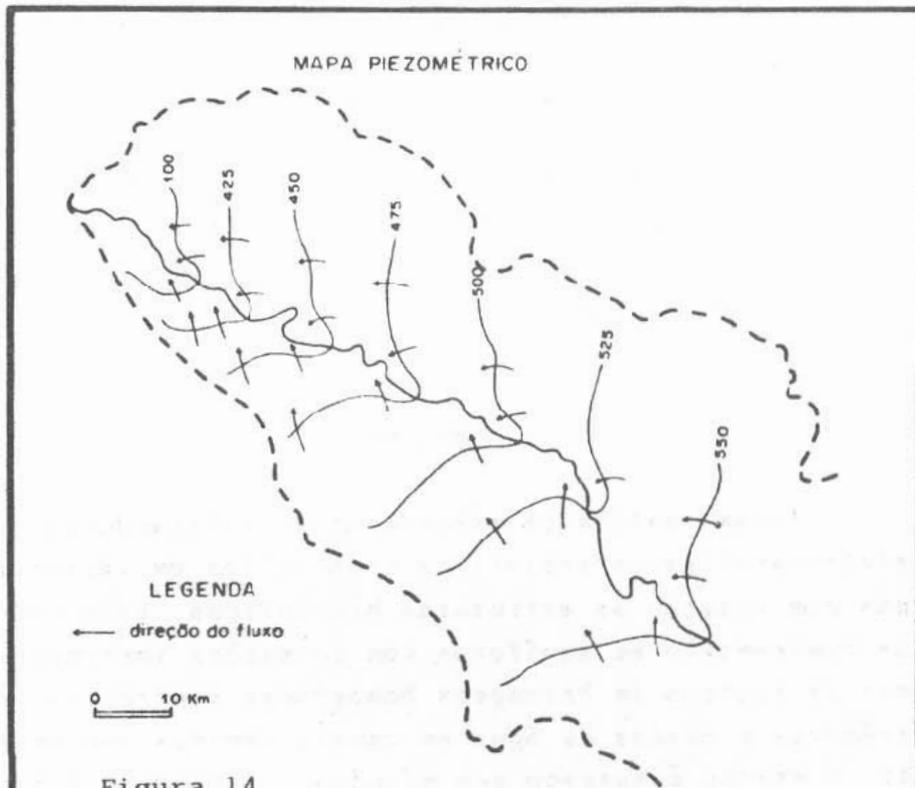


Figura 14

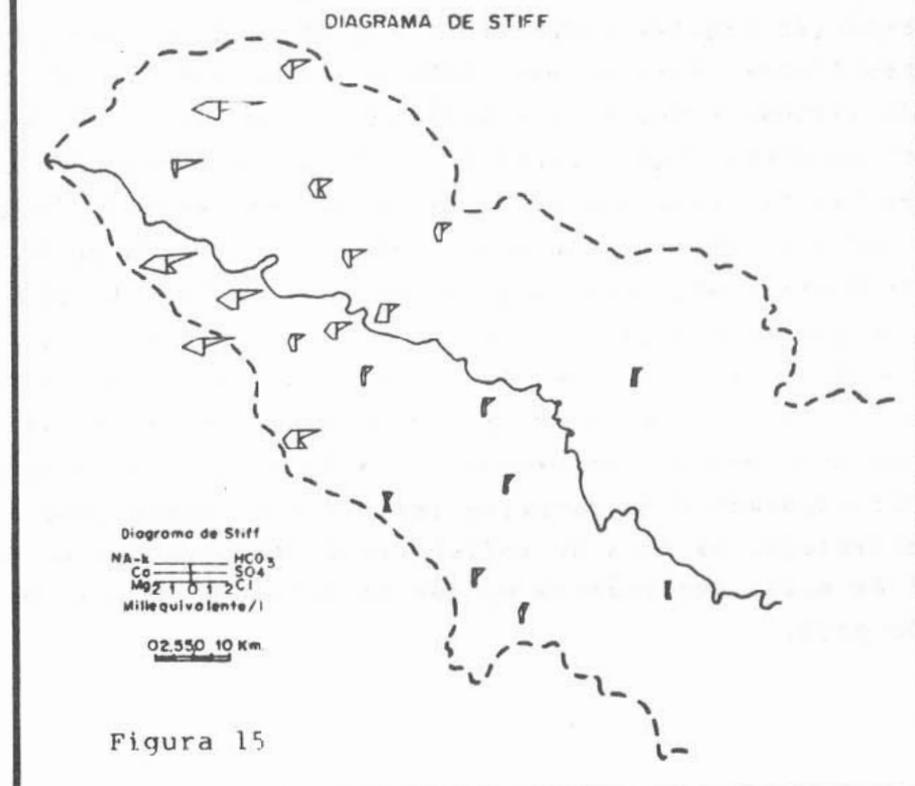


Figura 15

RESPOSTA HIDRÁULICA DO AQUÍFERO AO BOMBEAMENTO

S. V. K. SARMA e TARCISO C. da SILVA

Departamento de Eng. Civil; Área de Engenharia de Recursos Hídricos; Universidade Federal da Paraíba; Campina Grande - Pb - Brasil.

RESUMO

Foram realizados experimentos utilizando-se modelos eletro-analógicos resistivos capacitivos em vários problemas com relação as estruturas hidráulicas, tais como testes de bombeamento em aquíferos com formações impermeáveis, efeitos de filtros em barragens homogêneas isotrópicas e anisotrópicas e perdas da água em canais abertos sem revestimento. O estudo é baseado nos métodos dos elementos finitos e diferenças finitas. Métodos computacionais de simulação são feitos para posterior extensão do mesmo. O caso aqui discutido refere-se a condição de regime permanente de aquíferos confinados com formações rochosas as quais tendem a reduzir a produção líquida comparada com a do aquífero homogêneo. Os resultados estão apresentados na forma tabular. A eficácia do sistema é mostrada comparando-se os casos com barreiras no aquífero contribuinte e outros casos, incluindo o caso de uma barreira radial a partir da periferia da área de influência. Observou-se que a barreira colocada perto do poço de bombeamento reduz a vazão em mais de 33,3 %, enquanto na posição mais afastada considerada a vazão conservou-se 91,7% do valor original. Uma barreira radial de mesma dimensão a partir da periferia não provocou quase efeito sobre a vazão, com uma redução de apenas 4,4 % da vazão. Desta forma, o posicionamento da barreira impermeável, assim como a sua orientação na área de influência do bombeamento no aquífero é de muita importância no que se refere a redução da vazão do poço.