

Modelação do Manancial Subterrâneo de Ribeirão Preto

1. Descrição do Domínio

Abelardo Antônio de Assunção Montenegro (a)

Antônio Marozzi Righetto (a)

Osmar Sinelli (b)

Resumo

Apresenta-se neste artigo a caracterização para fins de modelação matemática dos aquíferos subterrâneos de Ribeirão Preto, bem como o levantamento e discussão de informações existentes. O principal aquífero explorado é o Botucatu, naturalmente protegido, em grande parte do domínio, pelo Basalto do Serra Geral. Em decorrência do bombeamento intensivo em Ribeirão Preto, vem ocorrendo significativo rebaixamento piezométrico, criando-se uma depressão que já se estende a dezenas de quilômetros do contorno da cidade. Apesar dos estudos hidrogeológicos desenvolvidos na região, os dados disponíveis até o momento são insuficientes para se modelar adequadamente a hidrodinâmica de suas águas subterrâneas.

(a) Professores do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos - USP

(b) Professor do Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências e Letras de Ribeirão Preto - USP.

Modelação do Manancial Subterrâneo de Ribeirão Preto

1. Descrição do Domínio

Introdução

Os reservatórios de águas subterrâneas constituem a maior fonte disponível de água doce do planeta, com crescente emprego no abastecimento das populações e na irrigação.

Entretanto, a intensa exploração de alguns mananciais tem provocado um processo de rebaixamento generalizado em suas piezometrias.

Ribeirão Preto, em particular, dispõe de vários mananciais subterrâneos, dentre os quais se destaca o aquífero Botucatu, principal armazenador do sistema.

Em decorrência do intensivo bombeamento verificado nos últimos anos em Ribeirão Preto, vem ocorrendo rebaixamento do lençol da ordem de 10 a 25 metros em comparação ao nível original. A taxa de rebaixamento aumentou significativamente a partir da década de 60 e ainda não se nota qualquer estabilização. Em torno da cidade criou-se uma depressão que já se estende a dezenas de quilômetros.

O precário cadastramento dos poços na região, o escasso controle em suas extrações, bem como o incipiente acompanhamento das piezometrias dos aquíferos em Ribeirão Preto podem colocar em risco a vida útil do sistema de captação desses mananciais a médio prazo. Além disso, o perigo de contaminação é crescente, uma vez que não tem sido adotadas medidas de proteção das zonas de recarga superficial.

O presente artigo apresenta a caracterização do domínio em estudo e o levantamento e discussão de informações existentes e que serão utilizadas na modelação matemática do manancial subterrâneo de Ribeirão Preto.

Manancial Subterrâneo de Ribeirão Preto

A faixa de intensa exploração da Bacia Hidrogeológica de Ribeirão Preto, com cerca de 167 km², é constituída basicamente pela superposição das Formações Serra Geral, Botucatu e Pirambóia.

O principal aquífero utilizado para abastecimento público e particular é o Botucatu, naturalmente protegido, em grande parte do domínio, pelo basalto do Serra Geral. A Formação Botucatu é constituída de arenitos de granulação fina e média, apresentando uma espessura média de 60 m. A Formação Pirambóia constitui uma unidade independente abaixo do arenito Botucatu, caracterizada por arenitos argilosos de granulometria similar à do arenito da Formação Botucatu. As espessuras estimadas dessa unidade na região não ultrapassam 140 m. Diques e sills atravessam estas formações, criando obstáculos ao escoamento e reduzindo localmente a condutividade dos arenitos.

Apesar dos arenitos Botucatu e Pirambóia serem diferenciados geologicamente, do ponto de vista hidrodinâmico constituem um único sistema aquífero denominado de Aquífero Botucatu (TEISSEDE et alii (1982)).

Acima do Aquífero Botucatu, assenta-se o Aquífero Serra Geral, constituído por rochas de composição basáltica, com espessura média de 65 m na região. O Serra Geral

comporta-se como um aquífero multicamada, apresentando circulação entre os derrames em grande parte do domínio. Segundo SINELLI (1971) as principais fraturas no Serra Geral em Ribeirão Preto estão abertas o que permite uma boa intercomunicação entre elas. Entretanto, nem sempre existe continuidade do corpo d'água na seção vertical, podendo ocorrer, inclusive, vários lençóis independentes na mesma seção, com níveis piezométricos diferentes. Assim, a nível local, a captação de água no Serra Geral está relacionada às fraturas interligadas com as camadas armazenadoras e liberadoras de água próximas aos poços.

Porém, encarando-o em escala global, pode-se adotar valores de transmissividades representativos da circulação regional no aquífero, visto que em grandes distâncias finalmente se criam ligações hidráulicas entre as diversas fissuras. No modelo a ser desenvolvido, o Serra Geral, em Ribeirão Preto, será assumido contínuo e freático, com coeficiente de armazenabilidade igual a sua porosidade efetiva. O armazenamento d'água nessa formação é devido, basicamente, a sua porosidade fissural.

Testes no Serra Geral fornecem largas variações de transmissividade - de **0,04** a **1,6 m²/h**, porém a grande maioria dos valores encontrados situam-se no intervalo entre **0,25** e **0,75 m²/h**, com valor médio de **0,50 m²/h**. As armazenabilidades obtidas situam-se entre **0,01** e **0,05**. (Estudo de Aguas Subterrâneas - DAEE, 1974). Entretanto, deve ser salientado que grande parte destes testes no Serra Geral revelam apenas características locais do aquífero.

A partir da análise estrutural do Serra Geral na região de Ribeirão Preto, verificou-se acentuado caráter anisotrópico, elevada densidade de fissuras, obtendo-se **distribuições estatísticas** da orientação e do comprimento das mesmas (SINELLI e WERNICK (1970)) (Figs. 1 e 2).

Para análise da distribuição de frequência do comprimento das fissuras em Ribeirão Preto, os dados amostrais foram divididos em intervalos de classe, de amplitude variável: **Classe 1.** fissuras de até 0,75 km de comprimento; **Classe 2.** de 0,75 km até 1,00 km; **Classe 3.** de 1,00 km até 2,50 km; **Classe 4.** de 2,50 km até 3,25 km; **Classe 5.** de 3,25 km até 4,25 km; **Classe 6.** de 4,25 km até 5,00 km; **Classe 7.** de 5,00 km até 5,75 km; **Classe 8.** de 5,75 km até 6,75 km; **Classe 9.** de 6,75 km até 7,50 km. Os resultados encontram-se plotados na Fig. 2. Pode-se notar uma ampla predominância das Classes 1, 2 e 3. Acima de **2,5 km**, as frequências das fissuras decaem significativamente.

Sabendo-se que a **Genidade** do Serra Geral em Ribeirão Preto é de **1/6** (SINELLI e WERNICK [1970]) e que a área em estudo é de cerca de **167 km²**, pode-se determinar áreas representativas do domínio fraturado a partir da expressão:

$$A_R = (167) \times \left(\frac{1}{6} \right)^n \quad (1)$$

onde **A_R** é uma área representativa do domínio e **n** é um número inteiro não-negativo. Tomando-se **n = 3**, vem:

$$A_R = 167 \times \left(\frac{1}{6} \right)^3 = 0,77 \text{ km}^2 \cong 1,00 \text{ km}^2 \quad (2)$$

O domínio fraturado em estudo, do ponto de vista geológico, será constituído, então, de uma malha bidimensional de blocos quadrados de aproximadamente **1 km²**. Nestas

áreas quadradas (Volumes Elementares Representativos - REV), as fissuras poderão ser encaradas como infinitas, devido à predominância no domínio de fissuras da classe 2 (Fig. 2).

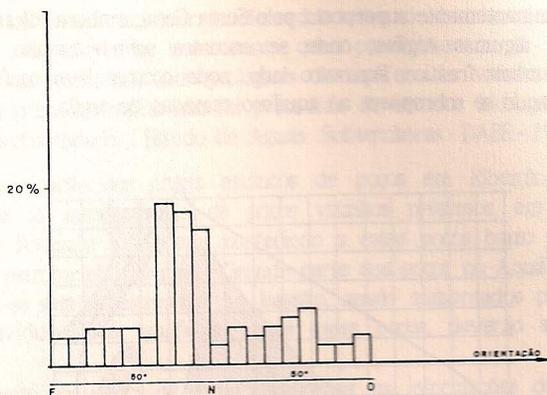


Fig.1. Distribuição de frequência de orientação das fissuras (segundo SINELLI e WERNICK [1970]).

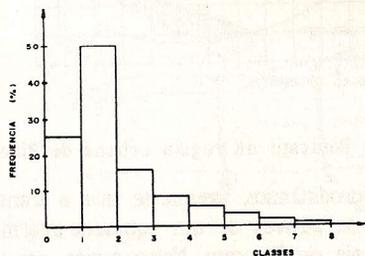


Fig. 2. Distribuição de frequência dos comprimentos das fissuras em Ribeirão Preto (segundo SINELLI e WERNICK [1970]).

Devido à sua formação recente, a unidade geológica representada pelos basaltos do Serra Geral não deve apresentar mais que dois sistemas (famílias) de fissuras paralelas superpostas. Assim, cada REV possuirá duas e somente duas orientações de fissuras (uma para cada família), geradas a partir da distribuição apresentada na Fig. 1. As fissuras em cada família serão supostas independentes. Em virtude da carência atual de dados, hipóteses simplificadoras deverão ser adotadas no tocante à abertura das fissuras (que variam de milímetros a centímetros) em relação aos espaçamentos das fissuras a direção NE de fissuras apresenta 25% de fissuras espaçadas de 50 m, 29% de 75 m, 29% de 150 m e 17% de 200 m; na direção NW 27% de 50 m, 27% de 75 m e 27% de 100 m e 19% de 20 m. Em princípio, serão utilizados valores médios, uniformes no REV em questão.

A condutividade hidráulica do fissuramento horizontal é bem superior que a do fissuramento vertical. Desse modo, espera-se que modelos bidimensionais horizontais simulem adequadamente os escoamentos no aquífero Serra Geral.

Na área urbana de Ribeirão Preto, domínio em estudo, o aquífero Botucatu encontra-se predominantemente superposto pelo Serra Geral, embora aflore em algumas partes (Figs. 3 e 4). Em algumas regiões, onde se encontra sob o basalto, o aquífero Botucatu apresenta comportamento freático. Por outro lado, pode ocorrer leve confinamento nas regiões de afloramento, quando se sobrepõem ao aquífero camadas de argila.

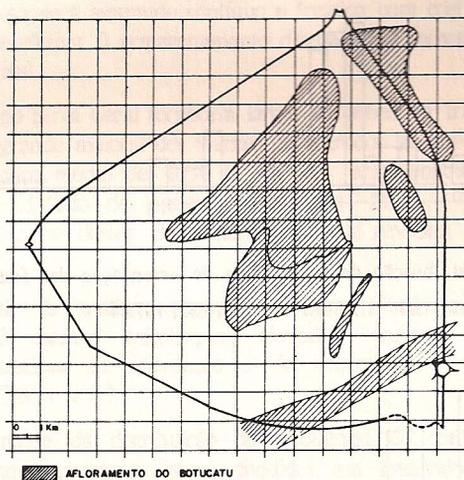


Fig. 3. Afloramentos de Botucatu na região urbana de Ribeirão Preto.

Do ponto de vista hidrodinâmico, assume-se que a transição vertical entre os aquíferos Serra Geral e Botucatu dá-se através de um aquítarde intermediário, constituído por basalto fissurado preenchido por areia do Botucatu. Nessa região, ocorre silificação do arenito Botucatu, concorrendo para uma acentuada redução da condutividade hidráulica do contato Botucatu-Serra Geral (SINELLI et alii [1980]).

Devido à reduzida condutividade hidráulica do aquítarde, em relação à condutividade dos aquíferos, com basaltos apresentando menor grau de fissuramento e à hipótese de escoamento essencialmente horizontal nesses, pode-se assumir escoamento essencialmente vertical através do aquítarde. (BEAR, (1972)). Essas trocas através do aquítarde em Ribeirão Preto são, inclusive, bem superiores ao fluxo subterrâneo horizontal que entra ou sai do domínio (Estudo e Aguas Subterrâneas - DAEE, 1974).

Quanto ao nível estático médio nos aquíferos Botucatu e Serra Geral, adotar-se-á, por simplicidade, um mesmo valor para os dois aquíferos. Em razão deste aparente equilíbrio, o fluxo poderá ser ascendente ou descendente, dependendo apenas dos rebaixamentos devidos às extrações em cada aquífero.

Para simulação dos níveis dinâmicos dos aquíferos Serra Geral e Botucatu dispõe-se de dados referentes à vazão de extração média, rebaixamento e perfil geológico de grande parte dos poços tubulares da região urbana de Ribeirão Preto (Fig. 5), além do razoável conhecimento dos parâmetros hidrodinâmicos do sistema.

Em alguns desses poços foram efetuados testes de bombeamento, geralmente de curta duração, sem as medidas necessárias que possibilitassem a determinação das produtividades e das características hidrogeológicas do aquífero na vizinhança dos poços. Em geral, a construção de poços na região não foi precedida de estudos hidrogeológicos necessários para suas locação e profundidade. (Estudo de Aguas Subterrâneas - DAEE - 1974).

A determinação dos níveis estáticos de poços em Ribeirão Preto é precária, devido principalmente às interferências de poços vizinhos próximos, em funcionamento. A penetração parcial no Botucatu é pequena, conferindo a estes poços baixo rendimento, muitas vezes em regiões de piezometria favorável. Grande parte dos poços no Aquífero Botucatu sob o Serra Geral, apresenta-se sem revestimento no basalto, sendo alimentados pelos dois aquíferos. As contribuições individuais dos aquíferos, para esses poços, deverão ser computadas no modelo.

A despeito dos dados de poços disponíveis, as informações do perfil geológico e vazão de extração são muitas vezes contraditórias e inexatas. Além disso, os dados de níveis estáticos não permitem o estabelecimento da configuração piezométrica natural do sistema devido às interferências entre poços, já citadas.

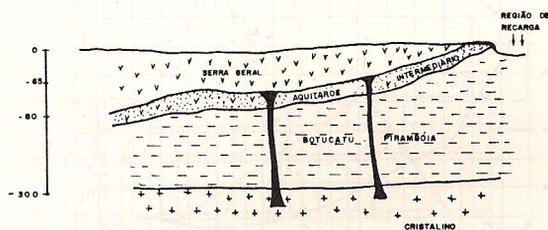


Fig. 4. Sistema Aquífero em Ribeirão Preto.

Em vários poços que atravessam o Serra Geral para exploração do Botucatu, próximos a regiões de alta densidade de bombeamento, são observados níveis dinâmicos abaixo do topo do arenito. Assim, o sistema nas vizinhanças desses poços, inicialmente confinado, assume condições freáticas, com súbita variação em sua transmissividade e armazenabilidade.

Para os poços de penetração parcial no Botucatu, tal comportamento pode impossibilitar o bombeamento futuro, à medida que cones de depressão de poços vizinhos rebaixarem ainda mais a piezometria local. Em alguns desses poços, inclusive, os níveis estáticos já se situam abaixo do topo do Botucatu e o sistema, localmente, não mais se apresenta sob pressão.

A Figura 6, ilustra a evolução dos níveis dinâmicos na região urbana de Ribeirão Preto, podendo-se notar o sensível rebaixamento a partir da década de 60.

No tocante ao fluxo horizontal no contorno urbano da cidade de Ribeirão Preto, SINELLI et alii (1980) sugere para o Botucatu uma componente do gradiente de **0,6%** na direção **E-W** (produzindo fluxo no sentido **E-W**) bem mais pronunciada que na **N-S**, podendo esta última ser desprezada.

Segundo TEISSEDE et alii [1982], os gradientes nas regiões profundas são, aproximadamente, 10% dos valores encontrados próximo aos afloramentos.

Para o Serra Geral, SINELLI e WERNICK [1970] identificaram a direção **N-50-60 E** como preferencial do escoamento, sentido **NE-SW**.

A alimentação (recarga natural) do aquífero Botucatu - Pirambóia processa-se principalmente através da infiltração direta, a partir da precipitação, nas áreas onde o mesmo aflora. Nestas áreas, de solo arenoso e relevo suave, a porosidade e a permeabilidade são bastante elevadas. (SINELLI et alii [1980]).

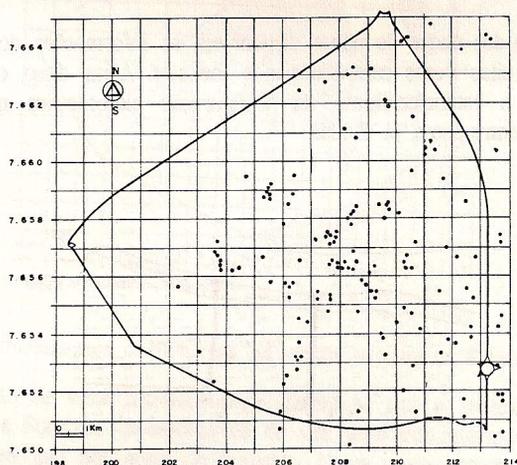


Fig. 5 Localização dos principais poços tubulares na zona urbana de Ribeirão Preto.

Dados levantados pelo DAEE indicam valores de **0,50 m²/h** para a transmissividade média no aquífero Botucatu no Estado de São Paulo próximo às regiões freáticas, e **3 m²/h** nas regiões de maior confinamento. A armazenabilidade desse aquífero situa-se entre **10⁻³** e **10⁻⁵**, diminuindo com o aumento do confinamento. Em condições freática, este coeficiente aproxima-se de **0,25**. A condutividade hidráulica média é estimada em **3,5 m/dia** (Estudo de Aguas Subterrâneas - DAEE, 1974).

Testes no aquífero Botucatu em Ribeirão Preto indicam, entretanto, uma transmissividade média de **26,5 m²/h**. Os valores de transmissividade crescem no sentido Leste-Oeste, apresentando no domínio valores entre **11,80 m²/h** e **44,27 m²/h** (SINELLI et alii [1980]). A aparente discrepância entre os dados pode ser atribuída ao fato de

possivelmente, os primeiros valores não levarem em consideração a contribuição da formação Pirambóia no aquífero conjugado.

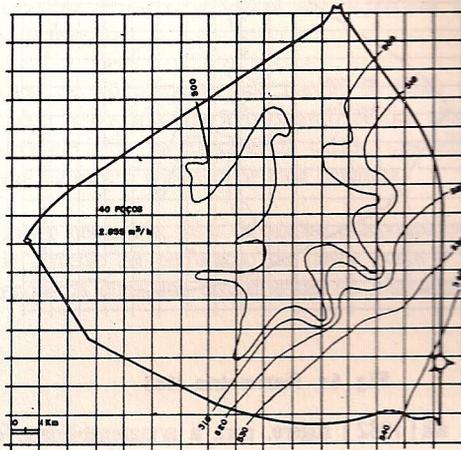


Fig. 6a. Piezometria 1966/1975

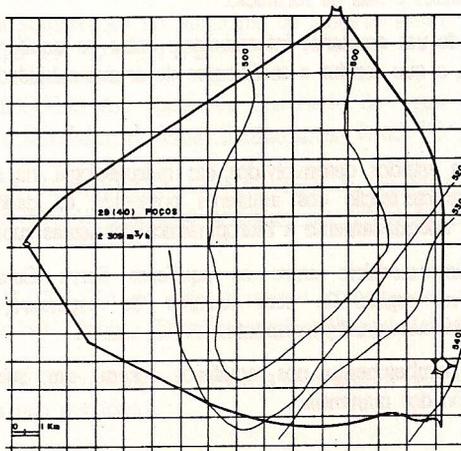


Fig. 6b. Piezometria 1976/1982.

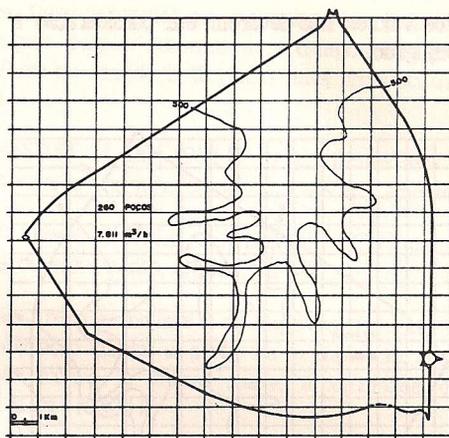


Fig. 6c. Piezometria 1983

TEISSEDE et alii [1982] sugere, para a armazenabilidade do Botucatu, valores entre 10^{-4} e 10^{-6} , conforme o grau de confinamento, e de 10^{-1} nas zonas de afloramento.

As transmissividades no Botucatu em Ribeirão Preto, serão calculadas a partir da condutividade hidráulica do arenito e dos dados geológicos de espessura da formação. Para uma condutividade de $3,5 \text{ m/dia}$, valores de transmissividade entre $11,80 \text{ m}^2/\text{h}$ e $44,27 \text{ m}^2/\text{h}$ indicam uma faixa de espessura do Aquífero Botucatu - Pirambóia, em Ribeirão Preto, de 81 m a 304 m . Localmente, podem ocorrer descontinuidades na condutividade do arenito em virtude da presença de derrames e sills na formação.

Pela presença de um aquítarde intermediário entre os aquíferos, o confinamento do Botucatu é apenas parcial, o que conduz a coeficientes de armazenabilidade mais elevados.

Conclusões

A despeito dos estudos desenvolvidos em hidrogeologia, na região de Ribeirão Preto e das tentativas de caracterização dos aquíferos presentes, os dados disponíveis são insuficientes para se modelar adequadamente a hidrodinâmica das águas subterrâneas.

O aquítarde intermediário entre os aquíferos Serra Geral e Botucatu é praticamente desconhecido na região. Os seus valores de espessura, condutividade e armazenabilidade são atribuídos ainda, subjetivamente.

Os testes de bombeamento nos aquíferos foram, em sua grande maioria, insuficientes para caracterização dos mananciais.

Desconhece-se a piezometria global do sistema em Ribeirão Preto, em regime permanente. Devido à grande proximidade entre os poços, tais leituras só poderiam ser efetuadas com a paralisação total do bombeamento por algumas horas.

As informações de perfis geológicos são imprecisas, principalmente no tocante à espessura da formação Pirambóia.

Necessita-se de conhecimento mais preciso do fluxo subterrâneo no contorno de Ribeirão Preto, de grande importância para o balanço hídrico global do sistema. Sugere-se a instalação de piezômetros em série, no contorno da cidade, possibilitando assim a avaliação da distribuição do gradiente hidráulico ao longo de toda fronteira.

Enfim, faz-se necessária, além da análise e acompanhamento da piezometria local, uma ampla política de controle na perfuração de novos poços e da produção dos existentes, bem como da manutenção da qualidade dessas águas, de vital importância para abastecimento atual e futuro.

Lista Bibliográfica

- [1] DAAE. "Estudo de Aguas Subterrâneas" - região administrativa 6 - Ribeirão Preto, 1974.
- [2] SINELLI, O. & WERNICK, E. "Análise Estrutural em Geomorfologia". Notícias Geomorfológicas, Campinas, SP, 10 (20): 39-54, 1970.
- [3] SINELLI, O. "Água Subterrânea no Município de Ribeirão Preto. XXV Congresso Brasileiro de Geologia, São Paulo - SP: 17-34, 1972.
- [4] SINELLI, O. & REBOUÇAS, A.C. "Custo de Exploração de Água Subterrânea - Ribeirão Preto - SP". 1º Congresso Brasileiro de Aguas Subterrâneas, Recife-PE: 311-317, 1980.
- [5] SINELLI, O., SOUZA, A., DAVINO, A., GONÇALVES, N. & TEIXEIRA, J.A. "Hidrogeologia da Região de Ribeirão Preto - SP". 1º Congresso Brasileiro de Aguas Subterrâneas, Recife-PE: 319-335, 1980.
- [6] SINELLI, O. & GALLO, G. "Estudo Hidroquímico e Isotópico das Aguas Subterrâneas na Região de Ribeirão Preto - SP". Revista Brasileira de Geociências, Vol. 10: 129-140, 1980.
- [7] SINELLI, O. "Estudos Hidrogeológicos da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo - SP", Ribeirão Preto - SP, 1987, ainda não publicado.
- [8] TEISSEDE, J.M., SANCHES, J.L. & LOPES, M.F.C. "Geometria e condições de exploração do Aquífero Botucatu no Estado de São Paulo". 2º Congresso Brasileiro de Aguas Subterrâneas, Salvador-BA: 53-63, 1982.