

## DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE RECARGA DE FONTES EM AQUÍFERO FRATURADO

M. A. Iritani<sup>1</sup>, S. Hassuda<sup>2</sup>, G. H. Oda<sup>1</sup>, L. M. R. Ferreira<sup>1</sup>, A. L. Teixeira<sup>1</sup>,  
F. A. Negri<sup>1</sup>, J. M. Azevedo Sob<sup>o1</sup> e G. M. Garda<sup>3</sup>

**Resumo** - O município de Águas de Lindóia (SP) tem, como sua principal atração turística, as fontes do Balneário Prof. Dr. João de Aguiar Pupo. Em função do crescimento da ocupação urbana, começou a crescer a preocupação com a preservação da qualidade da água subterrânea, decidindo-se delimitar uma área de proteção que abrangesse toda a área de recarga das fontes.

Para a definição da zona de contribuição destas fontes, foi utilizado o método do mapeamento hidrogeológico, adequado para aquíferos fraturados e heterogêneos, como existente em Águas de Lindóia.

A identificação das unidades litológicas e seu comportamento frente aos eventos tectônicos, associados à outras informações hidrogeológicas, permitiram compreender o sistema de fluxo da água subterrânea.

As fontes do Balneário Municipal estão localizadas em litologias constituídas por quartzitos e ortoquartzitos, que mostram, em função de seu comportamento rúptil, fraturamento aberto e favorável à circulação da água subterrânea. A delimitação da zona de contribuição destas fontes baseou-se na área de afloramento destas rochas quartzíticas e na bacia de drenagem onde se encontra o balneário, abrangendo uma extensão total de, aproximadamente, 3,25 km<sup>2</sup>, com formato alongado e limitada a leste e a oeste por rochas migmatíticas, gnáissicas e graníticas pertencentes aos grupos Amparo e Itapira.

<sup>1</sup> Instituto Geológico. Av. Miguel Stéfano, 3900 - São Paulo - SP. Tel: (011) 276-8721. Fax: (011) 276-8572.

<sup>2</sup> Waterloo Hydrogeologic do Brasil. Rua Álvares de Azevedo, 210 3º andar Santo André - SP. Tel/Fax: (011) 412-9511. E-mail: whs@waterloo.com.br

**Palavras-chave** - área de recarga, perímetro de proteção, aquífero fraturado

## **INTRODUÇÃO**

O município de Águas de Lindóia é conhecido pela qualidade da sua água. Sua economia é baseada na comercialização da água mineral e no turismo gerado pela fama da água das fontes pertencentes ao Balneário Municipal Prof. Dr. João de Aguiar Pupo.

Este balneário é visitado diariamente pelos residentes locais e por turistas nos períodos de finais de semana e férias, que vão à procura da boa qualidade da água, por vezes, popularmente dita medicinal. A água das fontes é utilizada para consumo humano, piscinas, banhos especiais, inalação e saunas.

Segundo informações do Serviço Autônomo de Água e Esgoto do município, a população residente em 1991 era de, aproximadamente, 12.000 habitantes, onde apenas cerca de 600 pessoas residiam na área rural. A população temporária, estimada com base no número de domicílios de turistas, somava cerca de 10.000 pessoas, desconsiderando aqueles turistas de passagem, que não se instalam na cidade.

O aumento da ocupação urbana ao redor do balneário fez crescer a preocupação, por parte da Prefeitura Municipal, em proteger as fontes de forma a garantir a qualidade da água. A forma encontrada foi a delimitação da área de recarga para estas fontes, com base nas características hidrogeológicas do sistema.

Este trabalho vem, então, mostrar a metodologia empregada para a definição da zona de contribuição destas captações, que se encontram em aquífero fraturado e heterogêneo.

## **PROTEÇÃO DE UMA CAPTAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA**

A proteção da água subterrânea pode enfocar duas estratégias distintas, como colocado por Foster & Hirata (1991). A primeira, voltada às obras de captação e a segunda, objetivando a proteção de toda a unidade aquífera, segundo as suas susceptibilidades intrínsecas, definidas através do mapeamento da vulnerabilidade natural do aquífero.

A estratégia enfocando a proteção das captações consiste em controlar as atividades antrópicas, com maior ou menor nível de restrição, nas áreas cuja água

---

<sup>3</sup> Instituto de Geociências/USP. Rua do Lago, s/n São Paulo - SP. Tel: (011) 818-4144

subterrânea existente flui em direção a estas captações, através da delimitação de perímetros de proteção.

USEPA (1987) define três componentes importantes na questão da delimitação dos perímetros de proteção de captações de água subterrânea. A Zona de Contribuição, que define toda a área de recarga ou zona de captura de uma captação., a Zona de Influência, representada pelo cone de depressão causado pelo bombeamento do poço e, finalmente, a Zona de Transporte, cujo limite é definido considerando-se um determinado tempo de trânsito de chegada da água à captação.

A forma mais efetiva de proteção é controlar as atividades em toda a Zona de Contribuição pois as demais zonas não garantem a proteção de toda a área de recarga da captação. Entretanto, em alguns cenários, devido às condições técnicas ou econômicas, são definidas algumas categorias de perímetros de proteção, com diferentes níveis de restrições, sendo mais rígidos nos perímetros mais próximos da captação.

USEPA (1987) descreve diversas metodologias para a delimitação das áreas a serem protegidas, dependendo do critério a ser adotado, como distância, rebaixamento do nível d'água, tempo de trânsito, fronteiras de fluxo e capacidade de assimilação do aquífero.

USEPA (1993), em seu estudo voltado a pequenas cidades, cita, entre as metodologias, o mapeamento hidrogeológico para a delimitação das fronteiras de fluxo e definição da área de recarga de uma captação em aquífero heterogêneo, como em unidades com feições cársticas ou com intenso fraturamento. Neste método, utiliza-se de informações geológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas para a definição das fronteiras de fluxo onde as feições mais comuns utilizadas como condição de contorno são contatos e estruturas geológicas, divisores de água subterrânea e condicionantes hidráulicos. Esta metodologia, muito utilizada em aquíferos extremamente heterogêneos, pode ser associada a outras metodologias para a definição de perímetros de proteção mais restritos, baseados em diferentes tempos de trânsito (Delin & Almendinger, 1993).

## **O MUNICÍPIO DE ÁGUAS DE LINDÓIA**

O município de Águas de Lindóia localiza-se na porção nordeste do Estado de São Paulo a, aproximadamente 200 km da capital paulista (Figura 1). A norte, Águas de Lindóia limita-se com o município de Monte Sião (MG) e a sul com o município de Lindóia (SP).

A topografia local é acidentada, principalmente a porção oeste do município. As maiores altitudes são encontradas no Morro Pelado, na região norte do município, superando os 1.000 metros.

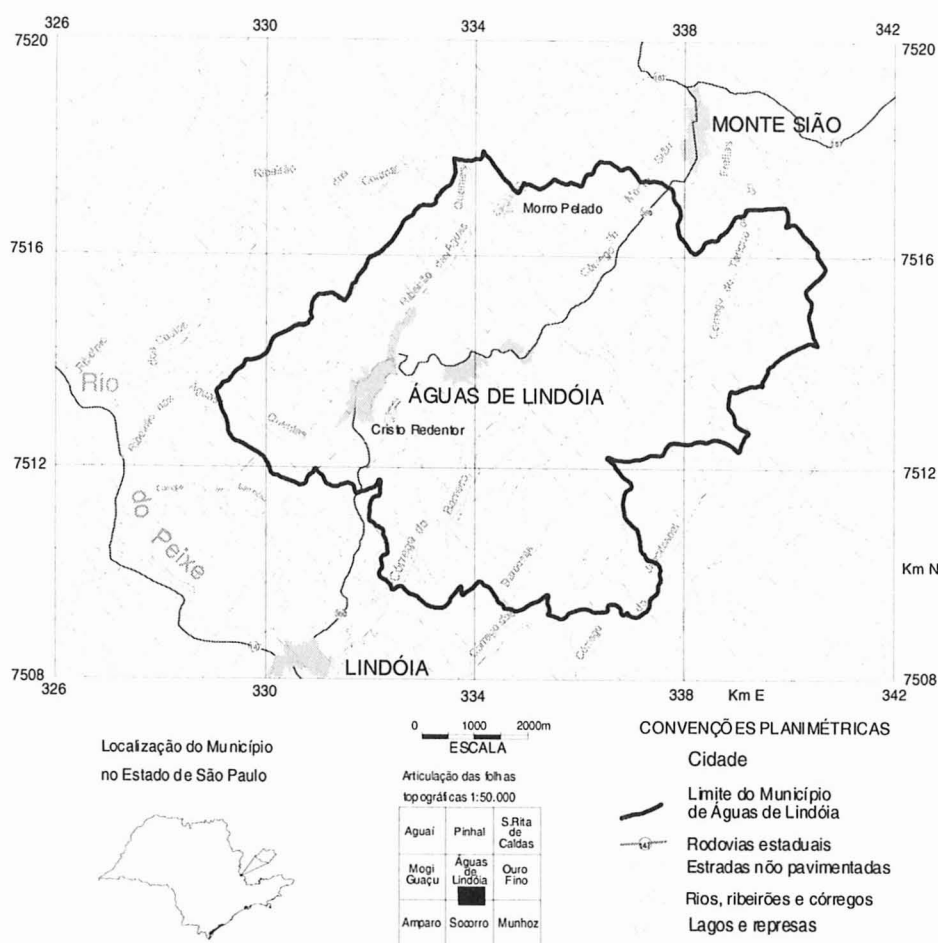


Figura 1 - Localização do município de Águas de Lindóia

A ocupação urbana estende-se segundo a direção N-NE, ao longo da rodovia (SP-360) que liga Águas de Lindóia às cidades de Monte Sião e Lindóia, sendo que a tendência de expansão segue para a porção nordeste do município, onde as declividades são menos acentuadas, e para a porção sul, para a cidade de Lindóia.

Nas porções topograficamente mais acidentadas, predominam capoeiras, plantações de eucalipto e pinho, entretanto a maior parte da área do município se encontra desmatada ou com outros tipos de culturas. Algumas manchas isoladas de mata natural ainda resistem dispersas no município, com pequena expressão, na forma de mata ciliar.

A economia é sustentada pela indústria de engarrafamento de água mineral e pelo turismo gerado, imprimindo uma imagem de "saúde" à cidade. Com isso, veio a preocupação para a delimitação de um perímetro de proteção para as fontes do Balneário

Municipal, que englobasse toda a área de recarga. Esta preocupação já havia sido levantada por CETESB (1986), no estudo hidrogeológico realizado.

O município de Águas de Lindóia localiza-se na porção central da Província Mantiqueira (Almeida & Hasui, 1984), fazendo parte de uma faixa geologicamente estruturada, na forma de um mega-anticlinal, composto por rochas da infraestrutura, mais antigas, representadas pelo Grupo Amparo, e por rochas da supraestrutura, do Grupo Itapira. Cortando o município em sua porção central, com direção SSW para NNE, encontra-se a Zona de Cisalhamento Monte Sião. A noroeste desta zona de cisalhamento predominam exposições de rochas pertencentes ao Grupo Itapira, enquanto, a sudeste, as rochas predominantes pertencem ao Grupo Amparo.

Estas rochas cristalinas apresentam falhas e fraturas que controlam o fluxo da água subterrânea no município, caracterizando-se em um aquífero fraturado e heterogêneo, onde a produtividade das captações está intimamente ligada às estruturas geológicas.

A água subterrânea na área é explorada por 37 poços profundos e 29 fontes cadastradas.

Entre os poços profundos, os principais usuários são as empresas de engarrafamento e os hotéis, que sustentam as atividades econômicas da cidade, a indústria da água mineral e o turismo. A produtividade dos poços cadastrados é variável, sendo que mais de 50% possuem vazão inferior a 10 m<sup>3</sup>/h. Em termos de capacidade específica, dos 21 poços com informação, 43% deles apresentaram valores inferiores a 0,1 m<sup>3</sup>/h/m e 57% superiores a este valor.

Das fontes cadastradas, as mais importantes pertencem ao Balneário Municipal, principal atração turística da cidade, as quais foram o alvo deste estudo. Existem, no balneário, cinco fontes denominadas de São Roque, Filomena, Beleza, Nova e Glória.

## **DEFINIÇÃO DA ÁREA DE RECARGA DAS FONTES**

A delimitação da área de recarga das fontes do balneário foi baseada na metodologia do mapeamento hidrogeológico para a definição das fronteiras de fluxo da zona de contribuição.

O mapeamento geológico teve papel fundamental no entendimento do comportamento estrutural da área, identificando-se as unidades litológicas de cada compartimento (da infraestrutura e da supraestrutura), e sua resposta, de forma rúptil ou dúctil, aos esforços tectônicos atuantes.

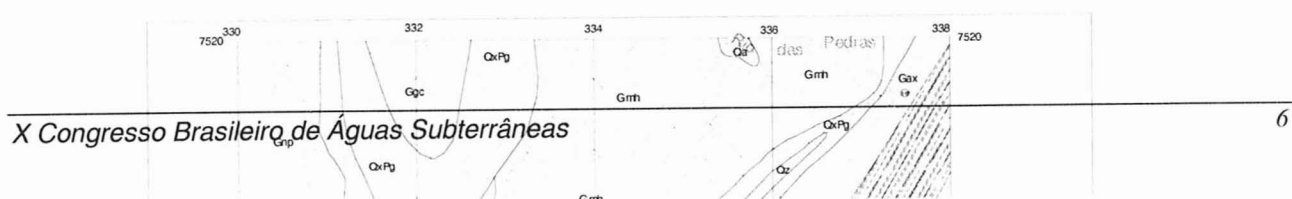


Dentre as litologias componentes de cada compartimento, o Grupo Amparo, infraestrutura, é composto por gnaisses e migmatitos diversos, enquanto o Grupo Itapira, no município, é representado por migmatitos, granitos, rochas ultramáficas e metabásicas, gnaisses graníticos, ortoquartzitos e quartzitos. As rochas miloníticas ocorrem associadas à Zona de Cisalhamento Monte Sião, que afeta litologias diversas, tanto da infraestrutura como da supraestrutura.

As fontes do Balneário localizam-se a oeste da Zona de Cisalhamento de Monte Sião, ocorrendo em rochas extremamente fraturadas, constituídas por quartzitos e ortoquartzitos pertencentes ao compartimento da supraestrutura. A avaliação da produtividade das fontes cadastradas no município mostrou que as melhores vazões estão associadas a estas litologias que, durante os esforços tectônicos, apresentaram um comportamento rúptil dada sua característica mineralógica com menor plasticidade, produzindo fraturas abertas com direções NE-SW e NW-SE, e falhas de alívio horizontais. Yoshinaga (1990), avaliando todas as fontes da região entre Lindóia e Águas de Lindóia, também indicou uma melhor produtividade das fontes associadas aos quartzitos.

As unidades de quartzito e ortoquartzitos possuem formato alongado, com seu eixo longitudinal paralelo à direção da Zona de Cisalhamento, NE-SW. Estas unidades são limitadas, a oeste, pelos gnaisses e migmatitos da infraestrutura (Grupo Amparo) e pelos migmatitos e granitos da supraestrutura (Grupo Itapira). A leste, tem-se novamente a unidade dos migmatitos e granitos do Grupo Itapira, separando as unidades quartzíticas da zona de cisalhamento.

Apesar destas unidades limítrofes se apresentarem também fraturadas, sua resposta aos eventos tectônicos teve um comportamento mais dúctil devido à constituição mineralógica. Além disso, estas rochas são mais enriquecidas em minerais máficos e feldspatos, mais susceptíveis ao intemperismo químico, causando dissolução e precipitação de material argiloso nas fraturas, diminuindo a permeabilidade do meio. Dessa forma, devido à diferença na densidade de fraturamento aberto, as unidades quartzíticas formam um corredor mais permeável, induzindo o maior fluxo da água subterrânea, explicando as maiores vazões das fontes do Balneário localizadas nestas litologias.



Considerando as fontes como áreas de descarga do aquífero, sua recarga só pode estar em regiões do município potenciométricamente mais elevadas, não distantes das captações de interesse. Yoshinaga (1990), em seu estudo isotópico, mostra que as águas das fontes do Balneário apresentam um pequeno tempo de trânsito desde a sua infiltração até o ponto de descarga nas fontes.

Dessa forma, as fronteiras de fluxo basearam-se no cenário hidrogeológico e geológico existente, definindo-se o afloramento das litologias dos quartzitos e ortoquartzitos, nas porções topograficamente mais elevadas que as fontes, como a principal área de recarga, abrangendo o Morro Pelado, no limite norte do município e estendendo-se até o Morro do Cruzeiro, ao sul do balneário. A leste e a oeste, a área de

recarga é limitada pelo afloramento das rochas gnáissicas e migmatíticas dos grupos Amparo e Itapira (Figura 2).

Além do afloramento das rochas quartzíticas, foi englobada na área de recarga das fontes, a bacia de drenagem onde se situa o balneário, procurando proteger a água advinda de um fluxo mais local, percolada no manto de intemperismo. Esta bacia de drenagem abrange uma parte da unidade litológica de migmatitos e granitos do Grupo Itapira, que pode possuir intercalações de pequena expressão de quartzitos e quartzoxistos.

Assim, a área de recarga das fontes, ilustrada na Figura 2, tem um formato alongado, com direção NE-SW, seguindo o afloramento das litologias quartzíticas, limitada por rochas de menor permeabilidade, que funcionam como fronteiras de fluxo.

## CONCLUSÕES

A proteção das captações de água subterrânea, através da definição de áreas ou perímetros de proteção, é uma estratégia viável a ser implantada, existindo diversas metodologias adaptáveis aos diversos cenários hidrogeológicos e às disponibilidades técnicas e econômicas de cada situação de interesse. Sua definição pode partir de metodologias mais simples e menos custosas, caminhando para métodos mais complexos, mas também mais precisos, como a modelação matemática, a medida que informações hidrogeológicas de maior detalhe forem sendo levantadas, fazendo parte de uma estratégia de gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

No município de Águas de Lindóia, o objetivo inicial, abordado neste trabalho, foi definir a área de recarga das fontes do Balneário Municipal, sendo que o passo seguinte, cujos resultados serão publicados em futuro próximo, será a definição de perímetros de proteção mais restritos dentro desta zona de contribuição, sugerindo uma estratégia de controle das atividades antrópicas que possam implicar em risco negativo à qualidade da água subterrânea.

A metodologia selecionada de mapeamento hidrogeológico mostrou-se adequada para o cenário hidrogeológico considerado, de aquífero fraturado e heterogêneo.

A área de recarga definida, apesar de ocupar uma extensão aproximada de 3,25 km<sup>2</sup>, não apresenta, aparentemente, muitas atividades preocupantes, pois abrange áreas de topografia muito acidentada onde predominam eucaliptos e propriedades rurais e de veraneio. Além disso, Águas de Lindóia, por ser um município pequeno e ainda em



expansão, apresenta grandes áreas sem ocupação urbana, que dificulta o controle e a implantação de qualquer medida de proteção.

Sob este ponto de vista, acredita-se que as cidades de pequeno a médio porte terão maior facilidade para a implantação de uma estratégia de proteção voltada às captações e, dado os menores custos de exploração deste recurso, estas cidades são as que mais utilizam a água subterrânea para fins de abastecimento público, principalmente no interior paulista.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Prefeitura Municipal de Águas de Lindóia e ao Balneário Prof. Dr. João de Aguiar Pupo pelo apoio nos trabalhos. Ao SAE de Águas de Lindóia e empresas de perfuração da região pelos dados dos poços. E, finalmente, ao Instituto Geológico por permitir a publicação de parte dos resultados deste trabalho.

## BIBLIOGRAFIA

- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). 1986. *Levantamento hidrogeológico de Águas de Lindóia, SP*. Relatório Técnico, São Paulo.
- DELIN, G. N. & ALMENDINGER, J. E. 1993. *Delineation of recharge areas for selected wells in the St. Peter-Prairie du Chien-Jordan aquifer, Rochester, Minnesota*. U. S. Geological Survey, Water Supply Paper 2397. 39 p.
- FOSTER, S. S. D. & HIRATA, R. C. A. 1991. *Determinacion del riesgo de contaminacion de aguas subterraneas. Una metodologia basada en datos existentes*. CEPIS/OPAS, Lima, Peru. 2ª ed (revisada). 81 p.
- U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1987. *Guidelines for delineation of wellhead protection areas*. USEPA, Office of Water, Washington, EUA, EPA-440/5-93-001. 204 p.
- U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1993. *Wellhead protection: A guide for small communities*. Seminar Publication. USEPA, Office of Research and Development, Office of Water, Washington, EUA, EPA/625/R-93/002. 144 p.
- YOSHINAGA, S. 1990. Estudos hidrogeológicos, hidroquímicos e isotópicos das águas minerais e termais de Águas de Lindóia e Lindóia, SP. Defendida no Inst. de Geociências - USP, 116 p., inédito.

