

INVESTIGAÇÕES HIDROGEOLÓGICAS NA REGIÃO CÁRSTICA DE LAGOA SANTA, MG - INFORMAÇÕES PRELIMINARES

Pessoa, Paulo Fernando Pereira¹ & Loureiro, Celso de Oliveira Loureiro²

Resumo - Apresentam-se os resultados preliminares dos estudos hidrogeológicos que estão sendo realizados nos ambientes constituídos por rochas carbonáticas da área de entorno da Lagoa Santa, situada na cidade homônima, ao norte da região metropolitana de Belo Horizonte, centro sul de Minas Gerais. Os métodos e as ferramentas que vêm sendo utilizados para se caracterizar o comportamento e a dinâmica das águas subterrâneas abrangem: a perfuração de cerca de 6.000 metros de sondagens testemunhadas que atravessam todo o edifício carbonático; a implementação de poços piezométricos nos locais perfurados; a realização de ensaios com traçadores corantes para a determinação de velocidades e rotas de fluxos subterrâneos em locais estratégicos; a realização de análises químicas das águas subterrâneas em surgências; e, o monitoramento da carga hidráulica nos 23 poços piezométricos instalados, com o controle automático de níveis em 6 poços selecionados. Dados de monitoramento de descargas de água em surgências e a análise petrográfica e lito-estrutural dos testemunhos de sondagem, aliada às investigações hidrodinâmicas dos aquíferos a partir das interpretações através de ensaios de bombeamento, recuperação e ensaios de permeabilidade pontuais, visam o melhor conhecimento dos processos indicadores do comportamento evolutivo, hidrodinâmico e hidrogeoquímico dos aquíferos cársticos da região em apreço.

Abstract - Preliminary results of a current hydrogeological investigation project were presented, regarding a carbonated rock aquifer located around the Lagoa Santa lake, in the city of Lagoa Santa, north of Belo Horizonte, estate of Minas Gerais. The methods and tools that have been used to characterize the groundwater behavior and dynamics in this system include: drilling of about 6.000 meters of investigation holes, with its recovered cores, reaching the entire carbonate layer depth; installation of 23 piezometers at these drilled sites; performing dye tracing for groundwater velocity and time residence determination; pumping tests and slug tests for spatially comparison analysis of hydraulic conductivity in the area; hydrochemical analysis in the groundwater springs; and,

¹ UFMG / DESA – Pós-graduação Depto de Engenharia Sanitária. Rua do Ouro, 1875/103. Belo Horizonte / MG. CEP. 30.210-590 (0xx31) 3284.7977 – paulofpp@terra.com.br

² UFMG / DESA – Professor Depto de Engenharia Sanitária. Av. Contorno 842, 7º andar. Belo Horizonte / MG. CEP. 30.110-060 (0xx31) 3238.1884 – celso@desa.ufmg.br

automatic recording of groundwater levels in 6 selected piezometers. Monitoring data on the spring hydrochemistry and water discharge, as well as the petrography and lithological analysis of the core samples, together with the results from pumping tests, have helped to improve the knowledge about the hydrodynamical and hydrochemical evolutionary behavior of the groundwater flow at this karstic area.

Palavras-Chave – aquífero cárstico; hidrogeologia.

INTRODUÇÃO

Neste artigo são apresentados alguns resultados preliminares dos estudos hidrogeológicos, ora em curso, sobre os ambientes constituídos por rochas carbonáticas da área de entorno da Lagoa Santa, situada na cidade homônima, ao norte da região metropolitana de Belo Horizonte, centro sul de Minas Gerais.

Tais investigações deverão resultar na apresentação do cenário descritivo acerca do comportamento do aquífero cárstico, considerando-se a maneira de como as propriedades hidráulicas e os atributos intrínsecos do meio interferem no processo de desenvolvimento e evolução do carste, e a ação dos mecanismos que regem o controle das águas subterrâneas em termos de circulação, armazenamento e descarga.

De uma maneira geral, a realização de trabalhos em ambientes de rochas carbonáticas, onde os dados são relativamente escassos, acrescenta pouco em termos de avanço ao entendimento das formas de evolução hidrodinâmica do sistema aquífero cárstico, considerando-se ainda, de forma mais restritiva, o elevado custo para se elaborar pesquisas que possam trazer resultados consistentes a respeito do referido tema.

O rol de atividades desenvolvidas e os recursos adotados neste estudo só foram possíveis com o auxílio dado à pesquisa, e os investimentos direcionados especificamente à mineração, pela Mineração Soeicom SA, cuja área de lavra insere-se no domínio de interesse direto das referidas pesquisas.

A região em questão tem sido palco de alguns poucos estudos hidrogeológicos, desde as três últimas décadas, sendo a grande maioria de forma basicamente descritiva, quanto aos aspectos de interesse ao tema, com conteúdo eminentemente condicionado à observação dos atributos detectáveis em superfície. Raros são aqueles estudos em que, ainda que de forma parcial, introduzem dados quantitativos das porções de sub-superfície, ou mesmo, parcialmente penetrantes nos aquíferos cársticos.

A região foi estudada até o momento, de forma mais sistemática, apenas a partir de trabalhos desenvolvidos com cunho investigativo voltado à caracterização geomorfológica (Kohler 1978,

Kohler 1989, Parizzi, 1993), espeleológica (CPRM, 1998), e hidrogeológica (Carvalho *et al.* 1978; Auler, 1994, 1995; CPRM, 1998; Pessoa, 1996; Cruz, 2003). Desses trabalhos, somente os estudos de Kohler (1989); Parizzi (1993); Carvalho *et al.* (1978) e Cruz (2003), encontram-se na área específica de interesse, estando os demais em faixas contíguas ou regionalmente próximas.

JUSTIFICATIVA

Os levantamentos hidrogeológicos ora pretendidos possibilitarão, pela primeira vez na área em questão, se avançar no entendimento da dinâmica hídrica subterrânea dos terrenos cársticos locais, cuja proximidade a centros urbanos, industriais e de mineração, ainda carecem desse tipo de estudo. Os métodos integrados aplicados devem contribuir de forma consistente na indicação dos processos e mecanismos controladores do funcionamento de fluxos subterrâneos nesses sistemas, o que certamente, trará benefícios a todos os usuários desses recursos, única fonte de exploração de água para todos os tipos de abastecimento: público, industrial e rural. Os sistemas de abastecimento estão constituídos, na maioria das vezes, pela presença de poços tubulares profundos, não havendo um controle das vazões exploradas e das interferências existentes entre os sistemas de captação.

O crescimento populacional e as formas de uso e ocupação inadequadas elevam o grau de incerteza sobre o que os efeitos ao atendimento desta demanda regional representam em termos de comprometimento ao equilíbrio do sistema hídrico cárstico, refletindo assim, os principais motivos de se levantar dados qualitativos e quantitativos que possam auxiliar o entendimento da dinâmica hídrica subterrânea; ressaltando-se suas características peculiares de escoamento por dutos de dissolução do material carbonático e a sua intrínseca vulnerabilidade natural.

OBJETIVOS

O objetivo geral de estudo é o de se caracterizar a dinâmica hídrica subterrânea da região cárstica de Lagoa Santa, visando o entendimento de seu comportamento através da determinação dos componentes naturais intervenientes no sistema de fluxos subterrâneos, o que deve possibilitar a adoção de procedimentos mais seguros para utilização e preservação de mananciais subterrâneos desta natureza.

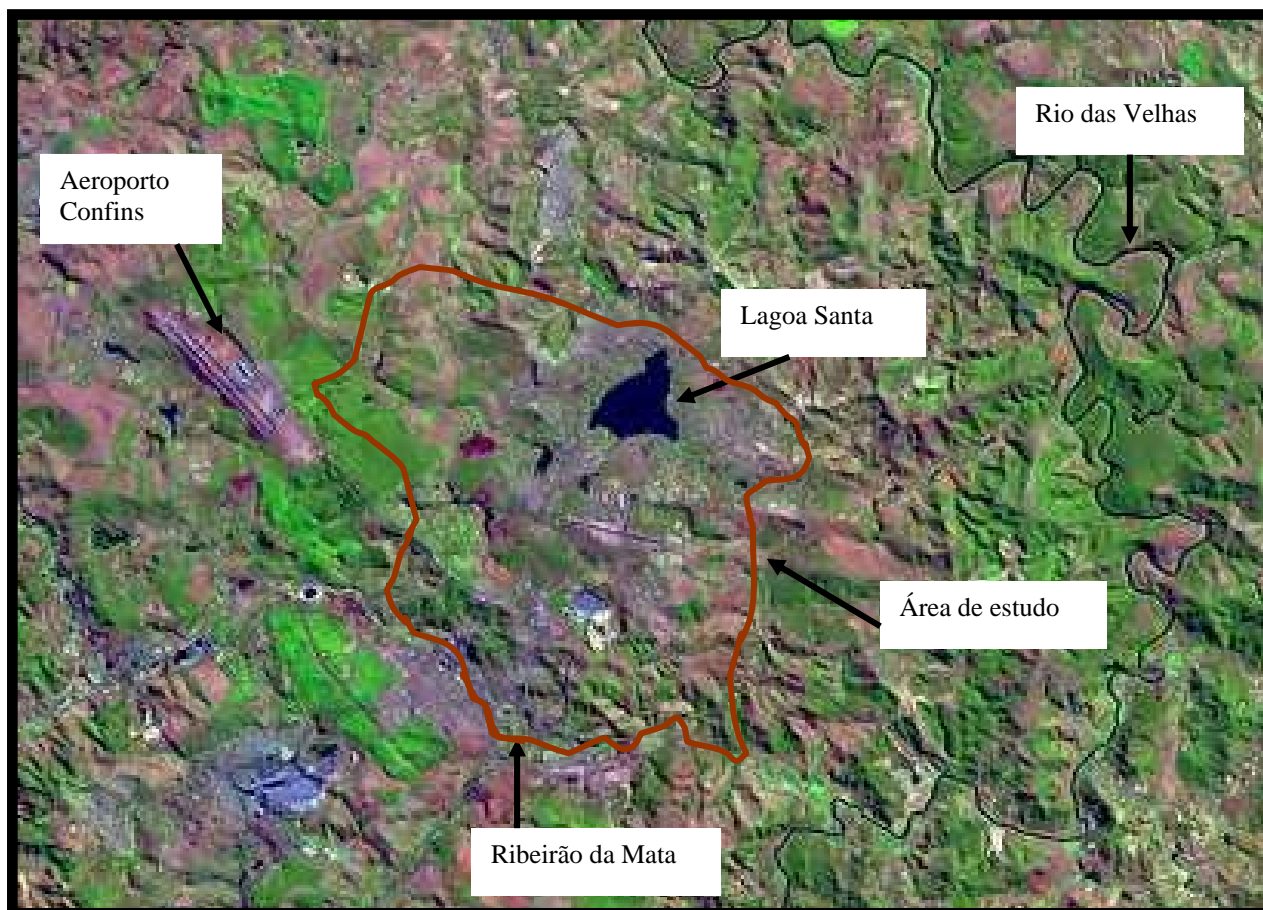
De forma específica, os objetivos estão expostos de acordo com a realização das seguintes atividades:

- ✓ apontar os resultados obtidos através das campanhas de sondagens testemunhadas, com um breve relato dos materiais perfurados, diante do cenário geológico regional e local;

- ✓ indicar valores resultantes de velocidade de fluxo subterrâneo em áreas testadas por traçadores corantes na confirmação de rotas subterrâneas; e,
- ✓ apresentar as observações preliminares acerca do monitoramento hidrogeológico realizado em alguns poços piezométricos.

LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudos situa-se no município de Lagoa Santa, em Minas Gerais e está delimitada por algumas condições de contorno específicas que abrangem parte do entorno da bacia hidrográfica da Lagoa Santa e sub-bacias imediatamente adjacentes, inseridas nas áreas de abrangência da bacia do ribeirão da Mata, com o nível de base regional representado pelo rio das Velhas. A Figura 1 abaixo apresenta o mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Embrapa Monitoramento por satélite (2004)

Figura 1 – Localização da área de estudo e as referências locais e regionais

GEOLOGIA LOCAL

O Grupo Bambuí constitui uma unidade neoproterozóica do Supergrupo São Francisco, representando a maior parte das áreas de afloramento na bacia homônima (Martins-Neto & Alkmim *in* Pinto & Martins-Neto, 2001). A área de estudo está, assim, totalmente inserida na porção basal dessa unidade, representada pelas rochas carbonáticas de sua formação basal Sete Lagoas, onde são encontrados preferencialmente margas, calcilitos e calcarenitos, sendo recoberta pela Formação Serra de Santa Helena (pelitos). A Formação Carrancas (conglomerados) constitui-se, na verdade, como o pacote basal do Grupo Bambuí. Contudo, como será visto adiante, não é encontrada na área de estudo. Não existe ainda a definição precisa da idade do Grupo Bambuí, sendo que estudos de geoquímica isotópica têm demonstrado que as idades de deposição, deformação e incipiente metamorfismo ocorrem no intervalo entre 750 e 600 Ma. Segundo estudos de Babinski *et al.* (1999, *in* Pinto & Martins-Neto, 2001), rochas da Formação Sete Lagoas apontaram a idade de 689 ± 69 Ma como mínima para a deposição dessa unidade.

O arcabouço estrutural está representado pelos registros da tectônica neoproterozóica imposta na borda sul do cráton do São Francisco, área onde se situa Lagoa Santa. As estruturas que estão presentes refletem a atuação de esforços cuja vergência para oeste retrata toda a deformação essencialmente epidérmica, adjacente ao compartimento Leste da Faixa Araçuaí. O metamorfismo mostra-se pouco acentuado, condizente a fácies xisto verde, onde se verifica a abundância de veios de quartzo e de calcita. Falhas de empurrão, dobras em duplexes e leques imbricados dominam o cenário de deformação, persistindo os sistemas de juntas em pares, conjugados nas direções NE/SW e NW/SE.

METODOLOGIA

A proposta de trabalho contempla a concepção do modelo de comportamento de fluxos subterrâneos da área em apreço, desenvolvida sob a luz da aplicação de técnicas integradas de estudo de ambientes cársticos, e auxiliada pelas campanhas de sondagem testemunhada, em cerca de 6.000 metros de amostras de rochas carbonáticas, e pela malha de piezômetros instalados nos mesmos furos de sondagem. Outras informações importante também são utilizadas, quais sejam: 1) os dados da distribuição espacial de carga hidráulica na região, obtidos ao longo de cerca de 3 anos de monitoramento; 2) os dados de vazão obtidos nos vertedores instalados e monitorados nas surgências de exsudação dos mananciais cársticos; 3) as análises químicas das águas subterrâneas, realizadas em pontos estratégicos do sistema aquífero local; e, 4) o registro dos dados de carga hidráulica obtidos através de sensores automáticos de pressão, instalados em 6 pontos de controle do sistema. Nos pontos onde se observam maiores condutividades hidráulicas do sistema, são

realizados ensaios com traçadores corantes, sob a forma de experimentos quantitativos / qualitativos com o objetivo de avaliar as velocidades dos fluxos subterrâneos e o tempo de residência nos aquíferos, bem como as rotas prováveis de fluxos.

Considerações gerais sobre os mecanismos de investigação hidrogeológica adotados

Os mecanismos que controlam o comportamento e a dinâmica das águas subterrâneas nos ambientes constituídos por rochas carbonáticas sempre foram alvo de investigações hidrogeológicas as quais levavam em consideração, predominantemente, os dados coletados em superfície, a partir de inferências lançadas pelas interpretações de aerofotos e informações tomadas nos afloramentos das rochas carbonáticas, quando disponíveis. De forma bem menos freqüente, e isolada, dados de poços tubulares produtores parcialmente penetrantes no maciço calcário eram aproveitados, gerando enormes extrapolações acerca dos atributos do meio aquífero, em profundidade e lateralmente, no que se refere ao conhecimento das características preponderantes de condutividade hidráulica, e por conseguinte, de seus comportamento de fluxos.

Uma outra limitação envolvia a dificuldade de se levantar dados que fossem suficientemente abrangentes e representativos do sistema de fluxos nos ambientes cársticos, por serem tais estudos naturalmente muito onerosos. Assim, a existência de uma malha mais densa e variada de informações, através das sondagens, vem permitir uma melhor compreensão sobre a geometria do sistema investigado, e por conseqüência, um melhor entendimento a respeito dos processos que controlam os sistemas de fluxos subterrâneos.

A determinação mais acurada dos elementos e estruturas que dão origem ao processo e ao desenvolvimento das feições de dissolução, visam projetar o cenário geométrico de circulação de fluxos, definindo-se e relacionando-se os locais onde ocorrem as zonas de fluxo tipo conduto (*conduit flow*), das feições fraturadas que identificam as zonas de fluxo difuso (*diffuse flow*), e das faixas de matriz carbonática de porosidade efetiva primária onde ocorrem as zonas de fluxo nulo ou desprezível.

Diversos estudos têm sido desenvolvidos para a melhor compreensão da evolução e do comportamento de fluxos de águas subterrâneas em ambientes de rochas carbonáticas, conforme citado em Ford (2003), White (1988, 2002, 2003), Smart & Hobbs (1986), Teutsch & Sauter (1991), Kastning, (1999), Auler (1995), Palmer (2003), Kaufmann (2003), Kaufmann & Broun (2000), Kiraly (2003), Worthington (2003) e outros, sendo que, em sua maior parte, verifica-se a importância de se desenvolver, de início, as bases que servirão de sustentáculo para a concepção do modelo hidrogeológico, a partir das observações primeiras sobre a variedade dos componentes que estruturam o arcabouço geológico e de que forma essa geometria pode condicionar e influenciar o comportamento de fluxos.

Conforme apontamentos de Worthington (2003) verifica-se que, nas últimas três décadas, os aquíferos carbonáticos têm sido estudados, de uma maneira geral, a partir de três formas distintas, quais sejam:

- 1) considerando, apenas localmente, a porção fraturada da matriz rochosa, e levando em conta que os adensamentos de fraturas ocorrem numa dimensão suficiente para serem modelados matematicamente, assumindo, assim, as condições de fluxo como em um meio poroso;
- 2) considerando que as fraturas possam se estender lateralmente e, dessa maneira, atingir grandes distâncias, podendo significar uma condutividade muito maior do que a do próprio maciço, refletindo assim uma dupla porosidade para o aquífero; e,
- 3) considerando a identificação de condutos que expressem elevadas condutividades hidráulicas dos maciços, dado o padrão de canais de dissolução encontrados na forma de vazios, devendo somente os mesmos serem alvo de estudo do sistema aquífero.

Nos dois primeiros casos, assume-se que a execução de furos de sondagem possa ser representativa para a coleta de amostras a respeito das características dos aquíferos. No terceiro caso, as técnicas de análise incluem os testes com traçadores e o monitoramento hidroquímico e de descargas das fontes cársticas.

A adoção das duas primeiras técnicas apontadas mostra que, na verdade, as aproximações sobre o comportamento dos fluxos tende a resultar num estudo que caracteriza apenas parcialmente o aquífero cárstico. As técnicas de traçadores, bem como as de monitoramento hidroquímico e de descargas de fontes cársticas, servem apenas para a caracterização de condutos cársticos, mas pouco elucidam sobre as condições de fluxo difuso que ocorrem nas zonas de matriz fraturada.

De forma contrária, furos de sondagem e poços de monitoramento podem caracterizar zonas de fraturas e de matriz rochosa como pontos de amostragem do sistema aquífero, mas pouco podem elucidar sobre as zonas com presença de fluxos por condutos ou cavernas, as quais possam estar presentes entre os poços executados. Por conseqüência, verifica-se que a compreensão do sistema de circulação em calcários só pode ser adquirida com o estudo de todos os componentes de fluxo existentes no aquífero, que é o que este estudo, em curso, busca contemplar.

Com base nas assertivas acima apontadas, muitos autores Ford (2003), White (1988, 2002), Teutsch & Sauter (1991), têm ressaltado a importância de se desenvolver conceitos que auxiliem na avaliação dos problemas e fenômenos hidráulicos do carste, os quais possam atender às demandas crescentes de avaliação dos aquíferos sob o ponto de vista de proteção dos recursos hídricos, o que nos domínios aquíferos cársticos torna-se mais complicado dada a dificuldade de se quantificar os parâmetros diante de sua heterogeneidade.

No sentido de Ford (2003), a descrição do funcionamento dos aquíferos cársticos deve ser estabelecida a partir de uma base conceitual e física do ambiente a ser investigado, abrangendo todas as formas de interconexão entre as áreas de recarga, distribuição das permeabilidades no maciço, e os compartimentos geológicos diferenciados. Coletivamente, esse conjunto proporciona a visualização e o entendimento de como a água chega ao sistema, se armazena, se conduz e se descarrega do sistema aquífero.

Esses aspectos conduzem ao raciocínio lógico de que o modelo desenvolvido será avaliado apenas quanto à sua hidrodinâmica em termos espaciais, ou seja, a descrição dos percursos da água pelo meio físico. De outra forma, o modelo físico concebido leva em consideração somente a recarga e o movimento das águas, desconsiderando-se as transformações que ocorrem no meio aquífero decorrentes desse processo.

Outra observação que deverá ser agregada ao modelo conceitual, leva em consideração as alterações e os processos de carstificação ao longo do tempo, pois a medida que o maciço rochoso fraturado evolui para um sistema aquífero mais condutivo, estes processos de dissolução progridem. À medida que o processo de dissolução ao longo das rotas de fluxo avança em contato com a rocha carbonática, conforme citado por Dreybrodt (1998), as condições iniciais de alargamento das juntas passam a se manifestar de forma mais intensa a depender das condições de gradiente hidráulico, além dos fatores como distância a percorrer e dimensões iniciais de abertura das juntas. Palmer (1991) e Dreybrodt et al. (1996) utilizando-se de valores experimentais identificaram uma taxa máxima de retirada de materiais das paredes de juntas da ordem de 0.01 a 0.1 cm/ano. A partir dessas taxas pode-se atingir de um pequeno conduto ou junta de 0.01 m para 1 m de diâmetro ou mais, em um período menor do que alguns poucos milhares de anos.

Dessa maneira, as investigações hidroquímicas podem auxiliar no conhecimento das taxas de crescimento dos espaços vazios nas porções endocársticas. Essas taxas de denudação cárstica, segundo Kaufmann (2003), são obtidas com a quantificação de certas variáveis hidroquímicas que são medidas nas surgências, as quais funcionam como zonas de exsudação das águas cársticas nos pontos de descarga dos sistemas. Essas variáveis podem apresentar-se como parâmetros indicadores das taxas de dissolução do material carbonático denotando quanto avança o crescimento erosivo dos carbonatos pela ação da água, o que resulta no conhecimento das taxas de alargamento dos condutos cársticos em sub-superfície.

RESULTADOS PRELIMINARES

Como relatado anteriormente, o estudo em andamento pretende adotar os métodos de avaliação de aquíferos cársticos disponíveis e utilizados no momento, mas de forma integrada num

mesmo domínio, como ferramentas que possam indicar e justificar o controle de entradas e saídas de água no sistema, no tempo e no espaço, visando o pleno entendimento das características evolutivas do sistema cárstico em questão. O volume de dados que se está adquirindo deve suportar tal avaliação, em vista dos inúmeros procedimentos e do ferramental implementado no domínio de interesse, possibilitando o avanço do conhecimento acerca do comportamento das águas subterrâneas neste tipo de aquífero.

RESULTADOS DAS SONDAGENS

Inicialmente, apresentam-se os locais onde foram implementados os pontos de controle na área de estudo, conforme apresentado na Figura 2. Além dos pontos que estão indicados nesta figura, existem 18 pontos adicionais que se referem a campanhas de sondagem anteriores cujos locais não foram apontados face a escala de apresentação, mas que serão contemplados no estudo.

Conforme as necessidades da investigação em se verificar as condicionantes hidrogeológicas em diversos setores do entorno da cava da mineração, estes foram furos dispostos, basicamente, em direção a Lagoa Santa, em direção aos bairros vizinhos à área da mina que se utilizam de poços para captação de água subterrânea e, ao sul, na direção do nível de base local, representado pelo ribeirão da Mata. Poços de captação também fazem parte do cenário de avaliação, mas não estão aqui representados pelo mesmo motivo anterior.

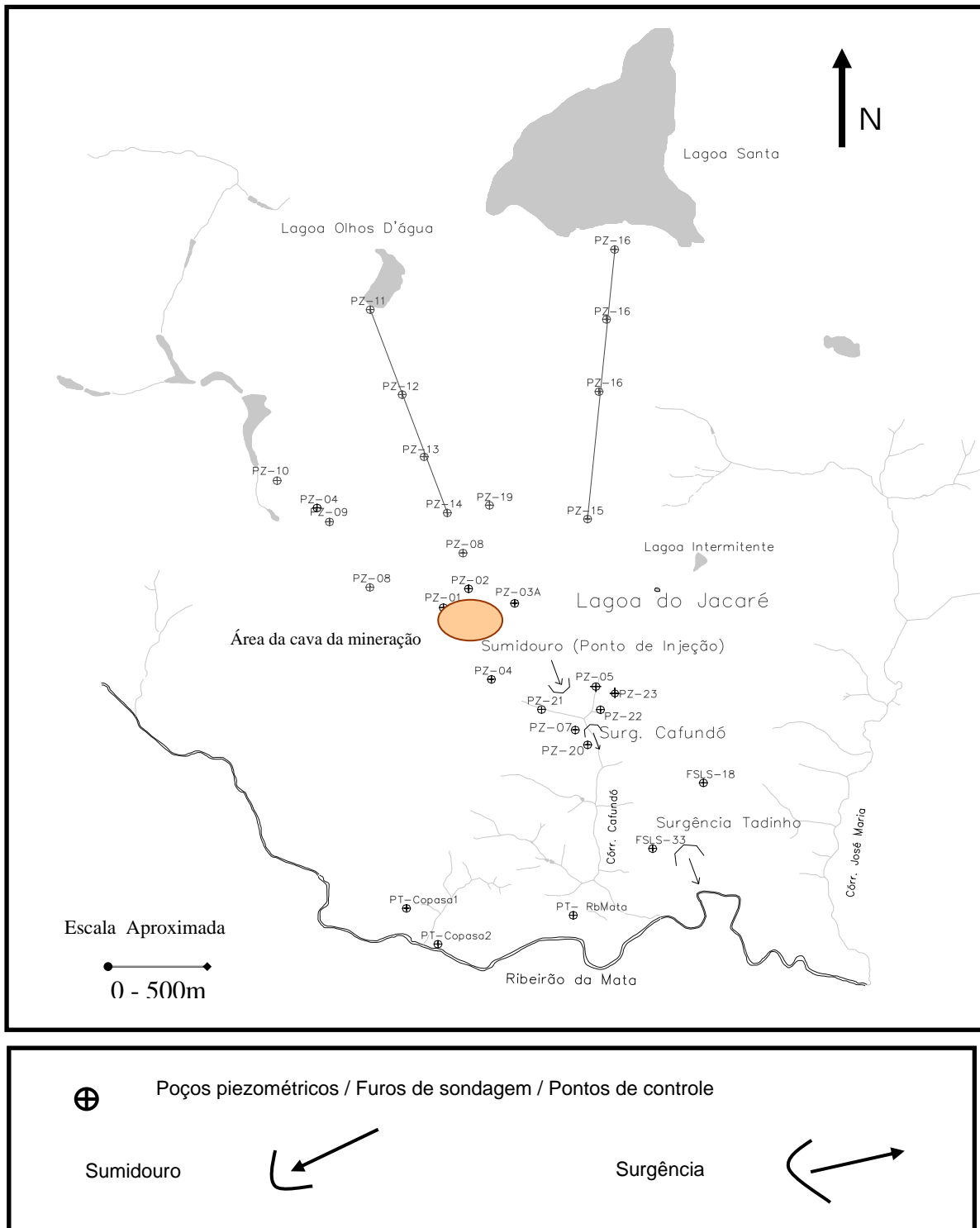


Figura 2 – Distribuição dos pontos de sondagem / piezômetros / surgências

De um total de mais de 12000 metros de sondagens em rochas, podem ser identificados dentre os furos que foram executados, o aproveitamento na instalação de poços piezométricos um total de aproximadamente 6000 metros de sondagens com diâmetro BQ, cujos testemunhos também foram recuperados para descrição, estando armazenados na litoteca da empresa mineradora. Dentre estes, cerca de 17 foram executados em multi-níveis, constando sempre um par de poços para observação apenas das condições do manto de alteração, e seu vizinho, com câmara filtrante na porção basal do pacote calcário.

De início, cabe salientar que o material que se coletou, e que se está descrevendo com base nos testemunhos das sondagens, pode evidenciar a não existência de elementos geológicos em profundidade que sejam passíveis de separação dentro da Formação Sete Lagoas. Como citado em trabalhos anteriores, relativo à presença dos membros Pedro Leopoldo (basal) e Lagoa Santa (topo) (CPRM, 1998), há de se reavaliar a lito-estratigrafia local, pois as evidências preliminarmente levantadas indicam apenas a existência de um pacote de carbonatos que se mostra afetado por intensidades distintas de deformação, além da ausência dos conglomerados basais, citados em diversos trabalhos anteriores com denominações diferentes (Branco & Costa, 1961; Dardenne, 1978; Grossi & Quade, 1985; Pinto & Martins-Neto, 2001), posto que as sondagens atingem o embasamento granítico-gnáissico em quase a totalidade dos furos.

Os testemunhos dos calcários amostrados em suas diversas profundidades evidenciam uma interessante variação quanto aos seus aspectos reológicos, face às características deformacionais impressas, sendo que a repetição em profundidade ocorre com frequência. Há furos que se iniciam (topo) com calcários calcíticos, cujos aspectos principais são sua textura micrítica homogênea e cristalinidade exuberante, coesão nítida, tonalidade cinza, com grau de fraturamento se mostrando bastante incipiente em geral, salvo nas faixas imediatamente em contato com os materiais superficiais da cobertura inconsolidada, onde reside a zona epicárstica.

Outros furos já se apresentam (topo) na forma de cálcio filitos ou filitos carbonáticos, cuja laminação denota-se facilmente em escala mesoscópica pelo seu aspecto listrado, face à frequência planar das foliações micáceas, preponderantemente sub-horizontais, materializando níveis de fraturas associadas (Fotos 1 e 2) a esses planos, cuja frequência se mostra superior aos calcários microcristalinos.



Fotos 1 e 2 – Testemunhos de cálcio filito típico apresentando-se bastante foliado

Zonas de passagem de água são frequentes em pequenas fissuras e fendas, que, também, encontram-se normalmente preenchidas por material rico em carbonato de cálcio, sendo a calcita abundante em meio a venulações de quartzo, ou vice-versa.

Nos cálcio filitos, os aspectos deformacionais incluem, em geral, trechos com minerais bastante estirados e orientados, principalmente quartzo e calcita, estando os argilo-minerais também deformados, denotando-se por vezes, o aparecimento de uma clivagem de crenulação ao longo de planos micáceos, por entre filmes de calcita, e sombras de pressão.

Nas zonas intensamente deformadas, as quais encontram-se preferencialmente intercaladas nos cálcio filitos, percebe-se que há intensa remobilização mineral, trechos com intensa piritização, e a constante característica de aumento do ângulo da foliação em relação ao eixo vertical dos furos de sondagem. As clivagens mostram-se também mais evidentes, havendo, em inúmeros casos, o rompimento e a transposição mineral na forma de superfícies S-C, ao longo dos planos micáceos.

Nesses trechos ocorre, com freqüência, uma maior densidade de fraturas. Muitas falhas normais também são observadas, ocorrendo principalmente, paralelas ao eixo vertical do furo. Algumas fraturas se mostram evidentes também nas direções plano axiais dos eixos de dobras, estando estas materializadas ao longo da foliação principal. Ocorre, em geral, como característica marcante das zonas mais deformadas, o aparecimento de material grafitoso negro, que se manifesta entre trechos intensamente remobilizados de calcita e quartzo, na forma de venulações abundantes (Fotos 3 e 4).



Foto 3 – cálcio filito deformado c/ veios de calcita **Foto 4** – Cálcio filito grafitoso deformado

ENSAIOS COM TRAÇADORES

Esta etapa de estudo contou com o apoio do CDTN – Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear, de Belo Horizonte, MG. Cumpre ressaltar, como salientado anteriormente, que os resultados esperados a partir da realização desse experimento são fundamentais na compreensão dos processos indicadores do comportamento hidrodinâmico e evolutivo do sistema aquífero investigado.

O local onde foram realizados os experimentos já foram anteriormente estudados a partir de ensaios com traçadores corantes Fluoresceína e Rodamina (Tecisan, 2000), mas apenas de forma qualitativa, tendo sido comprovada uma rota de fluxos no mesmo cenário hidrogeológico. Dessa maneira, os ensaios executados vêm permitir, de forma pioneira na área, experimentar de forma

quantitativa o comportamento de fluxos subterrâneos, para a determinação da velocidade das águas subterrâneas, e para a avaliação do tempo de trânsito no aquífero através da curva de recuperação do traçador, e qualitativamente, para o levantamento das características de dispersão.

A análise dos resultados de experimentos quantitativos com traçadores tem sido utilizada por Mull, Smoot, Liebermann (1988) para descrever as relações entre descargas, tempo médio de trânsito, velocidade média de fluxos, e características de dispersão de solutos em condutos cársticos.

O objetivo principal dessa etapa é o de se concluir uma das tarefas de estudo destinada a apresentar os resultados de investigação dos aquíferos cársticos em uma porção específica do compartimento cárstico. Dentre os objetivos gerais incluem-se o desenvolvimento de atividades hidrogeológicas para a delimitação de unidades aquíferas; o conhecimento da velocidade de fluxos subterrâneos; a aplicação de técnicas de traçadores corantes como ferramenta de análise quantitativa dos sistemas aquíferos cársticos; e o auxílio na determinação da condutividade hidráulica dos aquíferos cársticos.

Procedimentos de trabalho

Os procedimentos de trabalho adotados para a realização da etapa de avaliação das características hidráulicas do aquífero cárstico no domínio em questão, foram conduzidos a partir da elaboração de um conjunto de atividades específicas, destinadas a organizar as decisões a serem tomadas, conforme descrito nos itens adiante.

Infra-estrutura básica

A identificação da área e dos dispositivos necessários à realização do ensaio hidráulico foi o primeiro passo, seguido da caracterização das condições hidrológicas do referido local, bem como do reconhecimento de campo e dos pontos de interesse para o ensaio.

Os dispositivos de controle, que foram utilizados na realização do ensaio, foram apresentados no mapa da Figura 2, tendo sido utilizados tanto para instalação de detectores como poços piezométricos, como as próprias surgências e sumidouros onde se instalaram coletores automáticos e se injetou os corantes.

Condições hidrológicas, métodos de amostragem e escolha do traçador

Para a determinação das condições hidrológicas visando a aplicação dos traçadores, foram considerados os dispositivos de medição de descargas existentes, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Informações hidrológicas dos pontos de controle

Pontos de controle	Denominação do ponto	Identificação	Descargas (L/s)
Sumidouro	Dolina de Injeção	Fotos 11, 12, 14	100,0
Surgência	Tadinho	Fotos 5 e 6	48,0
Surgência	Cafundó (1)	Foto 15	2,0
Surgência	Cafundó (2)	Foto 16	5,0

A determinação das descargas é realizada de forma a garantir a adequação das concentrações de corantes a serem utilizadas no procedimento de ensaio. Assim, a descarga referente ao ponto de injeção foi medida com base na vazão nominal da bomba que descarrega no referido ponto, todo o desaguamento da lavra, onde são bombeados normalmente 360 m³/h ao longo do período em que se encontra em operação. Esse valor já foi confirmado em leitura conferida por medição comparativa por processos volumétricos.

A distância entre o ponto de injeção e o ponto mais distante considerado, no caso da surgência do Sr. Geraldo Tadinho, é de 1.655 metros, sendo a distância menor a ser considerada entre o mesmo ponto de injeção e as outras surgências do Cafundó, de aproximadamente 460 metros.

Quanto à seleção dos métodos de amostragem, foram utilizados amostradores automáticos (Fotos 7 a 9) nos pontos de surgências e, nos demais pontos de controle, foram acomodados sachês de carvão ativado no interior de piezômetros, tendo sido instalados de forma a permanecer em profundidade, próximo às zonas de entrada d'água dos poços.

O corante utilizado foi a Rodamina WT. Este composto químico é amplamente utilizado para essas finalidades Mull *et al.* (1988), sendo atóxico nas concentrações adotadas nos ensaios.

Colocação dos Detectores

Os detectores utilizados neste experimento consistem de carvão de coco ativado de granulometria 8 a 12 mesh. O carvão ativado possui a propriedade de absorver e reter a rodamina quando a nuvem de corante passa pelo carvão.

A preparação dos sachês de carvão ativado – detectores foi realizada através de sacos de tela plástica onde foram colocados por volta de 10 g de carvão. Estes invólucros tiveram suas bordas seladas, mas devido ao espaçamento da tela, permitem livre passagem à água. Os invólucros foram atados a uma corda de náilon com um peso de chumbo à ponta. Estes sachês foram então posicionados de modo que permanecerem junto à zona de entrada de água nos poços piezométricos.

Injeção do traçador

No mesmo dia em que se procedeu à colocação dos detectores, efetuou-se a injeção de rodamina no sumidouro. O referido ponto encontra-se sem fluxo de água (estado natural do

sumidouro) e, portanto, a água proveniente do fundo da cava principal foi direcionada para esse local, com a vazão de cerca de 360 m³/h.

A rodamina foi adicionada em pequenas quantidades, até completar cerca de 0,5 litro, diluindo-se o mesmo e procedendo o seu lançamento no sumidouro. Desta forma, a injeção correspondeu a uma descarga relativamente pontual de corante, a qual foi transportada como uma nuvem de dispersão por um trecho de extensão aproximada de 1.660 m até o ponto de descarga da surgência do Tadinho, onde foi colocado um coletor automático portátil. Outros pontos onde foram instalados coletores automáticos similares referem-se às surgências do córrego Cafundó (1) e (2).

A verificação de *background* da água, quanto à presença de corantes nos referidos pontos de controle, foi realizada anteriormente, uma vez o processo de instalação do sistema de ensaio ser acompanhado de um fluorímetro portátil o qual apresentou alguns dos resultados das concentrações do corante no momento de sua instalação no local, e previamente ao lançamento do corante.



Foto 5 – Surgência do Tadinho, vazão de 48 L/s, observe-se coletor automático e régua limétrica.



Foto 6 – Surgência do Tadinho, medida de vazão.



Foto 7 – Equipamento coletor automático.



Foto 8 – Detalhe do visor do coletor automático.



Foto 9 – Detalhe do interior do coletor automático, contendo 24 garrafas para amostras.



Foto 10 – Detalhe do fluorímetro utilizado nas análises de concentração do corante (rodamina).

Interpretação do experimento

Os dados obtidos no experimento foram analisados de forma quantitativa nos pontos onde foram colocados os coletores automáticos, ou seja, nas surgências do córrego Cafundó e na surgência do Tadinho. Nos demais pontos em que se colocaram os detectores de carvão ativado, o ensaio se restringiu à observação do potencial de dispersão da nuvem de corante, otimizando o experimento, mas de forma qualitativa, em pontos que cercam a tendência geral de fluxos subterrâneos.



Foto 11 – Sumidouro com rodamina



Foto 12 – Sumidouro com descarga de 360 m³/h



Foto 13 – Calha de medição de vazão



Foto 14 – Detalhe do sumidouro de injeção



Foto 15 – Surgência Cafundó (1)



Foto 16 – Surgência Cafundó (2)

Para o ensaio quantitativo será elaborada a curva de recuperação do traçador, como ponto culminante do experimento e sua interpretação. Os materiais coletados estão sendo analisados para posterior análise, mas em decorrência do tempo médio em que se deu o primeiro contato da nuvem

de corantes com o primeiro detector instalado no ponto mais distante da injeção (Tadinho), verifica-se que a velocidade média do fluxo subterrâneo alcança cerca de 120 metros por hora, levando em torno de 14 horas para as primeiras concentrações do corante terem sido detectadas.

Os resultados completos deste experimento, com a sua respectiva interpretação, serão apresentados oportunamente, em um artigo técnico a ser publicado em conjunto com o grupo de pesquisa do CDTN – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, que participou na execução e análise do experimento.

MONITORAMENTO HIDROGEOLÓGICO

A rede de monitoramento hidrogeológico está constituída pela distribuição dos dispositivos utilizados como ferramentas de medida do nível d'água dos aquíferos, das suas descargas naturais e de sua qualidade natural.

Essa rede de monitoramento hidrogeológico está composta por dois conjuntos de dispositivos, quais sejam: o primeiro refere-se ao conjunto de poços tubulares, surgências, calhas e régua linimétricas existentes em toda a área de abrangência do estudo e que extrapola a zona imediata do entorno da mina. O segundo conjunto representa a coleção de poços piezométricos construídos para atender às observações das oscilações de nível d'água nas zonas adjacentes à mineração. A localização de todos os pontos da rede de monitoramento foi apresentada no mapa da Figura 2. Os resultados obtidos com esta rede de monitoramento são utilizados para a análise do comportamento do aquífero, ao longo dos períodos de acompanhamento das oscilações climáticas, sendo que os gráficos referentes a essas oscilações, observadas por cerca de 3 anos de medição, em parte do sistema instalado, estão apresentados na Figura 3, abaixo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As considerações sobre os resultados encontrados até o momento são resumidas a seguir:

- os dados de sondagem apresentados perfazem apenas uma parcela do material amostrado, cujas informações definitivas serão apresentadas e melhor interpretadas ao final do estudo, contemplando a totalidade dos testemunhos disponíveis;
- os testes com traçadores corantes mostrou-se ser muito eficiente para o estudo da dinâmica aquífera de ambientes cársticos, sendo os valores encontrados até momento indicativos de zonas com elevada condutividade hidráulica. As informações obtidas até o momento permitem dizer que apenas o sistema Tadinho está conectado à faixa de influência

hidrogeológica da mina, estando o sistema Cafundó situado em níveis de contato com recarga de sistemas superiores;

- as oscilações do nível d'água observadas na maior parte dos poços piezométricos mostram que o comportamento do aquífero está comprometido com o balanço das entradas e saídas de água no sistema, ou seja, ao término e início dos períodos secos e úmidos, com um certo atraso. No entanto, as injeções de água proveniente do rebaixamento da cava, cuja descarga ocorre, em parte, no sistema cárstico da surgência do Tadinho, deverá ser melhor avaliada com a detecção de possíveis rotas alternativas que estejam assimilando o excedente dos afluxos injetados, uma vez ter sido demonstrado pelo monitoramento das vazões nessa surgência, como pelo próprio ensaio de traçadores, que somente parte desses volumes se direcionam para essa zona de descarga;
- as variações do nível d'água demonstram que as maiores elevações de carga hidráulica estão relacionadas ao término do período úmido, em fins de abril e início de maio, enquanto as menores elevações encontram-se no final do período seco, em geral, no início do mês de outubro, podendo se prolongar até novembro dependendo da estiagem no ano de referência;
- as oscilações do nível d'água correspondentes ao período avaliado não determinam decréscimos acentuados que possam implicar em alguma queda generalizada ocasionada pelos procedimentos de rebaixamento realizados na mina, o que pressupõe a quantidade de água rebaixada ser ainda em grande parte, proveniente dos acúmulos de precipitação pluviométrica;
- verifica-se também, que as cotas médias de nível d'água dos poços piezométricos adjacentes à mina, encontram-se ligeiramente superiores ou similares ao nível atual da cava, indicando uma proximidade do início do rebaixamento;
- os valores observados quanto à amplitude de variação sazonal, mês a mês, sugerem um controle geral do comportamento hídrico subterrâneo condicionado pelas oscilações pluviométricas locais, as quais regulam as cargas hidráulicas do sistema aquífero, com certa eficiência e rapidez;

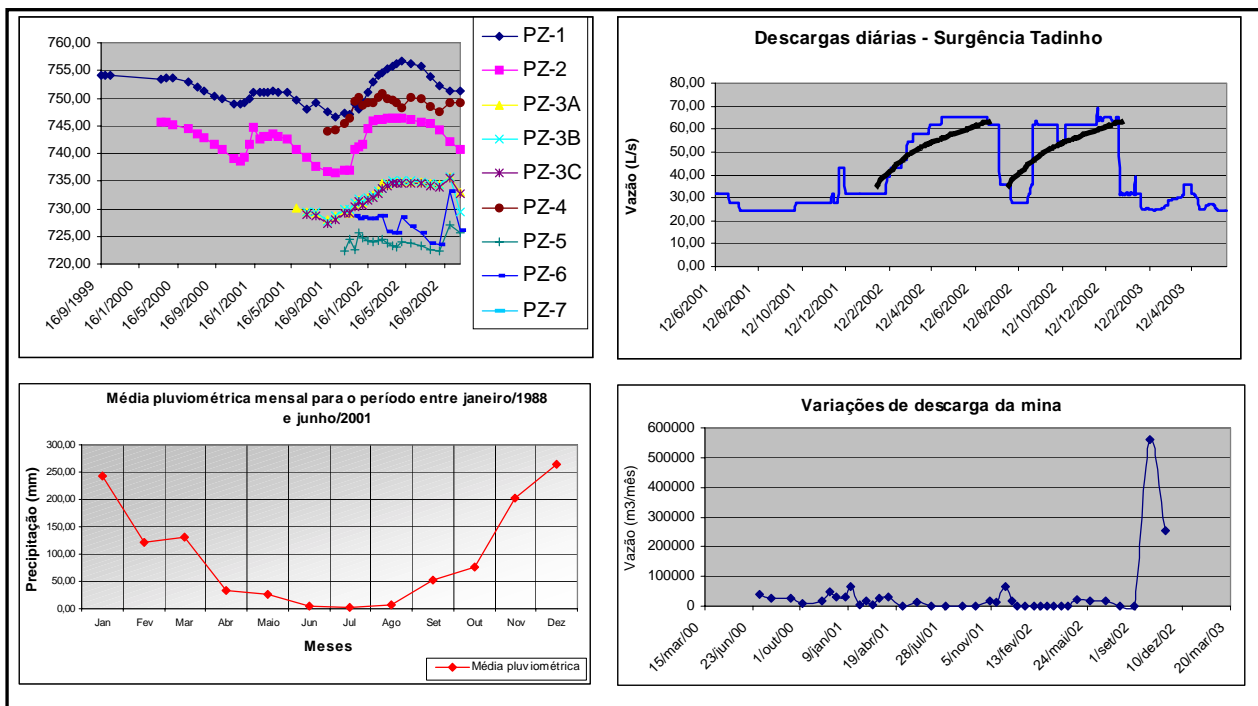


Figura 3 – Gráficos demonstrativos das variações hidrológicas ao longo do tempo

- no conjunto das informações hidrogeológicas resgatadas ao longo do período de monitoramento verifica-se haver situações de ascensão dos níveis relativos aos momentos pós chuvas, coincidentes a um relativo atraso para o processamento da recarga do aquífero. Contudo, essas evidências não são observadas em alguns pontos com muita nitidez, o que poderá suscitar um aprofundamento das investigações em alguns pontos; o que a partir dos poços multi-níveis, após o fechamento do período de observações sazonais, será possível se avaliar face sua posição na zona epicárstica; e,
- as informações de carga hidráulica obtida pelas leituras de nível d'água nos poços de monitoramento refletem, ao longo da área de investigação, uma tendência natural de caminhamento de fluxos subterrâneos em direção à calha de drenagem do ribeirão da Mata, corroborando a proximidade da área da cava à zona de recarga dos aquíferos e o referido curso d'água à zona de descarga dos fluxos subterrâneos regionais.

AGRADECIMENTOS

À empresa SOEICOM – Soc. de Empreendimentos Indústria Comércio e Mineração SA
(Sr. Michel Freitas e funcionários)

Ao CDTN – Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (Sr. Paulo Minardi e equipe)

À empresa ERG Mineração e Comércio Ltda (Sr. José Gualberto e funcionários)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **AULER, A.S. 1994.** *Hydrogeological and Hydrochemical characterization of the Matozinhos - Pedro Leopoldo Karst, Brazil.* 110p. (Msc Thesis, Western Kentucky University).
- [2] **AULER, A.S.1995.** *Lakes as a speleogenetic agent in the karst of Lagoa Santa, Brazil.* Cave and Karst Science, Vol. 21, No 3. Transaction of the British Research Association.
- [3] **BRANCO J.J.R. & COSTA M.T. 1961.** *Roteiro para excursão Belo Horizonte - Brasília.*In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 14, Belo Horizonte,1961.*Anais..* Belo Horizonte, SBG, p.125.
- [4] **CARVALHO, L.T.; FREITAS, J.R.; KOHLER, H.C.; SANTOS, F.M.C. 1977.** *Inventário Geo-ecológico da região de Lagoa Santa - M.G.* FUNDEP/PLANBEL/UFMG – B. Horizonte.
- [5] **COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - CPRM , 1998.** *APA Carste de Lagoa Santa - Meio Físico - Volume 1.* Belo Horizonte, MG.
- [6] **DARDENNE, M.A. 1978.** *Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central.* In: CONG. BRASILEIRO DE GEOLOGIA,30, Recife,1978.*Anais...Recife*,SBG, 2:597-610.
- [7] **DREYBRODT, W., LAUCKNER, J., LIU, Z., SVENSSON, U., BUHMANN, D., 1996.** The kinetics of the reaction $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ as one of the rate-limiting steps for the dissolution of calcite on the system $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CaCO}_3$. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60, 3375-3381.
- [8] **DREYBRODT, W., 1998.** Principles of karst evolution *from initiation* to maturity and their relation to physics and chemistry. In: Yuan, D.X., Liu, Z.H. (Eds.), *Global Karst Correlation*. Science Press, Beijing, pp. 33 – 49.
- [9] **EMBRAPA(2004).** Monitoramento por Satélite. Disponível em: <http://www.cdbrasil.cnpem.br>
- [10] **FORD, D. C.2003.** *Perspectives in karst hydrogeology and cavern genesis.* / Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers 1 (1), 12 pages, re-published from: Palmer, A.N., Palmer, M.V., and Sasowsky, I.D. (eds.), 1999. *Karst Modeling: Special Publication 5*, The Karst Waters Institute, Charles Town, West Virginia (USA), 17-29.
- [11] **GROSSI SAD, J.H. & QUADE, H. 1985.** *Revisão estratigráfica do Grupo Bambuí (Bloco Oriental), em Minas Gerais.*In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS,3,Belo Horizonte, 1985.*Anais...Belo Horizonte*,SBG-MG, p.68-83.
- [12] **TECISAN. 2000.** Relatório Final dos Estudos Hidrogeológicos na area da Mina Lapa Vermelha, Lagoa Santa, MG. Relatório Interno. Belo Horizonte, MG; 72 p.
- [13] **KASTNING E. H. 1999.** *The surface-subsurface interface and the influence of geologic structure in karst.* In: Palmer, A.N., Palmer, M.V., and Sasowsky, I.D. (eds.), *Karst*

Modeling: Special Publication 5, Charles Town, West Virginia (USA): The Karst Waters Institute, 43-47.

- [14] **KAUFMANN G. 2003.** Karst landscape evolution / Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers 1 (3), 10 pages, re-published from: Gabrovšek, F. (Ed.). 2002. Evolution of karst: from prekarst to cessation. Postojna-Ljubljana, Zalozba ZRC, 243-258.
- [15] **KAUFMANN, G. AND BRAUN, J. 2000.** Karst aquifer evolution in fractured, porous rocks. Water Resources Research 36 (6), 1381-1391.
- [16] **KIRALY, L.2003.** Karstification and Groundwater Flow / Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers 1 (3), 26 pages, re-published from: Gabrovšek, F. (Ed.). 2002. Evolution of karst: from prekarst to cessation. Postojna-Ljubljana, Zalozba ZRC, 155-190. Karstification and Groundwater Flow. Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers. Re-published
- [17] **KOHLER, H.C.1978.** *A Evolução Morfogenética da Lagoa Santa - M.G.*In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA,30,Recife,1978.*Anais...* Recife,SBG, p.147-153.
- [18] **KOHLER, H.C.1989.** *Geomorfologia Cárstica na região de Lagoa Santa- M.G.* São Paulo, 113p. Tese de Doutorado, FFLCH-USP.
- [19] **MULL, D.S.; LIEBERMANN, T.D.; SMOOT, J. L.; WOOSLEY JR ,L. H. 1988.** *Application of Dye-Tracing Technics for Determining Solute Transport Characteristics of Groundwater in Karst Terranes.*EPA, p.3-21.
- [20] **PALMER, A. N. 1991.** Origin and Morphology of Limestone Caves.*Geological Society of American Bulletin*,**103**:1-21.
- [21] **PALMER, A.N. 2003.** Speleogenesis in carbonate rocks. Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers 1 (1), 11 pages, re-published from: Gabrovsek, F. (Ed.), 2002. Evolution of karst: from prekarst to cessation. Postojna-Ljubljana: Zalozba ZRC. 43-60.
- [22] **PARIZZI, M.G. 1993.** *A gênese e a dinâmica da Lagoa Santa, com Base em Estudos Palinológicos, Geomorfológicos e Geológicos de sua Bacia.* Dissertação de Mestrado. UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG.
- [23] **PESSOA, P.F.P. 1996.** *Caracterização Hidrogeológica da Região Cárstica de Sete Lagoas, MG: Potencialidades e Riscos.* Dissertação de Mestrado, USP – Universidade de São Paulo,101p.
- [24] **PINTO, C. & MARTINS-NETO, M. A. (ED.). 2001.** *A Bacia Intracratônica do São Francisco: Arcabouço Estrutural e Cenários Evolutivos*, Fernando Flecha Alkimim e Marcelo A. Martins-Neto, in: *Bacia do São Francisco:Geologia e Recursos Naturais.* Belo Horizonte:SBG-MG, Cap.II, pp. 9-30.
- [25] **SILVA, J.C.S. 2003.** *Caracterização Hidrogeológica Ambiental da Área de Influência da Mina Lapa Vermelha, na Região Cárstica de Lagoa Santa, MG.* Dissertação de Mestrado.

Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG.

- [26] **SMART, P. L. & HOBBS, S. L. 1986.** *Characterization of Carbonate Aquifers: A Conceptual Base*. Proceedings of the Environmental Problems in Karst terranes and their solutions Conference. National Water Well Association. Bowling Green, Kentucky.
- [27] **TECISAN, 2000.** Relatório de Final Hidrogeologia da Mina Lapa Vermelha. TECISAN-Técnica de Engenharia Civil e Sanitária Ltda. Relatório Interno / SOEICOM. 51p.
- [28] **TEUTSCH, G. & SAUTER, M. 1991.** *Ground water Modeling in Karst Terranes: scale effects, data acquisition and field validation*. Proceedings of the Third Conference on Hydrogeology, Ecology, Monitoring, and Management of Ground Water in Karst Terranes. Nashville, TN, pp.17-35.
- [29] **WHITE, W. B. 1988.** *Geomorphology and Hydrogeology of Karst Terrains*. Oxford Univ. Press, New York, 464 pp.
- [30] **WHITE, W. B. 2002.** *Karst Hydrology: recent developments and open questions*. Engineering Geology 65, Elsevier, pp. 85-105.
- [31] **WHITE, W.B. 2003.** Conceptual models for karstic aquifers. / *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers 1 (1)*, 6 pages, re-published from: Palmer, A.N., Palmer, M.V., and Sasowsky, I.D. (eds.), 1999. *Karst Modeling: Special Publication 5*, The Karst Waters Institute, Charles Town, West Virginia (USA), 11-16.
- [32] **WORTHINGTON, S.R.H. 2003.** A comprehensive strategy for understanding flow in carbonate aquifers. / *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers 1 (1)*, 8 pages, re-published from: Palmer, A.N., Palmer, M.V., and Sasowsky, I.D. (eds.), 1999. *Karst Modeling: Special Publication 5*, The Karst Waters Institute, Charles Town, West Virginia (USA), 30-37.