

O AQÜÍFERO CAUÊ NA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG: PROCEDIMENTOS DE INVESTIGAÇÃO E ANÁLISE.

Maria Antonieta Alcântara Mourão¹, Celso de Oliveira Loureiro² & Fernando Flecha de Alkmim³

Resumo - As formações ferríferas, hospedeiras do minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero, figuram como um destacado recurso mineral e econômico e como aquífero de grande potencial e de fundamental importância para a manutenção das condições ambientais e para o abastecimento urbano e doméstico. Os dados e estudos existentes demonstram que a caracterização hidrogeológica do aquífero Cauê, associado à unidade geológica que contém as formações ferríferas, carece da compreensão e do conhecimento, de maneira mais global e integrada, dos diversos fatores condicionantes do fluxo e do armazenamento das águas subterrâneas naquele sistema. Considerando a grande complexidade geológica/hidrogeológica da área, um novo projeto de estudo foi concebido e está atualmente em execução, adotando métodos de pesquisa criteriosamente planejados, com o objetivo de elucidar algumas questões importantes relacionadas ao aquífero, como, por exemplo: a variabilidade das propriedades hidrodinâmicas em função da diversidade litológica, textural e petrográfica; as taxas de recarga; o comportamento das unidades limitantes de topo e de base; o papel das estruturas tectônicas; e, o tempo de residência e a origem das águas. Os resultados, ainda preliminares, têm apresentado respostas satisfatórias ao alcance dos objetivos da pesquisa.

Abstract - The banded iron formations, hostesses of the iron ore in the Quadrilátero Ferrífero, appear as one important mineral and economic resource and as an aquifer of great potential and importance for the environmental conditions maintenance and for the urban and domestic water supply. The currently existing studies demonstrate that the hydrogeological characterization of the aquifer Cauê, associated to the geologic unit that contains the iron formations, lacks the global and integrated understanding of the factors that influence the water flow and storage within that system. Considering the great geological/hydrogeological complexity of the area, a new study project was conceived and is currently under way, adopting a carefully planned research methodology, with the objective of investigating some important questions related to the Cauê aquifer, such as: the variability of the hydraulic parameters, as a result of the lithological, textural and petrographic diversity; the recharge rates; the behavior of the top and base stratigraphic units, the role of the tectonic structures; and, the residence time and the origin of the subsurface waters. The preliminary results, obtained so far, seem to be satisfactory for the accomplishment of the research purposes.

Palavras chave: Quadrilátero Ferrífero, Aquífero Cauê, Caracterização Hidrogeológica

¹ M.Sc., Hidrogeóloga da CPRM - Serviço Geológico do Brasil - Doutoranda do Programa de PG em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos-UFMG. Av.Brasil 1731, Funcionários, Belo Horizonte, MG, Brasil, CEP 30.140-002, Tel: (31) 3261-0385; e-mail: antonietta@bh.cprm.gov.br

² Ph.D., Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Escola de Engenharia – Universidade Federal de Minas Gerais, Av. do Contorno 842, 7º andar, Centro, Belo Horizonte, MG, Brasil, CEP 30.110-060, Tel.: (31) 3238-1884, e-mail: celso@desa.ufmg.br.

³ Ph.D., Professor Adjunto do Departamento de Geologia da Escola de Minas – Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Universitário, Bairro Morro do Cruzeiro, Ouro Preto, MG, Brasil, CEP 35.400-000, Tel.: (31) 3599-1605/Ramal 203, e-mail: alkmim@degeo.ufop.br.

1. INTRODUÇÃO

O Quadrilátero Ferrífero é uma região conhecida nacional e internacionalmente pelos recursos minerais, cuja exploração remonta dos tempos coloniais, notadamente do chamado ciclo do ouro, durante o qual se formaram as primeiras nucleações urbanas e do qual ainda se encontram importantes registros arquitetônicos, antropológicos, sociais e até mesmo das primeiras interferências ambientais.

Atualmente, a mineração de ferro tem assumido um papel de extrema relevância social e econômica na região, respondendo por 70% da produção brasileira. O setor exhibe acelerado crescimento, refletido no aumento da produção, na ampliação das áreas de lavra e no investimento tecnológico voltado para o cenário futuro de exploração do minério de mais baixo teor.

A unidade geológica hospedeira dos corpos de minério corresponde à Formação Cauê, constituída por formações ferríferas bandadas, de idade paleoproterozóica (2.0 Ga). Dada a sua maior resistência à erosão e intemperismo, destaca-se no relevo, estando presente nas principais elevações topográficas e delimitando, em parte, a configuração quadrilateral que dá nome à área.

Um dos aspectos notáveis das formações ferríferas bandadas refere-se ao processo de gênese do minério de alto teor. Pesquisas efetuadas não somente no Brasil, mas também em outras províncias ferríferas do mundo apontam que a infiltração de águas meteóricas (MORRIS, 1980) e/ou de remobilização metamórfica (TAYLOR et al., 2001 e WEBB et al., 2003) promoveu, em determinadas porções da unidade geológica, a dissolução da sílica e do carbonato, gerando corpos de hematita compacta (porosidade fissural e alta condutividade hidráulica) e corpos de hematita friável (alta porosidade intersticial e capacidade de armazenamento). Deste processo depreende-se que as formações ferríferas, de porosidade associada principalmente a falhas, fraturas e demais superfícies de descontinuidade (e.g. acamamento), passam a apresentar, localmente, comportamento de aquífero granular (meio poroso) de elevada porosidade e condutividade hidráulica.

O aquífero de maior potencial na área relaciona-se, portanto, à Formação Cauê, sendo conhecido regionalmente como aquífero Cauê. Exibe descargas com vazões que alcançam até 400 m³/h, muitas vezes situadas nas imediações das minas de ferro e responsáveis pela manutenção do escoamento de base de vários cursos d' água. O elevado potencial hidrogeológico é aproveitado para o abastecimento público por meio de captações de nascentes, podendo-se destacar os mananciais de Taboões (vazões de cerca de 493,0 m³/h), Rola Moça (vazões de 302m³/h), Catarina (vazões de 422 m³/h) e Mutuca (Barragem Auxiliar, com vazões de 180m³/h). Poços tubulares profundos são também utilizados, principalmente para o abastecimento de condomínios, com vazões que chegam a 100 m³/h (Condomínio Morro do Chapéu).

Os conflitos de uso pela água começaram a surgir na década de 80, inicialmente pela percepção da comunidade local quanto à possibilidade de interferência nas vazões de nascentes

decorrentes das atividades de rebaixamento do nível d'água nas minerações, procedimento este necessário ao avanço da lavra em profundidade. As legislações ambientais e de recursos hídricos tornaram-se progressivamente mais rigorosas de tal forma que, em praticamente todas as áreas de influência das minas, existem hoje estruturas de monitoramento de caráter preventivo e preventivo (piezômetros e vertedouros), por vezes com séries históricas que ultrapassam 15 anos. Os resultados do monitoramento são empregados na concepção, implementação e calibração de modelos hidrogeológicos computacionais, exigidos para a quantificação dos impactos ambientais e necessários ao planejamento da atividade de desaguamento das minas. Vale ressaltar que cerca de um terço (1/3) da área do Quadrilátero Ferrífero encontra-se inserida na Área de Proteção Sul da Região Metropolitana de Belo Horizonte – APA Sul RMBH.

Ainda que reconhecendo o critério conservador adotado na concepção e implementação dos modelos hidrogeológicos computacionais, verifica-se a existência de várias incertezas nos modelos conceituais geológicos, hidrogeológicos e hidroclimatológicos, as quais são incorporadas como aproximações, generalizações, ou mesmo ajustadas após sucessivas simulações, até que a calibração forneça um erro admissível entre os valores potenciométricos e de vazão d'água observados no campo e simulados pelo modelo. Adicionalmente, falta ao aquífero Cauê um conhecimento mais integrado e de caráter regional, visto que os estudos existentes encontram-se fragmentados e dispersos, restringindo-se às áreas de influência das minas.

Visando estabelecer a caracterização do aquífero Cauê na porção ocidental do Quadrilátero Ferrífero, e tendo como fundamento as considerações acima apresentadas, está em curso um projeto de pesquisa, conduzido no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, com a colaboração do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, e financiamento da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais - FAPEMIG.

O estudo tem como objetivos específicos: 1) identificação das feições geológicas, petrográficas e estruturais que contribuem para o armazenamento e o fluxo da água subterrânea; 2) determinação dos parâmetros hidrodinâmicos, relativos aos principais litotipos que compõem as unidades hidrogeológicas; 3) caracterização hidroquímica, como auxílio no estabelecimento da dinâmica de fluxo subterrâneo e da relação entre as unidades hidrogeológicas; 4) determinação das taxas de recarga em diversos pontos de ocorrência do aquífero Cauê, considerando as heterogeneidades e a presença de coberturas sedimentares; 5) desenvolvimento de um modelo hidrogeológico conceitual, representativo da área de interesse; e, 6) fornecimento de subsídios para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos locais.

O trabalho ora apresentado visa discriminar e detalhar as principais questões que norteiam a pesquisa, bem como os métodos de trabalho adotados para o alcance das diretrizes traçadas, levando-se em conta as especificidades do aquífero associado a formações ferríferas e a complexidade hidrogeológica/geológica da área.

2. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

A área selecionada como alvo do projeto de pesquisa corresponde ao setor centro-norte do sinclinal da Moeda e o segmento central do homoclinal da serra do Curral (Figura 1). A delimitação da área de estudo baseou-se em um conjunto de características incluindo: a representatividade geológica; a grande concentração de minerações de ferro; a existência de estudos e monitoramentos efetuados pelas mineradoras; e, a importância para o abastecimento de Belo Horizonte, refletida na existência de áreas de proteção especial de mananciais. Doze minerações de ferro estão concentradas nesta área, dentre as quais, oito estão promovendo o desaguamento da mina ou deverão iniciar esta atividade em breve.

3. GEOLOGIA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

3.1. Litostratigrafia

O Quadrilátero Ferrífero está situado no segmento meridional do Cráton do São Francisco, que constitui uma entidade geotectônica neoproterozóica formada por rochas arqueanas e paleoproterozóicas, pouco afetadas pelo evento tectonotermal Brasileiro, ocorrido entre 700 a 450Ma (ALKMIM e MARSHAK, 1998). A litostratigrafia do Quadrilátero Ferrífero compreende, em termos gerais, cinco grandes conjuntos de unidades rochosas (ALKMIM e MARSHAK, 1998): 1) o embasamento cristalino arqueano; 2) o Supergrupo Rio das Velhas; 3) o Supergrupo Minas; 4) as rochas intrusivas pós-Minas (pós-paleoproterozóico); e, 5) o Grupo Itacolomi. Estas unidades encontram-se representadas na coluna estratigráfica da Figura 2. Recobrindo as rochas metamórficas, ocorrem os depósitos sedimentares terciários, terciário-quadernários e os produtos do intemperismo representados, particularmente na região, pelas lateritas e cangas.

As unidades inseridas na base e na porção mediana do Supergrupo Minas, especificamente as formações Batatal, Cauê e Gandarela, representam os objetos principais de investigação da pesquisa em desenvolvimento.

A Formação Batatal, topo do Grupo Caraca, consiste predominantemente de filitos, com menor quantidade em metachert, formação ferrífera dolomítica, filitos carbonosos e dolomitos. Dorr (1969) aponta a identificação, em vários pontos do Quadrilátero Ferrífero, de níveis de metachert e revela a possibilidade de serem muito mais comuns do que se imagina. Este autor destaca ainda a

ocorrência de formações ferríferas argilosas no topo da unidade. A espessura varia de poucos metros a até acima de 200 m, sendo mais espessa na Serra da Moeda. O contato com a Formação Cauê é gradacional e varia de um a dois metros (DORR, 1969).

A unidade intermediária do Supergrupo Minas é representada pelo Grupo Itabira que compreende duas formações: a Formação Cauê, inferior, e a Formação Gandarela, superior.

A Formação Cauê é composta de itabirito, itabirito dolomítico, itabirito anfibolítico, com lentes de margas, xistos e filito. O termo itabirito foi definido por Dorr e Barbosa (1963, *apud* DORR, 1969) como “uma formação ferrífera fácies óxido, laminada e metamorfisada, onde as bandas de chert ou de jaspe original foram recristalizados em quartzo granular e o ferro em hematita, magnetita ou martita”. Os itabiritos dolomíticos, como assinalado por Dorr (1969), ocorrem particularmente na porção superior do pacote, evidenciando contato transicional com a Formação Gandarela. A espessura da Formação Cauê é bastante variável, sendo estimados por Dorr (1969) valores entre 200 e 400m para porções pouco deformadas que pode elevar-se para 1000m em áreas mais tectonizadas.

A Formação Gandarela consiste, essencialmente, de margas, filito dolomítico, dolomito ferruginoso, itabirito dolomítico, itabirito e filito. Possui espessura média da ordem de 200 m.

Dentre os materiais de cobertura, deve-se destacar a presença da canga que corresponde a um produto de alteração, de espessura variável de 2 a 10 m, consistindo de fragmentos de formação ferrífera, hematita compacta e minoritariamente outros minerais, cimentados por óxido de ferro hidratado. Seu conteúdo de ferro varia em média de 40 a 60%. Dorr (1969) revela que a porosidade varia de muito baixa a valores acima de 50%. Ocorre recobrimo os topos das serras e as encostas associadas principalmente ao Itabirito Cauê e à Formação Gandarela, mas pode estender-se por vários quilômetros sobre formações não ferruginosas, incluindo o embasamento Cristalino. As cangas podem ser sobrepostas por solo altamente poroso com fragmentos ferruginosos e demais sedimentos terciários e quaternários.

3.2. Arcabouço tectônico

O Quadrilátero Ferrífero é reconhecido como uma região de grande complexidade estrutural fato este que tem conduzido a diferentes interpretações para os arranjos das unidades estratigráficas bem como para a gênese, evolução e distribuição das diversas estruturas.

A geometria do Quadrilátero Ferrífero configura-se como uma estrutura em domos e bacias (ALKMIM E MARSHAK, 1998) em que os domos são representados pelos gnaisses, migmatitos e granitos do embasamento arqueano (Bação, Bonfim, Caeté, Santa Rita, Belo Horizonte, Florestal e Itaúna) e as bacias (ou quilhas) formadas pelos grandes sinclinais (e.g. Moeda, Dom Bosco, Mateus Leme), que contêm rochas dos Supergrupos Rio das Velhas e Minas, e por um homoclinal (Serra do Curral).

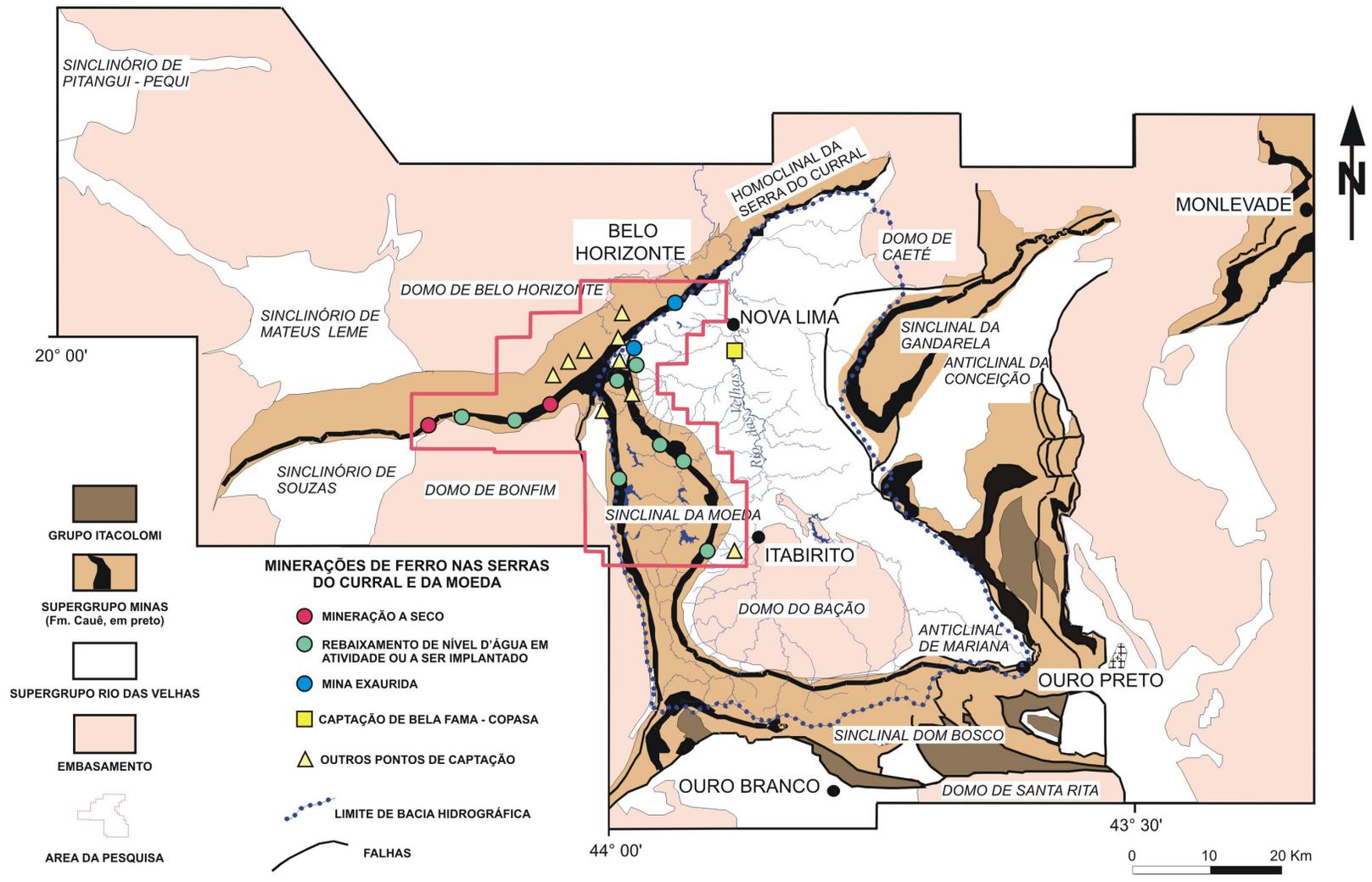


Figura 1 - Mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero (modificado de Alkmim *et. al.*, 1998; *apud* AMORIM E GRANDCHAMP., 2001) e localização da área de pesquisa

Outras estruturas que se destacam na região referem-se a uma série de falhamentos de empurrão com vergência para oeste, de maior expressão no setor oriental, foliação com mergulho para sudeste, lineação de estiramento paralela ao eixo de dobras, dobras com eixo de direção norte e lineação de crenulação de direção N-S. A estruturação principal está relacionada ao evento Transamazônico (2.1 Ga) e a geração dos falhamentos de empurrão com vergência para oeste ao evento compressivo do Brasileiro (0.7 a 0.45 Ga).

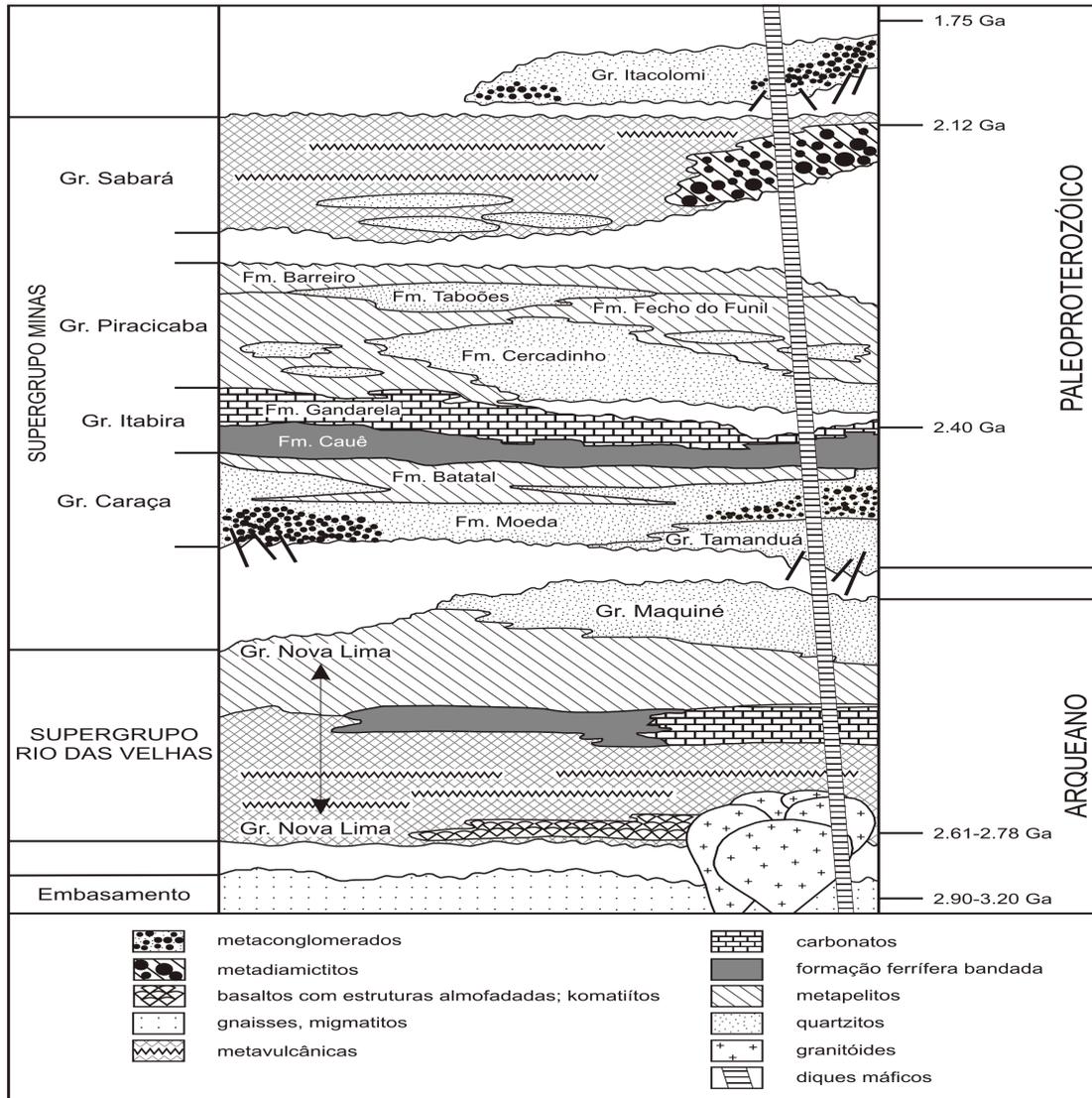


Figura 2 - Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero elaborada por Alkmim e Marshak (1998). A parte direita da coluna representa as relações observadas no setor ocidental do QF, e a parte esquerda, as relações do setor oriental.

O Quadrilátero Ferrífero foi também afetado por soerguimentos epirogenéticos e falhamentos relacionados à tectônica distensional pós-cretácica cujos indícios consistem de (SAADI, 1991 e VARAJÃO, 1991): i) idade eocênica das bacias terciárias Gandarela e Fonseca ii) evidências cinemáticas distensivas encontradas em falhas de empurrão pré-cambrianas; iii) o reentalhamento

da drenagem e o rejuvenescimento do relevo, com fenômenos de captura associados e realce das estruturas através dos relevos invertidos. Entre vários autores há um consenso de que o maciço rochoso correspondeu a uma área de forte soerguimento epirogenético durante o Mesozóico e o Cenozóico.

4. OS PRINCIPAIS ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS DA ÁREA

A grande complexidade geológico-estrutural do Quadrilátero Ferrífero manifesta-se no comportamento pouco uniforme do sistema aquífero Cauê e das unidades hidrogeológicas a ele associadas ou conectadas. As formações ferríferas de porosidade fissural quando compostas principalmente de quartzo e hematita exibem de modo geral condutividade hidráulica de valor significativo, variável entre 0,3 a 1m/dia. As heterogeneidades devem-se à presença de itabiritos dolomíticos, itabiritos argilosos, itabiritos anfíbolíticos que se revelam como níveis d'água suspensos (MDGEO, 2002b) ou a grandes diferenças de nível d'água a distâncias pequenas, sem que se verifique a presença de barreiras hidráulicas (ÁGUA CONSULTORES, 1999, 2001b, 2001c).

As zonas de maior permeabilidade e capacidade de armazenamento relacionam-se aos corpos de minério, de porosidade intersticial (hematita friável) e fissural (hematita maciça). A descarga processa-se em nascentes pontuais, de elevada vazão (de 10 a 50l/s), mas que exibem comportamentos diferenciados quanto à sazonalidade. Fontes no Homoclinal da Serra do Curral apresentam, comumente, picos de vazão em períodos chuvosos (MDGEO, 1999a, 2002a), enquanto aquelas do Sinclinal da Moeda demonstram alto poder de regulação. Dados de Deutério e Oxigênio 18 para amostras coletadas tanto na aba norte quanto sul do Homoclinal, na Serra dos Três Irmãos (MDGEO, 1999a; ÁGUA CONSULTORES, 2001a), corroboram a ocorrência de rápida infiltração em terrenos permeáveis associados aos itabiritos.

O fluxo subterrâneo está bem caracterizado como preferencialmente ao longo da unidade ferrífera com direções influenciadas pela presença de divisores de água e/ou barreiras hidráulicas físicas, sendo que as direções de maior condutividade hidráulica, tanto nas hematitas quanto nos itabiritos intemperizados, são coincidentes com o acamamento, revelando a influência da lixiviação e dissolução diferenciais, dependentes da estrutura e composição das bandas. No entanto, percebe-se que existem algumas discordâncias quanto à direção principal do fluxo, como acontece, por exemplo, nos estudos efetuados para as minas do córrego do Feijão (ÁGUA CONSULTORES, 2001a) e Jangada (MDGEO, 2002b), separadas por uma distância de 2 Km.

É evidente pela análise dos diversos documentos que tratam dos recursos hídricos subterrâneos nessa região a incerteza quanto ao comportamento hidrogeológico da Formação Gandarela composta principalmente por dolomitos. Registros de carstificação são citados tanto no Homoclinal da Serra do Curral quanto no Sinclinal da Moeda, com pontos localizados de maior expressão. É muitas vezes classificada como um aquítarde ou aquíclude, mas nos modelos elaborados para a mina Córrego do Feijão (no Homoclinal; ÁGUA CONSULTORES, 2001a e 2002a) e Pau-Branco (no Sinclinal; ÁGUA CONSULTORES, 1999, 2001b, 2001c) foi tratada como um aquífero de potencial inferior ao Cauê e em conexão hidráulica a este. Para a área adjacente à mina do Capão Xavier, a unidade Gandarela foi considerada por Rubio (1995 e 1996, *apud* Lazarim, 1999) como um aquífero localmente de elevada capacidade de transmissão, equiparável às hematitas. Lazarim (1999) adotou para os dolomitos carstificados nesse mesmo local, condutividades hidráulicas bem superiores às daquelas dos minérios friáveis, ressaltando a existência de conexão hidráulica entre os aquíferos Cauê e Gandarela.

O papel da formação Batatal como aquíclude chega a ser quase um consenso geral, apoiado pelos dados dos conjuntos de piezômetros instalados nas cercanias das minas. Heterogeneidades locais podem gerar porções de maior permeabilidade, como no caso das intercalações de chert e a percolação de águas pelas superfícies de foliação.

As barreiras hidráulicas constituídas pelos diques básicos representam um outro aspecto interessante a ser analisado. Estes diques são encontrados compartimentando o sistema aquífero Cauê em praticamente todas as minas de ferro. Não obstante serem tratados como aquícludes, no modelo de fluxo elaborado para os blocos (compartimentos) delimitados na Faixa Tamanduá-Mutuca (ECOLAB, 2002) alguma drenança é presumida, pois o fluxo principal se dá sempre na direção do córrego de Fechos. Na mina do Pau-Branco, o rebaixamento do nível d'água revelou a não formação de barreira hidráulica pela faixa de rocha básica intrusiva (ÁGUA CONSULTORES, 2001b).

As diferenças pronunciadas nos níveis piezométricos, a curtas distâncias, são interpretadas comumente como indicativas da existência de rochas muito impermeáveis (diques básicos ou filitos) que compartimentariam o aquífero. Interpretação distinta foi dada por Lazarim (1999) que atribuiu a esse aspecto o monitoramento em pontos diferenciados do sistema de fluxo do aquífero refletindo áreas de recarga, marcadas por fluxos descendentes e níveis mais profundos, e áreas de descarga, com fluxos ascendentes e níveis mais rasos. É provável que as duas situações sejam encontradas na área.

A influência das estruturas tectônicas como condutos de água subterrânea e na ruptura de barreiras hidráulicas é, no geral, pouco discutida. Descrevem-se falhamentos transcorrentes e fraturas no homoclinal Serra do Curral (ÁGUA CONSULTORES, 2002a) indicando possibilidade

de conexão hidráulica do sistema aquífero Cauê com os sistemas dolomítico (Gandarela) e quartzítico (Cercadinho). A uma zona de falha localizada junto ao eixo do Sinclinal da Moeda atribui-se a abertura do Platô da Moeda, que se encontrava preservado e fechado após períodos de dissecação, pela implantação do Córrego Capitão da Mata/Rio do Peixe (MEDINA *et. al*, 2005) que constitui o principal ponto de descarga do aquífero Cauê no setor oriental.

As coberturas são invariavelmente referidas como de alta permeabilidade às quais denota-se significativa importância para a recarga dos aquíferos sotopostos, o que é comprovado pelas rápidas oscilações dos níveis piezométricos com as chuvas e pelos estudos isotópicos realizados nas adjacências da mina do Córrego do Feijão (ÁGUA CONSULTORES, 2001a). Para algumas nascentes relacionadas à Fm. Gandarela esses estudos evidenciaram prévia evaporação em terrenos menos permeáveis de depósitos de canga que recobrem as rochas dessa unidade. Verifica-se que os valores de recarga introduzidos nos modelos numéricos exibem grande imprecisão e variam de 100 a cerca de 1790 mm/ano.

Pelo exposto, conclui-se que ainda existem várias questões a serem elucidadas sobre o aquífero Cauê bem como a respeito do comportamento e as relações com as unidades limitantes de topo e base, respectivamente, formações Batatal e Gandarela.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia que vem sendo adotada foi criteriosamente planejada de modo a permitir o avanço do conhecimento da dinâmica de fluxo subterrâneo do aquífero Cauê e o tratamento de questões específicas. A seqüência prevista para as atividades permitiu a condução da pesquisa de forma controlada de tal forma que os resultados de uma etapa orientaram os trabalhos ou estudos da fase seguinte.

5.1. Coleta e Consistência de Dados Básicos.

Compreendeu a criação de um acervo bibliográfico específico, de todos os documentos disponíveis, arquivados em empresas e órgãos que lidam com o assunto tratado. Dada a grande diversificação dos dados, foi efetuada uma análise preliminar para avaliação das informações quanto à qualidade, confiabilidade, relevância e interesse. As atividades subseqüentes foram avaliadas e dimensionadas a partir dos resultados desta etapa que acompanha todo o desenvolvimento do projeto de pesquisa.

Discriminam-se abaixo os dados secundários disponíveis para o desenvolvimento do projeto de pesquisa. Ressalta-se que grande parte desses dados constitui acervo do Projeto Área de Proteção Sul da Região Metropolitana de Belo Horizonte realizado pela CPRM- Companhia de Pesquisa de

Recursos Minerais e SEMAD – Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Estado de Minas Gerais.

- 1) Dados de monitoramento de nível d'água medidos em piezômetros, indicadores de nível d'água e em poços tubulares.
- 2) Dados da rede de monitoramento de vazão operada por mineradoras e pela COPASA.
- 3) Estudo de caracterização climatológica e fluviométrica (DAVIS *et. al.*, 2005a);
- 4) Estudos de caracterização hidrogeológica (BEATO *et. al.*, 2005 e BEATO E BERTACHINI, 2005); Fichas descritivas dos aspectos construtivos dos poços tubulares incluindo planilhas de acompanhamento de testes de bombeamento;
- 5) Estudos do Uso da Terra e Cobertura Vegetal (OLIVEIRA *et. al.*, 2005), Pedologia (SHINZATO e CARVALHO FILHO, 2005), Geomorfologia (MEDINA *et. al.*, 2005) e Uso e Disponibilidade dos Recursos Hídricos (DAVIS *et. al.*, 2005b) e Geologia (SILVA *et. al.*, 2005a).

5.2. Pesquisa Bibliográfica.

Foi efetuada uma análise abrangente dos trabalhos produzidos na área com enfoque para os recursos hídricos (superficiais e subterrâneos) e modelos prognósticos elaborados para procedimentos de rebaixamento de lençol e enchimento de cavas exauridas, bem como ampla pesquisa bibliográfica a respeito de vários temas concernentes à área de estudo, às formações ferríferas e ao minério de ferro, tais como: modelos genéticos; formação dos minérios de alto teor no Quadrilátero Ferrífero; geologia e evolução tectono-estrutural da porção oeste do Quadrilátero Ferrífero; aspectos petrográficos e texturais das formações ferríferas e do minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero.

5.3. Realização de Investigações de Campo.

Foram realizadas várias campanhas de campo visando o reconhecimento dos aspectos litológicos e estruturais das unidades geológicas, e a avaliação dos principais pontos d'água subterrânea. O levantamento de campo contemplou medidas ou estimativas de vazão, a determinação de parâmetros físico-químicos “in loco” (temperatura, condutividade elétrica, Eh e pH) com o uso de aparelhos portáteis de precisão e a coleta de amostras representativas de água para análise físico-química e de rocha para confecção de lâminas petrográficas. Procurou-se avaliar detalhadamente o aspecto geológico-estrutural, as feições do relevo e as formas de ocupação do terreno para cada ponto de descarga visitado. Cerca de 110 pontos d'água foram visitados.

5.4. Caracterização Hidroquímica.

Foi estabelecida, de modo ainda parcial, a caracterização hidroquímica das águas subterrâneas, focada em métodos que permitem avaliar a evolução química e diagnosticar a mistura de águas provenientes de aquíferos distintos. Adicionalmente, procurou-se trabalhar com os parâmetros medidos “in loco” (temperatura, Eh, pH e condutividade elétrica) que mostram uma distribuição relativamente homogênea por toda a área e um número expressivo de dados, em torno de 350. Os resultados analíticos foram importados para o banco de dados no aplicativo Aquachem 3.7 para avaliação, consistência e tratamento. Além da classificação e tratamento das análises com base em diagramas hidroquímicos, efetuou-se procedimento estatístico para estabelecer o grau de similitude entre as amostras de um mesmo aquífero e para aquíferos distintos bem como avaliar a proporção de mistura de águas. O número de amostras disponíveis para o avaliação hidroquímica é de 127, incluindo dados obtidos em demais estudos realizados na área.

5.5. Implantação de Estruturas de Monitoramento de Vazões de Nascentes Complementares à Rede Atualmente Existente.

Julgou-se necessário, em virtude de características determinantes do aquífero ou dada a ausência de informações, a instalação de pontos adicionais de monitoramento de vazões de nascentes cuja observação deverá abranger um período correspondente a pelo menos um ciclo hidrológico completo. Foram implantados 5 pontos de medição operados mensalmente e 2 estações fluviométricas, com um lance de régua e observação diária. O monitoramento foi iniciado em janeiro de 2006.

5.6. Descrição de Testemunhos de Sondagens de Minerações de Ferro.

Objetivando o conhecimento detalhado dos diversos litotipos que compõem as unidades hidrogeológicas de interesse (Fm. Cauê, Fm. Gandarela, Fm. Batatal, Fm. Moeda e diques básicos), foi efetuada a descrição de testemunhos de sondagens de várias minas, distribuídas pela área da pesquisa. As descrições consistiram da análise petrográfica, textural e composicional, bem como da relação e forma de ocorrência dos diversos litotipos. Para que a caracterização pudesse ser mais completa e detalhada trabalhou-se, preferencialmente, com furos recentes e que não haviam sido ainda descritos ou amostrados e, portanto, permaneciam intactos. Os intervalos considerados de maior interesse foram amostrados para execução de testes físicos, confecção de lâminas petrográficas e eventuais análises químicas. Ao todo foram descritos 16 furos de sondagem e que resultaram na coleta de 57 amostras para testes físicos (condutividade hidráulica e porosidade) e análise petrográfica.

5.7. Determinação dos Parâmetros Físicos e Hidrodinâmicos dos Aquíferos.

A determinação dos parâmetros físicos e hidráulicos das unidades hidrogeológicas, abrangendo o aquífero Cauê, as seqüências rochosas limitantes de topo (Fm. Gandarela) e base (Fm. Batatal) e os diques de rocha básica, está sendo efetuada por meio de testes de campo e de laboratório, e interpretação dos testes de bombeamento disponíveis. Os ensaios de campo referem-se ao emprego do permeâmetro de Guelph para obtenção da condutividade hidráulica saturada nas rochas alteradas.

5.7.1. Determinação da condutividade hidráulica e porosidade total em ensaios de laboratório.

O objetivo principal dessa atividade é a determinação da condutividade hidráulica dos diversos litotipos, visto que todas as estimativas existentes baseiam-se em testes de bombeamento e de aquífero que envolvem conjuntamente vários tipos de rochas, não permitindo a avaliação nas direções principais de anisotropia. Após descrição detalhada de testemunhos de sondagens pertencentes a várias minas de ferro, distribuídas pela área da pesquisa, foram selecionadas 30 (trinta) amostras cilíndricas indeformadas, com 15 a 20 cm de comprimento e 3” e 4” de diâmetro, consideradas representativas das variedades litológicas e texturais identificadas, para execução de ensaios físicos em laboratório.

Buscou-se na indústria do petróleo, a técnica de determinação da permeabilidade de um plug de rocha utilizando ar seco ou um determinado gás. Esta prática é baseada na lei da Darcy, ou seja, que a taxa de fluxo é proporcional ao gradiente de pressão e que a constante de permeabilidade de um meio é propriedade intrínseca desse meio, independente do fluido. A partir dos testemunhos foram cortados 2 *plugs* de rocha, de diâmetro máximo de 1 polegada e tamanho de até cerca de 10 cm: um na direção “x”, perpendicular às camadas e outro na direção “y” paralelo às camadas. As amostras mais friáveis foram colocadas em um cilindro de hidrogênio para que se congelassem, antes de serem cortadas, evitando que fossem destruídas.

Os volumes de poros foram determinados com uso do gás Hélio, adotando-se o princípio da Lei de Boyle. A permeabilidade absoluta foi obtida com o uso do gás nitrogênio, no regime permanente, e para uma pressão confinante 800 psi, considerada adequada para profundidades não muito elevadas. Os resultados da permeabilidade ao gás foram corrigidos para o líquido, pelo método de Klinkenberg (1941). Os testes físicos para determinação de condutividade hidráulica e porosidade total foram realizados no laboratório OMNI do Brasil. Para balizar os resultados obtidos foram efetuados estudos petrográficos (micro e macro) dos materiais usados nos ensaios.

5.7.2. Interpretação de testes de produção disponíveis.

Grande parte dos ensaios de bombeamento, realizados tanto pelas empresas de mineração quanto pela companhia de saneamento de Minas Gerais, corresponde a testes de produção em que é feita a extração da água e medidos os tempos e os respectivos níveis no próprio poço sem o monitoramento de um ou mais poços de observação e, posteriormente, é efetuado o acompanhamento da recuperação. Esse procedimento permite que seja obtida somente a transmissividade a partir da interpretação preferencial dos dados referentes à recuperação, pois o aquífero cede água a uma razão constante para o poço, apresentando assim vantagens sobre o rebaixamento, onde o controle em campo da vazão é bem mais difícil. As interpretações já efetuadas por Beato et al. (2005), deverão ser reavaliadas à luz dos novos conhecimentos obtidos na pesquisa.

5.8. Estimativa da Recarga Natural dos Aquíferos.

A determinação da taxa de recarga natural dos aquíferos corresponde a uma atividade para a qual está sendo dado um enfoque especial por ser este um dos parâmetros menos conhecido do aquífero Cauê. Métodos distintos foram programados para obtenção desse parâmetro e os resultados deverão ser tratados de forma conjunta e complementar.

5.8.1. Cálculo da recarga pela oscilação dos níveis piezométricos.

Dispondo-se das variações dos níveis piezométricos em séries históricas de monitoramento será feita a estimativa da taxa de recarga a partir do estabelecimento do balanço hídrico entre períodos de tempos definidos, de modo que (CUSTODIO e LLAMAS, 1983):

$$(l_e T_e i_e - l_s T_s i_s)(t_2 - t_1) = WA(t_2 - t_1) - \int_{t_1}^{t_2} B dt = A \Delta h S \quad (\text{Eq.1})$$

onde:

- T, i e l são respectivamente a transmissividade, o gradiente e a distância entre duas linhas de fluxo para duas porções distintas do aquífero, delimitadas por duas linhas isopiezométricas;
- t₁ e t₂ representam o período de tempo considerado;
- B é o volume bombeando por unidade de tempo;
- A é a área do balanço;
- W é a recarga por unidade de área em altura de água por unidade de tempo;
- Δh é a elevação do nível piezométrico; e,
- S é o coeficiente de armazenamento.

5.8.2. Cálculo da recarga pelo método da separação das hidrógrafas.

O processo de análise da curva de recessão de hidrógrafas, que serão construídas a partir das séries históricas de monitoramento de vazão, permitirá o cálculo da capacidade de armazenamento dos aquíferos, ou seja, do volume de água subterrânea armazenada no aquífero no transcurso de uma recarga, do índice de armazenamento que representa a altura da lâmina d'água referente ao volume acumulado, e do coeficiente de armazenamento que corresponde ao volume de água que uma unidade de volume do aquífero libera do reservatório para o curso d'água sob uma unidade de decréscimo da carga hidráulica.

5.8.3. Determinação da condutividade hidráulica da zona não-saturada.

A determinação em campo do Ksat na zona vadosa é necessária para a caracterização da infiltração da água meteórica e também fundamental na interpretação dos dados referentes às variações piezométricas. Para esse fim, foi empregado o infiltrômetro de Guelph, equipamento desenvolvido para realizar ensaios de campo de permeabilidade de variados tipos de solos por meio de carga constante, em profundidades diversas (até 1m), e de maneira relativamente fácil e rápida. A seleção dos pontos para a execução das medidas, no total de 92, foi feita de modo a abranger os diferentes materiais de cobertura e permitir uma distribuição relativamente homogênea na área. Ressalta-se que a condutividade hidráulica saturada foi obtida também para itabiritos, minérios de ferro, filitos e rochas carbonáticas decompostas a semi-decompostas. Em todos os pontos de ensaio foram coletadas amostras para a execução de análises granulométricas.

5.8.4. Determinação de isótopos ambientais.

As técnicas de determinação de isótopos ambientais podem contribuir decisivamente na determinação do local da recarga e, indiretamente, da taxa de recarga e dessa forma, foram previstas análises de trítio, oxigênio 18, deutério, carbono 13 e carbono 14. O uso desses isótopos propiciará também a avaliação da origem e o tempo de trânsito das águas. Os pontos a serem determinados, em torno de 40, foram escolhidos a partir de uma cuidadosa análise dos dados obtidos nas atividades anteriores.

5.9. Cartas Temáticas e Integração de Dados em Sistema de Informações Geográficas.

Utilizando-se do programa ArcView 8.3 foram elaboradas as cartas temáticas de hidrogeologia e geologia para a área de estudo, associadas a um banco de dados, com base nos arquivos gerados pelo Projeto APA Sul RMBH e incluindo as informações obtidas no presente estudo. A integração das informações georreferenciadas em um SIG permitiu que uma grande quantidade de dados pudesse ser

visualizada, tratada, integrada, consistida e analisada espacialmente, de forma relativamente rápida e interativa.

5.10. Elaboração do Modelo Hidrogeológico Conceitual.

Corresponde ao produto final do trabalho e o que se propõe é a elaboração de modelo hidrogeológico conceitual que reflita a compreensão dos processos condicionantes do fluxo e armazenamento dos sistemas hidrogeológicos, e que contenha a quantificação dos parâmetros característicos dos aquíferos. Os principais aspectos que devem compor o modelo são: a geometria e característica petrográfica, textural e litológica das unidades rochosas; a conformação estrutural das rochas e o papel das superfícies de descontinuidade na dinâmica dos aquíferos; as propriedades hidráulicas e hidroquímicas; a identificação dos padrões gerais de fluxo; e a relação entre as unidades hidroestratigráficas. Deverá ser consistente com os dados obtidos durante o desenvolvimento da pesquisa, servindo como subsídio as simulações numéricas que venham a ser realizadas.

6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS MÉTODOS UTILIZADOS

O fato de se trabalhar em uma área de grande complexidade geológica/estrutural, associado à diversidade litológica das unidades de interesse (formações Cauê, Batatal e Gandarela) e à variabilidade da natureza da porosidade do aquífero ferruginoso, desde fissural a granular com termos intermediários, exigiu uma investigação bastante criteriosa de todos os aspectos que pudessem influenciar ou condicionar o fluxo e o armazenamento de água subterrânea.

A compreensão dos aspectos geológicos adveio da análise dos inúmeros estudos e mapeamentos (e.g. DOOR, 1969; ALKMIM et. al. 1996) existentes na área e da avaliação de campo que envolveu a descrição litológica/petrográfica e textural das rochas e a identificação das estruturas dúcteis e rúpteis, incluindo a relação entre elas, a ordem cronológica de geração e o papel desempenhado na evolução do aquífero. Estudos micropetrográficos também colaboraram para o conhecimento dos aspectos de porosidade, textura e composição mineralógica.

Quanto à hidrogeologia buscou-se também, previamente à etapa de campo, a avaliação dos trabalhos efetuados na área, em especial aqueles realizados no entorno das minas com o propósito de elaboração de modelos computacionais em que se dispunha de maior número de dados abrangendo monitoramento de vazão e de nível d'água, determinação ou estimativa de parâmetros hidráulicos, inferências de direções preferenciais de fluxo e caracterização das unidades hidroestratigráficas. A partir dessas informações foram selecionados os pontos d'água para visita e amostragem. O levantamento de campo compreendeu, além da análise do condicionamento geológico/estrutural, aspectos do relevo (feições do modelado, declividade, posicionamento em relação à vertente etc.), caracterização da forma de exsudação, medidas ou determinação de vazão,

descrição do solo ou material de cobertura, avaliação da cobertura vegetal ou da forma de ocupação do terreno e determinação de parâmetros físico-químicos *in loco*.

As amostras de água coletadas foram analisadas para 48 parâmetros físico-químicos definidos a partir de análises existentes (água e rocha). O tratamento estatístico, ainda preliminar, dado aos parâmetros hidroquímicos, envolvendo além dos procedimentos tradicionais, classificação das águas por diagramas, técnicas um pouco mais avançadas como análise de agrupamentos e estimativa das proporções de mistura entre águas apresentou resultados bastante promissores na identificação de direções preferenciais de fluxo, de conexões hidráulicas entre unidades hidrogeológicas pela mistura de águas e de evolução geoquímica.

As atividades anteriormente descritas foram fundamentais para o conhecimento mais aprofundado a respeito do aquífero Cauê e a identificação das questões e incertezas ainda a serem esclarecidas. A partir dos resultados dessa fase da pesquisa foram programadas as atividades subsequentes.

Buscando caracterizar as tipologias de minérios de ferro, formações ferríferas e demais litologias associadas procedeu-se à descrição criteriosa de testemunhos de sondagem de minerações de ferro por interceptarem uma ampla variedade de tipos rochosos e permitirem a visualização de contatos litológicos, gradações e variações texturais, granulométricas e composicionais. Dessa atividade resultou a identificação de dois tipos principais de minério, cinco tipos de itabiritos e ainda cinco tipos de litologias relacionadas às unidades limitantes do aquífero Cauê. Todo o estudo foi complementado por análises micropetrográficas de amostras selecionadas. Visando a determinação da condutividade hidráulica, porosidade total e densidade das tipologias reconhecidas foram coletadas ainda amostras intactas dos testemunhos para serem submetidas a testes físicos em laboratório.

A técnica de determinação dos vetores de condutividade hidráulica, k_x e k_z , em *plugs* de rocha advém de uma rotina de pesquisa de reservatórios de petróleo e foi aplicada com relativo sucesso em amostras de testemunhos de sondagem. No entanto, praticamente todas as amostras mais friáveis, ou seja, mais decompostas, quebraram-se durante o procedimento de corte de *plugs* e não puderam ser analisadas, em especial aquelas referentes às hematitas e aos itabiritos. Os resultados obtidos foram considerados, desta forma, como valores mínimos para as rochas que constituem os aquíferos de maior potencial na área. Além da obtenção dos valores característicos de condutividade hidráulica, o aspecto que mais se sobressaiu para os minérios de ferro é a existência de forte anisotropia evidenciada por expressiva diferença de condutividade hidráulica entre as direções aproximadamente paralelas e ortogonais ao bandamento/foliação, sendo o vetor K_{xy} até três vezes superior ao vetor K_z , corroborando as observações feitas em escala meso e microscópica.

A questão da recarga foi considerada determinante na pesquisa em face da grande incerteza de seu valor, como verificado na análise de diversos estudos realizados na área. Métodos diversos foram concebidos para a sua estimativa, envolvendo a separação de hidrógrafas, análise da oscilação piezométrica, medidas de condutividade hidráulica nos materiais de cobertura e emprego de isótopos ambientais. Espera-se a obtenção de resultados satisfatórios para os dois primeiros

métodos em virtude do grande número de dados disponíveis e com séries históricas relativamente extensas. Os dados de monitoramento das estações fluviométricas e os pontos de medição instalados deverão igualmente contribuir para a estimativa desse parâmetro.

De caráter inédito para a área de estudo, a avaliação da condutividade hidráulica saturada do solo (K_{sat}) permitirá tecer inferências a respeito da infiltração de água meteórica nas camadas mais superficiais. Foram efetuados testes utilizando permeâmetro de Guelph em 92 pontos selecionados, distribuídos por toda a área e abrangendo tipos diversos de materiais: coberturas detrito-lateríticas, sedimentos terciários e rochas decompostas a semi-decompostas.

O emprego dos isótopos ambientais para determinação de tempo de residência e origem das águas exigiu a reunião e análise dos dados e informações levantadas, a definição das questões que poderiam ser respondidas com o uso da técnica e o próprio conhecimento da aplicabilidade do método.

Atualmente a pesquisa encontra-se na fase de tratamento final e integração de dados visando a elaboração do modelo hidrogeológico conceitual para a área de estudo.

7. CONCLUSÕES

O entendimento do sistema de fluxo subterrâneo em um aquífero complexo e ainda pouco conhecido que, no entanto, interfere diretamente na atividade extrativa de ferro e tem papel relevante no abastecimento público e na manutenção do escoamento de base de cursos d'água na região determinou que fossem planejados e adotados métodos de investigação de forma ordenada e criteriosa, tradicionalmente aplicados na pesquisa hidrogeológica ou trazidos de outras ciências.

Os resultados até o momento obtidos apontam uma resposta satisfatória dos métodos empregados para o alcance do objetivo fundamental da pesquisa, ou seja, a definição de critérios técnicos que conduzam ao aproveitamento racional dos recursos hídricos bem como o planejamento da ocupação territorial e implantação de empreendimentos de naturezas diversas na porção ocidental do Quadrilátero Ferrífero.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais - FAPEMIG pelo apoio financeiro.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁGUA Consultores Associados Ltda. *Monitoramento Hídrico e Avaliações de Possíveis Impactos do Sistema de Rebaixamento dos Níveis de Água na Mina Córrego do Feijão - Brumadinho, MG: Relatório Técnico Final*. Belo Horizonte: FERTECO, 2001a. v.1. Inclui anexos de mapas.

ÁGUA Consultores Associados Ltda. *Relatório Anual de Atividades Realizadas para o Sistema de Rebaixamento de Nível d'água da Mina Córrego do Feijão – Brumadinho, MG*: Processo COPAM 036/77/31/99-LO nº 353. Belo Horizonte: FERTECO, 2002a. v.1. Inclui anexos de mapas.

ÁGUA Consultores Ltda. *Reavaliação do Modelo Hidrogeológico e Previsão de Rebaixamento dos Níveis de Água na Mina do Pau-Branco*: Assessoria e Acompanhamento do Sistema de Rebaixamento. 1º Relatório de Andamento. Outubro de 2001. Belo Horizonte: Vallourec & Mannesmann Tubes, 2001c. 14p. Inclui anexos de mapas, gráficos e dados.

ÁGUA Consultores Ltda. *Reavaliação do Modelo Hidrogeológico e Previsão de Rebaixamento dos Níveis de Água na Mina do Pau-Branco*: 2ª fase: Assessoria e Acompanhamento do Sistema de Rebaixamento. Relatório Final. Junho de 2001. Belo Horizonte: Vallourec & Mannesmann Tubes, 2001b. 28p. Inclui anexos de perfis de poços tubulares, gráficos e mapas.

ÁGUA Consultores Ltda. *Relatório e Plano de Controle Ambiental do Sistema de Rebaixamento do Lençol Freático: Mina Pau-Branco – Brumadinho, MG*. Belo Horizonte: V & M Mineração Ltda, 1999. 2v.

ALKMIM, F.F., Amorim, L.Q.A., Souza, K., Cavalcanti, J.A.D., Freitas, C.A., Lanfranchi, R.A., Oliveira, F.M., Santos, G.J.I. e Barbosa, V.C.. A junção entre o sinclinal da Moeda e o homoclinal da serra do Curral, Quadrilátero Ferrífero, MG. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 39, 1996, Salvador. *Anais...* Salvador: SBG, 1996. v.1, p.337-340.

ALKMIM, F.F. e Marshak, S. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, v. 90, p.29-58, 1998.

BALTAZAR, O.F. e Zuchetti, M. Geologia Estrutural. In: SILVA, S.L. (Org). *Projeto APA Sul RMBH Estudos do Meio Físico*: área de proteção ambiental da região metropolitana de Belo Horizonte. Belo Horizonte: CPRM/SEMAD/CEMIG, 2005.v.1

BEATO, D.A.C., Monsorens, A.L.M. e Bertachini, A. C. Hidrogeologia. In: *Projeto APA Sul RMBH Estudos do Meio Físico*: área de proteção ambiental da região metropolitana de Belo Horizonte. Belo Horizonte: CPRM/SEMAD/CEMIG, 2005.v.9.

BEATO, D.A.C. e Bertachini, A.C. Hidrogeoquímica. In: *Projeto APA Sul RMBH. Estudos do Meio Físico*. Apêndices A, B e C. Belo Horizonte: CPRM/SEMAD/CEMIG, 2005.v.9.

CUSTODIO, E. e Llamas, M. R. *Hidrología Subterránea*. 2.ed. Barcelona: Edic. Omega, 1983. 2v.

DAVIS, E.G., Pinto, E.J.A. e Beato, D.A. Uso e Disponibilidade dos Recursos Hídricos. In: *Projeto APA Sul RMBH Estudos do Meio Físico*: área de proteção ambiental da região metropolitana de Belo Horizonte. Belo Horizonte: CPRM/SEMAD/CEMIG, 2005b. v.10.

DAVIS, E.G., Pinto, E.J.A. e Pinto, M.C.F. Hidrologia. In: *Projeto APA Sul RMBH Estudos do Meio Físico*: área de proteção ambiental da região metropolitana de Belo Horizonte. Belo Horizonte: CPRM/SEMAD/CEMIG, 2005a.v.9.

DORR II, J.V. *Physiographic stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. USGS Professional Paper 614-A, 1969. 110 p.

KLINKENBERG, L.J. The permeability of porous media to liquids and gases. In: API MID YEAR MEETING, 11, 1941, Tulsa, OK. *API Drilling and Production Practice*. 1941. p.200-231.

LAZARIM, H.A. *Caracterização Hidrogeológica no Extremo Norte no Sinclinal da Moeda, Quadrilátero Ferrífero, Nova Lima, MG*. Proposta de Modelo. 115 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Econômica e Aplicada) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1999.

- MDGEO. *Caracterização Hidroquímica da Mina do Pico e do Complexo Tamanduá*: REL-MBR-QUI 001/02. Belo Horizonte: MBR, 2002a. v.1. Inclui anexos de mapas.
- MDGEO. *Parecer Técnico dos Impactos Hidrológicos da Mina de Águas Claras*: REL-MBR-MAC-0001/99. Belo Horizonte: MBR, 1999a. v.1. Inclui anexos de mapas.
- MDGEO. *Relatório de Controle Ambiental e Plano de Controle Ambiental do Rebaixamento do Nível d'água das Minas da Jangada*: REL-MBR-JAN-01/02. Belo Horizonte: MBR, 2002b. v.1.
- MEDINA, A.I.M., Dantas, M.E. e Saadi, A. Geomorfologia. In: *Projeto Apa Sul RMBH Estudos do Meio Físico*: área de proteção ambiental da região metropolitana de Belo Horizonte. Belo Horizonte: CPRM/SEMAD/CEMIG, 2004.v.6.
- MORRIS R.C. A Textural and Mineralogical study of the relationship of iron ore to banded iron-formation in the Hamersley Iron Province of Western Australia. *Econ. Geol.*, 75: 184-209, 1980.
- OLIVEIRA, G.S.R., Jacques, P.D. EShinzato, E. Cobertura e Uso da Terra. In: *Projeto APA Sul RMBH Estudos do Meio Físico*: área de proteção ambiental da região metropolitana de Belo Horizonte. Belo Horizonte: CPRM/SEMAD/CEMIG, 2005.v.3.
- SAADI, A. *Ensaio sobre a morfotectônica de Minas Gerais* (tensões intraplaca, descontinuidades crustais e morfogênese). 1991. 285p. Tese (submetida para obtenção de vaga de Professor Titular). Inst. de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1991.
- SHINZATO, E. e Carvalho Filho, A. Pedologia. In: *Projeto APA Sul RMBH Estudos do Meio Físico*: área de proteção ambiental da região metropolitana de Belo Horizonte. Belo Horizonte: CPRM/SEMAD/CEMIG, 2005.v.5.
- SILVA, S.L.(Org.), Monteiro, E.A. e Baltazar, F. Geologia. In: *Projeto Apa Sul RMBH Estudos do Meio Físico*. Belo Horizonte: CPRM/SEMAD/CEMIG, 2005a. v.1.
- TAYLOR, D., Dalstra, H.J., Harding, A.E., Broadbent, G.C. e Barley, M.E. Genesis of High-Grade hematite orebodies of the Hamersley Provinca, Western Australia. *Econ. Geol.*, 96, 837-873, 2001.
- VARAJÃO, A.F.D.C., Melfi, A.J. e Boulangé, B. Caracterização morfológica, mineralogical e química de fácies estruturais da jazidas de caulinita de Vargem dos Óculos, Quadrilátero Ferrífero, MG. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 20, p.75-82, 1990.
- VARAJÃO, C.A.C. *Estudo Comparativo das Jazidas de Bauxita do Quadrilátero Ferrífero, MG*: Micromorfologia Geoquímica, Geomorfologia e Sensoriamento Remoto. 1988. 213 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Geral e de Aplicação) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1988.
- VARAJÃO, C.A.C. A questão da correlação das superfícies de erosão do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, v.21, n.2, p.138-145, 1991.
- WEBB, A.D., Dickens, G.R. e Oliver, N.H.S. From Banded Iron Formation to iron ore: Geochemical and Mineralogical constraints from across the Hamersley Province, Western Australia. *Chemical Geology*, v. 197, p.215-251, 2003.