

**MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA  
SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E  
TRANSFORMAÇÃO MINERAL**

**CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL**

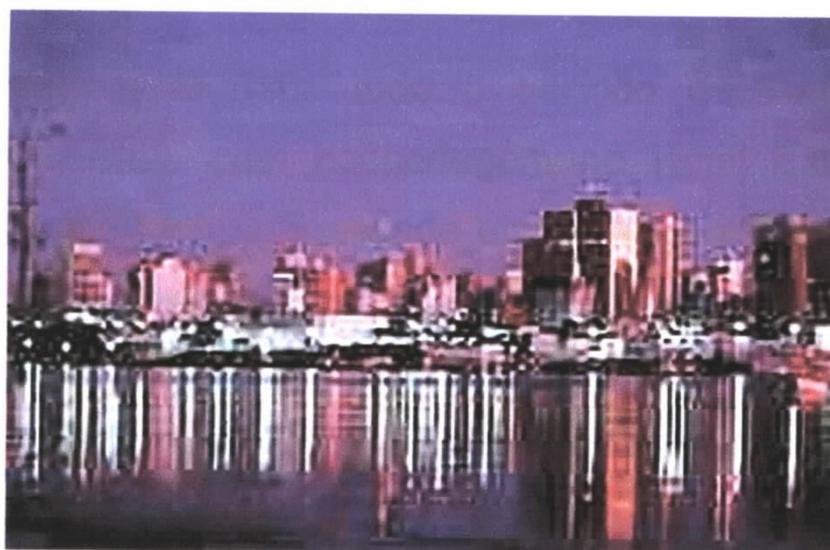


PHL 11694

## **RELATÓRIO DE VIAGEM AO PARAGUAI**

*VIII Congresso Latino Americano de Hidrologia Subterrânea*

**Maria Antonieta Alcântara Mourão**  
Hidrogeóloga  
Superintendência Regional de Belo Horizonte



Baía de Assunção à noite

Novembro de 2006

## **Relatório de Viagem ao Paraguai**

**Introdução** – O presente relatório visa apresentar os resultados da viagem realizada na cidade de Assunção – Paraguai, no período de 25 a 29 de setembro de 2006, para participação de evento latino-americano de hidrogeologia. Este evento congrega a cada dois anos a comunidade hidrogeológica de vários países não só da América Latina, mas também dos Estados Unidos, Canadá e Europa. Dada a sua importância foi selecionado para submissão de artigo referente ao trabalho de pesquisa que vem sendo realizado pela autora como parte de seu doutoramento efetuado dentro do Programa de Capacitação e Treinamento da CPRM - Serviço Geológico do Brasil. A autora do relatório, Maria Antonieta Alcântara Mourão, é hidrogeóloga da Superintendência Regional de Belo Horizonte.

**Objetivos da Viagem** – A viagem teve como objetivo a participação como palestrante no VIII Congresso Latino Americano de Hidrologia Subterrânea promovido pela Asociación Latino Americana de Hidrología .Subterranea para el desarrollo.

**Programa da Viagem** – Durante todo o período da viagem, permaneceu-se em Assunção, sede do evento, com hospedagem no Hotel Excelsior, de categoria três estrelas, que nos ofereceu ótima qualidade em serviços e acomodações. O evento teve lugar em uma grande chácara (Quinta Ykua Satí) estruturada para a realização de encontros, reuniões e congressos. A cidade de Assunção, com cerca de 600.000 habitantes é bastante agradável, arborizada e guarda ainda muitos registros da opulência econômica vivida no passado pelo país.. Não houve dificuldades quanto ao idioma ou às questões relacionadas ao câmbio ou moeda.

**Descrição e análise dos assuntos tratados** - O evento iniciou-se no dia 25 de setembro com uma solenidade de abertura na qual estavam presentes autoridades do Paraguai e de outros países participantes. Conforme a breve exposição dos componentes da mesa, havia uma grande expectativa quanto aos resultados que poderiam advir desse evento no Paraguai visto que se encontrava em fase de discussão o projeto de lei que viria implantar a política de recursos hídricos no país.

A apresentação do trabalho intitulado “**Aspectos litoestruturais e propriedades hidráulicas do aquífero Cauê: subsídios para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos na porção ocidental do Quadrilátero Ferrífero, Minas gerais, Brasil**” (Anexo 1) ocorreu no primeiro dia do evento tendo tido uma boa receptividade do público presente. Após a apresentação do trabalho científico, a participação no evento consistiu em acompanhar as demais apresentações de técnicos de diversos países, selecionando-se principalmente os temas relativos à contaminação de águas subterrâneas, emprego de isótopos ambientais e gestão de recursos hídricos.

Destaca-se também a participação em mesa redonda ocorrida no segundo dia do evento em que se discutiu a elaboração do mapa hidrogeológico para a América do Sul onde representantes dos diversos países foram convidados a expor de forma breve o “estado da arte” das cartas hidrogeológicas de seu país. Como empregada do Serviço Geológico do Brasil mencionei a execução do mapa hidrogeológico do Brasil, em escala 1:1.000.000 e totalmente estruturado em um Sistema de Informações Geográficas, que está sendo realizado pela CPRM. O terceiro dia do evento foi dedicado à apresentação de trabalhos relacionados ao aquífero Guarani, especialmente quanto à integração de dados e elaboração de bases cartográficas bem como às atividades previstas para as próximas fases do projeto. No último dia, como fechamento do evento, foi efetuada uma grande mesa redonda para a discussão das diretrizes que devem ser seguidas no processo de gestão dos recursos hídricos no Paraguai.

**Conclusões** – A interação de profissionais de vários países ligados aos recursos hídricos subterrâneos permitiu:

- o aprimoramento do conhecimento hidrogeológico para a América Latina;
- a discussão e determinação de diretrizes para a gestão dos recursos hídricos no Paraguai;
- a percepção da necessidade de se elaborar um mapa hidrogeológico atualizado para a América Latina e a discussão dos padrões e métodos que deverão ser adotados;
- a apresentação do estado atual de desenvolvimento do projeto Sistema Aquífero Guarani por parte dos países interessados: Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai.

Demais aspectos a serem ressaltados refere-se à excelência, em sua maioria, dos trabalhos apresentados e a expressiva troca e ampliação de conhecimentos técnico-científicos promovida pelos participantes.

**Recomendações:** A participação em congressos internacionais constitui uma excelente oportunidade para a divulgação da pesquisa efetuada, para o estabelecimento de contatos com pesquisadores, para aprimoramento do conhecimento científico e assimilação de novos métodos e tecnologias, aspectos estes que se revertem de forma profícua no desenvolvimento de projetos no país, devendo ser estimulada.

**Agradecimentos:** À FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais pelo apoio financeiro e à CPRM – Serviço Geológico do Brasil pelo suporte dado para o desenvolvimento da pesquisa e liberação para a participação no evento.

**ANEXO 1 – Artigo Apresentado No VIII Congresso Latino Americano de Hidrologia  
Subterrânea**

**ASPECTOS LITOESTRUTURAIS E PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DO AQÜÍFERO  
CAUÊ: SUBSÍDIOS PARA A GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS  
NA PORÇÃO OCIDENTAL DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MINAS GERAIS,  
BRASIL**

Maria Antonieta Alcântara Mourão\*<sup>1</sup>; Celso de Oliveira Loureiro\*<sup>2</sup>; Fernando Flecha Alkmim\*<sup>3</sup>; Orivaldo Ferreira Baltazar\*<sup>4</sup>

\*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: [antonieta@bh.cprm.gov.br](mailto:antonieta@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](mailto: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](mailto:alkmim@degeo.ufop.br).

\*4 – Geólogo da CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Av. Brasil 1731, Bairro Funcionários, Belo Horizonte, MG, Brasil, CEP 30140-002, tel: 31-3261.0359, e-mail: [orivaldo@bh.cprm.gov.br](mailto:orivaldo@bh.cprm.gov.br).

## **Resumo**

O Quadrilátero Ferrífero no Estado de Minas Gerais, região sudeste do Brasil, representa, desde o período colonial, importante referência nacional e internacional como distrito aurífero e ferrífero. Ao lado dos recursos minerais, sobressai um outro recurso, o hídrico, cuja grande disponibilidade conduziu à implantação de sistemas de abastecimento que juntos suprem 51% da demanda de água para a região metropolitana de Belo Horizonte (capital do Estado). Um dos principais sistemas aquíferos da região corresponde à unidade geológica hospedeira dos corpos de minério de ferro, a Formação Cauê do Supergrupo Minas, de idade paleoproterozóica (~ 2,4 Ga) e constituída por formações ferríferas bandadas. A percolação de fluidos nessas rochas, originários da infiltração de águas meteóricas ou de remobilização metamórfica, promoveu, em determinadas porções da unidade ferruginosa, a dissolução de sílica e de carbonato e gerou corpos de hematita compacta (porosidade fissural e alta condutividade hidráulica) e de hematita friável (porosidade intersticial e alta capacidade de armazenamento). Formaram-se, assim, os depósitos de minério de ferro da região e, concomitantemente, o aquífero Cauê. Às ocorrências de minério associam-se a importantes surgências de água subterrânea com vazões que alcançam 400 m<sup>3</sup>/h.

O estudo em desenvolvimento visa caracterizar a dinâmica do sistema de fluxo subterrâneo da unidade aquífera relacionada às formações ferríferas bandadas da Formação Cauê. Consideram-se nesta investigação, além dos atributos intrínsecos da

unidade, a influência exercida pelas rochas adjacentes, pertencentes às formações Batatal (filitos com intercalações de metachert) sotoposta, e Gandarela (dolomitos) sobreposta, bem como intrusivas básicas e materiais inconsolidados de cobertura. A área selecionada como alvo da pesquisa corresponde ao segmento central da Serra do Curral e parte do chamado Platô da Moeda, situados a sul e sudoeste da cidade de Belo Horizonte.

A visita e análise detalhada dos diversos pontos de descarga permitiram concluir que a dissolução e a lixiviação de componentes da Formação Ferrífera Cauê são controladas pela composição mineralógica das bandas e por descontinuidades, representadas por fraturas, clivagens e falhas. Estas estruturas exibem um arranjo geométrico que se repete em praticamente todas as fontes relacionadas ao aquífero Cauê. As fraturas e clivagens, com percolação preferencial de água, ocupam a posição plano-axial de dobras abertas e suaves ou em joelho (*kink-bands*), as quais que se superimpõem a dobras assimétricas e apertadas de geração anterior. Há indícios de que a reativação recente (neotectônica) de fraturas de orientação preferencial NS tenha gerado superfícies preferenciais para o escoamento.

Testes físicos para determinação da permeabilidade intrínseca e porosidade total foram realizados em amostras representativas de diversos litotipos. Os maiores valores de permeabilidade intrínseca (máximo de 933 milidarcy) e de porosidade total (máximo de 35.3%) foram encontrados nas hematitas médias (semi-friáveis) e hematitas compactas laminadas. Nelas, verifica-se acentuada diferença da permeabilidade nas direções aproximadamente paralelas e perpendiculares ao bandamento, sendo os valores para o fluxo ao longo do acamamento 2,5 a 3 vezes superior à da direção ortogonal. Os filitos associados à Formação Batatal demonstraram porosidade e permeabilidade variáveis conforme o grau de alteração, variando desde 29.1% e 711 milidarcy, para termos decompostos, a 11,71% e 9,02 milidarcy, para termos semi-decompostos. Intervalos mais permeáveis na Formação Batatal são representados pelas camadas de metachert de permeabilidade intersticial ou fissural. As rochas básicas foliadas indicaram valores baixos para os parâmetros físicos, comparável aos de aquitardes.

Palavras-chave: Quadrilátero Ferrífero, aquífero Cauê.

## **Abstract**

The region known as the Quadrilátero Ferrífero (Iron Quadrangle), a mining district in the state of Minas Gerais, southeastern Brazil, is famous for its high grade gold and iron ore deposits. The region is also important as water supplier, being responsible for ca. 51% of the water demand of the metropolitan region of Belo Horizonte, the Minas Gerais state's capital.

One of the main aquifer systems of the Quadrilátero Ferrífero (QF) corresponds to the Paleoproterozoic ca. 2.4 Ga old Cauê Formation of Minas Supergroup, which is made up essentially of banded iron formations (BIF). The Cauê Formation is also the host unit of the voluminous supergene iron ore deposits of the QF. Meteoric and probably residual metamorphic waters circulating through the BIF's of the Cauê Formation leached out the silica and carbonate components of the unit, thereby generating compact hematite (fissural porosity and high hydraulic conductivity) and soft hematite (interstitial porosity and high capacity of storage) ore bodies. In general, the ore bodies are associated to springs with outflows of up to 180m<sup>3</sup>/h.

The research project now in progress aims to characterize the dynamics of the Cauê aquifer system, taking in account its own complexities and also the mutual influences of the adjacent rock units, namely, the Batatal Formation (metapelites with metachert horizons) at the base, the Gandarela Formation (dolomites) on the top, as well as mafic intrusives, and unconsolidated cover deposits. The study area, located to south and southwest of Belo Horizonte, comprises the central segment of the Serra do Curral and a substantial portion of the adjacent Moeda plateau.

A detailed field investigation of numerous discharge points of the Cauê aquifer led the conclusion that leaching of the silica and carbonated bands of the iron formation is controlled by the mineralogical composition of the layers involved, and presence of structures such as joints, cleavages and faults. Axial planar cleavage of gentle to open folds and joints are the preferential water percolation paths in the aquifer. There is evidence that the recent (neotectonic) reactivation of Precambrian NS-trending structures has generated the main conducts of the system. Determination of effective permeability and total porosity has been carried through in representative rock samples. The highest values of effective permeability (maximum of 933 milidarcy) and of total porosity (maximum of 35.3%) were founded in soft hematites and laminated hard hematites. A very significant difference of permeability values has been detected between the flow parallel and normal to the banding surfaces. The values for the flow along the banding surfaces

corresponds to 2,5 to 3 times the values for the orthogonal direction. The phyllites of the Batatal Formation exhibit variable porosity and permeability depending on its degree of weathering, i.e., 29.1% and 711 mDarcy for very weathered samples, and 11.71% and 9,02 mDarcy for semi-weathered pieces. The permeable intervals in the Batatal Formation are represented by the layers of metachert. Foliated basic intrusives show in general values for the physical parameters comparable with aquitards.

Key-words: Quadrilátero Ferrífero, Cauê aquifer.

## 1. INTRODUÇÃO

A região do Quadrilátero Ferrífero (QF) representa, desde o período colonial, importante referência nacional e internacional como distrito ferrífero e aurífero. A extração do minério de ferro é atualmente uma das mais importantes atividades sócio-econômicas na região, respondendo por 70% da produção brasileira.

Ao lado dos recursos minerais sobressai um outro recurso, o hídrico, cuja grande disponibilidade conduziu à implantação de sistemas de abastecimento dos quais se destacam aqueles mantidos pela Companhia de Saneamento do Estado de Minas Gerais-COPASA - sistemas Rio das Velhas, Morro Redondo, Catarina e Ibirité - que juntos suprem 51% da demanda de água para a região metropolitana de Belo Horizonte e correspondem a uma captação total de 2.557,6m<sup>3</sup>/h (COPASA, 2004). Em reconhecimento ao papel dos recursos hídricos na manutenção das condições ambientais e no abastecimento público foi criada a Área de Proteção Ambiental Sul da Região Metropolitana de Belo Horizonte que abrange cerca de um terço da superfície do QF.

Tratando-se especificamente dos recursos hídricos subterrâneos, tem-se como principal sistema aquífero a unidade geológica hospedeira dos corpos de minério de ferro, denominada de formação Cauê, de idade paleo-proterozóica (~2.4Ga) e originada pela precipitação química em ambiente sedimentar plataformar de ferro e sílica (e secundariamente carbonato) dando origem às formações ferríferas bandadas. Estas rochas foram submetidas a processos diagenéticos e a dois eventos tectono-metamórficos (Transamazônico – 2,1Ga e Brasileiro – 0.7 a 0.45Ga) que suprimiram a porosidade primária e conduziram à formação de porosidade fissural dada pela presença de falhas, fraturas e clivagens. Dada a sua maior resistência à erosão e intemperismo, destaca-se no relevo, estando presente nas principais elevações topográficas e delineando, em parte, a configuração quadrilateral que dá nome à área.

A percolação de fluidos nessas rochas, originários da infiltração de águas meteóricas (MORRIS, 1980) e/ou de remobilização metamórfica (TAYLOR *et al.* 2001 e WEBB *et al.*, 2003) promoveram, em determinadas porções da unidade geológica, a dissolução da sílica e do carbonato e geraram corpos de hematita compacta (porosidade fissural e alta condutividade hidráulica) e corpos de hematita friável (porosidade intersticial e alta capacidade de armazenamento). De modo geral, às ocorrências de minério associam-se importantes surgências de água subterrânea que podem apresentar vazões superiores a 400m<sup>3</sup>/h.

Os conflitos de uso passaram a surgir com o início dos procedimentos de rebaixamento de nível d'água, necessários ao avanço da lavra para cotas inferiores à superfície piezométrica e que exigem o bombeamento de volume de água superior à recarga.

Várias estruturas de monitoramento preventivo e preditivo têm sido instaladas ao redor das minerações e dos principais mananciais captados, existindo hoje um acervo considerável de dados, com séries históricas que chegam a ser superiores a 10 anos, ou até mesmo a 20 anos. A utilização da modelagem computacional do fluxo d'água subterrânea para o dimensionamento dos impactos causados pelo desaguamento de minas, nos recursos hídricos subterrâneos, tem sido uma prática usual sendo que os dados obtidos nos monitoramentos são empregados nos procedimentos de calibração dos respectivos modelos hidrogeológicos estabelecidos.

Ainda que reconhecendo a concepção conservadora aplicada a esses modelos verifica-se a existência de várias incertezas de cunho geológico, hidrogeológico e hidroclimatológico que são incorporadas como aproximações, generalizações ou mesmo ajustadas após sucessivas simulações até que a calibração forneça um erro admissível entre valores de nível d'água e de vazão observados no campo e simulados pelo modelo.

Posto que o conhecimento hidrogeológico de maior detalhe encontra-se setorizado nas áreas de influências das lavras estabeleceu-se como proposta de pesquisa a integração, consistência e tratamento dos dados existentes – disponibilizados pela CPRM – Serviço Geológico do Brasil, minerações e companhia de saneamento - e execução de estudos complementares que permitam promover um avanço expressivo no conhecimento do comportamento do sistema aquífero relacionado às formações ferríferas bem como a uma estimativa mais consistente das disponibilidades hídricas subterrâneas. Os resultados a serem obtidos deverão servir de apoio e orientação para a gestão dos recursos hídricos na região.

Selecionou-se, portanto, como área de abrangência da pesquisa a porção ocidental da APA Sul RMBH que reúne os mananciais subterrâneos captados para abastecimento público, parte expressiva das minerações de ferro que atualmente estão em processo de rebaixamento de nível e a maioria das estruturas instaladas para o monitoramento dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais (Figura 1).

O presente trabalho visa apresentar os resultados preliminares obtidos no desenvolvimento do estudo que está sendo desenvolvido no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais-DESA/UFMG com a colaboração do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto-DEGEO/UFOP e financiamento da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG.

## **2. GEOLOGIA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO**

### **2.1. Litoestratigrafia**

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. A litoestratigrafia do Quadrilátero Ferrífero compreende, em termos gerais, cinco grandes conjuntos de unidades rochosas (ALKMIM E MARSHAK, 1998): 1) o embasamento cristalino ; 2) o Supergrupo Rio das Velhas; 3) o Supergrupo Minas; 4) as rochas intrusivas pós-Minas (pós-paleoproterozóico); e, 5) o Grupo Itacolomi. Recobrando 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 Caraça, consiste predominantemente de filitos, com menor quantidade em metachert, formação ferrífera dolomítica, filitos carbonosos e dolomitos. 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. Possui espessura 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. Apresenta 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 recobrindo 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.

## **2.2. 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). 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).

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

A grande complexidade geológica/estrutural da área, 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, determinaram que fosse criteriosamente planejada uma seqüência de procedimentos de investigação que permitisse tratar o aquífero Cauê de forma mais integrada e regionalizada bem como focasse questões mais específicas.

As atividades executadas até o momento e que resultaram na caracterização litoestrutural e determinação das propriedades hidráulicas, envolveram: 1) análise, consistência e integração de dados existentes; 2) ampla análise bibliográfica; 3) levantamento de campo; 4) descrição de testemunhos de sondagem e coleta de amostras; 5) realização de testes físicos em laboratório, de amostras selecionadas, para determinação da permeabilidade intrínseca, porosidade e densidade; e 6) estudos petrográficos.

Encontram-se em fase de execução atividades visando a determinação das taxas de recarga, tempo de residência e origem das águas subterrâneas.

### **4. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DA ÁREA**

Na área da pesquisa identificam-se três principais estruturas que condicionam, em seus limites, o fluxo da água subterrânea e podem ser tratados como compartimentos hidrogeológicos distintos, com pouca ou nenhuma conexão hidráulica entre os aquíferos de circulação profunda. Não se conhece a dinâmica de fluxo na junção dos dois principais compartimentos (Homoclinal da Serra do Curral e Sinclinal da Moeda), situação que merece ser mais bem investigada. À exceção deste local, os limites dos compartimentos são marcados por unidades consideradas de baixa permeabilidade (xistos do Grupo Nova Lima, rochas granitóides do complexo Bonfim, filitos da Fm. Batatal e dolomitos da Fm. Gandarela). Esta estruturação regional pode ser visualizada na Figura 1. Ressalta-se que, com o avanço dos estudos será efetuada a subdivisão dos grandes blocos regionais.

- a) Homoclinal Invertido da Serra do Curral. Ocorre ao longo da Serra do Curral e de seus prolongamentos, serras do Rola Moça, Jatobá e Cachimbo, limitando o Platô da Moeda a norte e envolvendo as camadas de metassedimentos do Supergrupo Minas de direção uniforme NE-SW e mergulhos variáveis entre 30° e 85° para SE;
- b) Sinclinal da Moeda. Configura-se como uma dobra regional, assimétrica e vergente para W e SW, que envolve todas as unidades metassedimentares presentes na área.

O flanco oeste possui mergulhos, em geral, moderados, em torno de 35° a 50° para E e NE, enquanto o flanco leste, parcialmente obliterado pela Falha da Mutuca, está invertido exibindo mergulhos altos para E e NE;

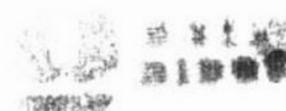
- c) Faixa Tamanduá-Mutuca. Localizada no flanco leste do Sinclinal da Moeda, no trecho compreendido entre a Serra do Curral e a região do Pico de Itabirito. Representada por um conjunto de falhas, das quais se destacam as falhas da Mutuca e Gorduras, que fazem parte de um corredor transpressivo sinistral.

#### **4.1. Compartimento Hidrogeológico Homoclinal da Serra do Curral**

O sistema aquífero Cauê apresenta espessuras em torno de 200 a 400 m sendo constituído na base, por itabiritos permeáveis que encerram os corpos de minério e no topo, por itabiritos dolomíticos e itabiritos de menor permeabilidade (AGUA CONSULTORES, 2002a). Os principais pontos de descarga localizam-se, preferencialmente, na vertente sul da Serra do Curral sendo encontradas algumas nascentes no flanco noroeste, nas proximidades da Serra dos Três Irmãos. Destacam-se as nascentes de Mutuca Auxiliar (Barragem Auxiliar, com vazões de 180m<sup>3</sup>/h), do Córrego da Fazenda (360m<sup>3</sup>/h), Leste (135m<sup>3</sup>/h) e Jequitibá (100m<sup>3</sup>/h).

A unidade sobreposta, representada pela Formação Batatal (seqüência invertida), é formada por filitos, de composição dolomítica quando próximos ao contato com unidade Cauê, considerados como aquícludes ou aquítardes, mas que exibem intercalações de metacherts e formações ferríferas, litótipos de maior capacidade de transmissão de água (AGUA CONSULTORES, 2001a, 2002a). O funcionamento como barreira hidráulica é admitido em função da existência de inúmeras nascentes pontuais de grande porte no contato com a Formação Ferrífera (MDGEO, 2002b) e da grande diferença potenciométrica entre o sistema aquífero Moeda e o sistema Cauê, separados pelos filitos Batatal (GRANDCHAMP, 2003).

A formação Gandarela, unidade que se encontra sotoposta, mostra raras exposições sendo formada por filitos e filitos dolomíticos, e em menor proporção, por formação ferrífera dolomítica e dolomitos. Em virtude dessa variabilidade litológica, são pouco conhecidas as suas características hidrodinâmicas, no entanto, a quase ausência de estruturas cársticas e de nascentes com vazões significativas conduziram à classificação da unidade como aquíclude (AGUA CONSULTORES, 2001a, 2002b; MDGEO, 1999a). Zonas carstificadas são reconhecidas no Instituto Hilton Rocha (poço tubular), captação do Cercadinho da COPASA (poço tubular), Bairro Belvedere (Lagoa Seca – feição cárstica) e mineração Lagoa Seca (surgência artificial).



Diques de rocha básica são identificados cortando toda a seqüência metassedimentar. Diferenças pronunciadas nas cotas piezométricas em setores laterais aos diques indicam comportamento como barreira hidráulica. Na mina da Jangada é citada a ocorrência de um dique básico que funciona como um divisor de água subterrânea (MDGEO, 2002b).

É aventada a possibilidade de conexão hidráulica da Formação Cauê com as Formações Gandarela e Cercadinho, na encosta norte da Serra dos Três Irmãos, por meio de falhas que seccionam transversalmente a estrutura monoclinial (ÁGUA CONSULTORES, 2002a).

Estudos isotópicos realizados em pontos (nascentes e poços tubulares) próximos às minas do Córrego do Feijão e Águas Claras revelam, no geral, tempo de residência variando de 34 a 100 anos e com rápida infiltração no material de cobertura (MDGEO, 1999a; ÁGUA CONSULTORES, 2001a).

#### **4.2. Compartimento Hidrogeológico Sinclinal da Moeda**

O Sinclinal da Moeda, na porção setentrional, tem seu núcleo formado pelas Formações Cauê, Gandarela e aquelas pertencentes aos Grupos Piracicaba e Itacolomi, estando limitado, em seus flancos e em profundidade, pelos filitos de baixa permeabilidade da Formação Batatal, com estrutura em formato de quilha de navio. Esta conformação favorece a acumulação de água subterrânea cujos pontos de descarga estão condicionados às estruturas tectônicas (falhas e fraturamentos) e aos locais de interceptação do nível d'água pelo relevo, em cotas mais baixas (ECOLAB, 2002).

O mapa de superfície potenciométrica elaborado para os aquíferos profundos na região adjacente à mina do Capão Xavier (ECOLAB, 2002) demonstrou não haver relação direta entre a distribuição de níveis de água e a topografia, evidenciando a não coincidência entre os divisores hidrográficos e hidrogeológicos. Adicionalmente, constatou-se a existência de variações abruptas no nível piezométrico, o que foi associado à presença de diques máficos que funcionam como barreiras hidráulicas, compartimentando o aquífero tal como ocorre na mina da Mutuca. 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.

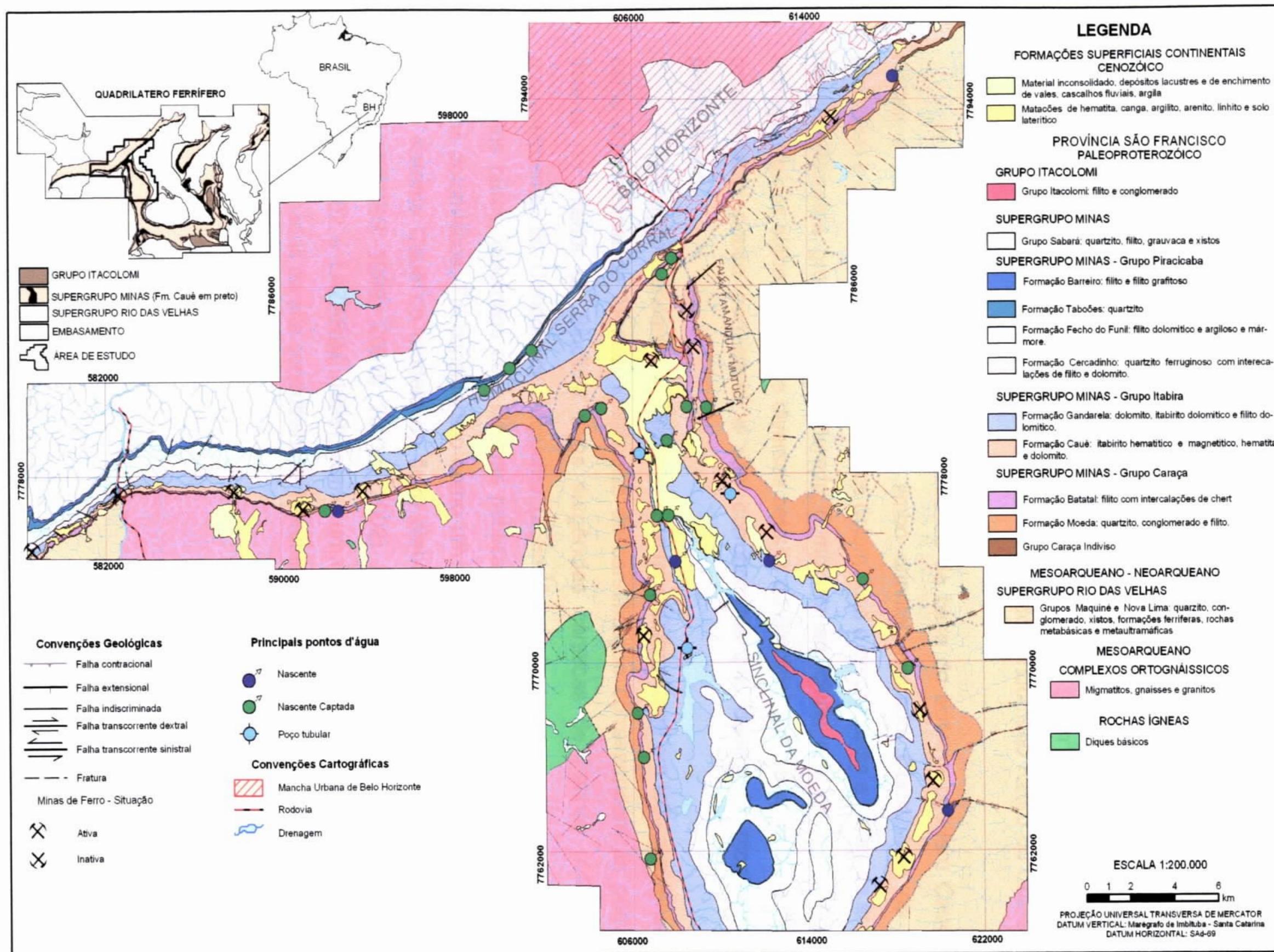


Figura 1 -Mapa geológico simplificado da área de pesquisa (modificado de SILVA e MONTEIRO, 2005 e ALKMIM *et. al.*, 1998; *apud* AMORIM E GRANDCHAMP., 2001).

O Sistema Aquífero Cauê apresenta continuidade desde o interior do Sinclinal da Moeda até o Homoclinal da Serra do Curral não havendo evidências de fluxo subterrâneo entre essas grandes estruturas o que, entretanto não deve ser descartado. É representado no flanco leste por formações ferríferas bandadas argilosas e carbonáticas pouco permeáveis que gradam, em direção ao topo, para um pacote de itabiritos carbonáticos e silicosos, hospedeiros dos corpos de minério de altas permeabilidade e capacidade de armazenamento (ECOLAB, 2002). No flanco oeste, as zonas mineralizadas restringem-se à porção basal (no contato com a Fm. Batatal) da unidade (ÁGUA CONSULTORES, 1999). Identificam-se como pontos principais de descarga na borda leste, as nascentes de Cata Branca ( $135\text{m}^3/\text{h}$ ), de Fechos Auxiliar ( $139\text{m}^3/\text{h}$ ), do rio do Peixe ( $200\text{m}^3/\text{h}$ ), de Trovões ( $200\text{m}^3/\text{h}$ ) e do Angu ( $62\text{m}^3/\text{h}$ ). Na borda oeste, sobressaem as nascentes de Catarina ( $422\text{ m}^3/\text{h}$ ) e do condomínio Retiro do Chalé ( $248\text{ m}^3/\text{h}$ ).

A Formação Batatal constitui a unidade de base do sistema aquífero Cauê no núcleo e flanco leste, e de topo, no limbo oriental invertido. Constitui-se de filitos sericiticos e em menor proporção, de filitos dolomíticos e de camadas e lentes de arenitos de granulometria grossa. É considerada como um aquíclode em todos os modelos hidrogeológicos elaborados para diversos setores do Sinclinal que se apóiam na litologia predominante pouco permeável e são corroborados por dados de monitoramento piezométrico.

A Formação Gandarela sobrepõe o sistema aquífero Cauê em toda a extensão da calha do Sinclinal da Moeda. Evidências de carstificação correspondem às pequenas dolinas no interior do Sinclinal e às surgências cársticas de Fechos ( $440\text{m}^3/\text{h}$ ) e, provavelmente, do Condomínio Miguelão ( $258\text{m}^3/\text{h}$ ). É formada por filitos dolomíticos, dolomitos puros, dolomitos com lâminas pelíticas e hematíticas, brechas dolomíticas e itabiritos dolomíticos. Foi considerado como um sistema aquífero em conexão hidráulica com o sistema Cauê no modelo de fluxo elaborado para a mina Pau-Branco (ÁGUA CONSULTORES 1999, 2001b 2001c, 2002) e no modelo da mina Capão Xavier (ECOLAB, 2002 e LAZARIM, 1999), como uma unidade de baixa permeabilidade com porções localizadas de alta condutividade hidráulica.

### **4.3. Compartimento Hidrogeológico Faixa Tamanduá-Mutuca**

Esta faixa, de direção N-S e mergulho para leste, possui origem tectônica sendo limitada por falhamentos (Mutuca e Gorduras) e caracterizada pela repetição das camadas das formações Batatal e Cauê, em seqüência invertida, ao longo de trecho de cerca de 8 km que se estende da Mina da Mutuca até a Mina do Tamanduá, passando pela Mineração Rio Verde.

O sistema aquífero Cauê encontra-se balizado por rochas pouco permeáveis, tanto a leste por contato tectônico com filitos da Fm. Batatal e xistos do Grupo Nova Lima quanto à oeste por contato estratigráfico com os filitos Batatal. A barreira hidráulica formada pelos filitos é atestada pelo desnível de cerca 120 m entre as cotas dos níveis d'água do núcleo do Sinclinal da Moeda e da Faixa Tamanduá-Mutuca (ECOLAB, 2002).

Diques intrusivos seccionam a Faixa Tamanduá-Mutuca e a subdividem em cinco blocos independentes (ECOLAB, 2002). A descarga natural da Faixa Tamanduá-Mutuca corresponde ao ponto de cruzamento do aquífero com o Córrego dos Fechos. Investigações de campo demonstraram que a descarga nessa faixa ocorre em conduto cárstico (caverna) associado a rocha dolomítica e em fraturamentos e superfícies de descontinuidade (foliação e acamamento) de rocha pelítica sulfetada (provavelmente Formação Batatal) não estando diretamente relacionada à camada itabirítica.

A formação Batatal exhibe espessuras variáveis de 100 a 400 m e ocorre, no limite oriental da faixa, separando os sistemas aquíferos Cauê e Moeda (quartzitos fissurados). Verifica-se na mina Capitão do Mato o comportamento dessa unidade como uma barreira impermeável. No entanto, na mina do Tamanduá duas falhas de rejeito direcional cortam a camada de filito e promovem a conexão hidráulica dos dois sistemas aquíferos (MDGEO, 1999). A formação Gandarela é identificada em mapa somente no bloco mais ao sul da faixa, porém verificou-se em campo a ocorrência de rochas dolomíticas ao longo da faixa.

### **4.4. Os aquíferos de circulação rasa**

Correspondem basicamente aos sedimentos lacustres no platô Moeda; às cangas e aos depósitos superficiais de solo e tálus.

Os depósitos lacustres localizados no núcleo do Sinclinal da Moeda atuam, segundo ECOLAB (2002), como embasamento impermeável para as camadas subjacentes (depósitos de canga) e como camada semi-confinante para os aquíferos subjacentes (itabiritos e dolomitos).

Os depósitos superficiais de solo e tálus mostram distribuição irregular, com matriz argilosa e contendo clastos de composição variada, predominantemente de hematita e itabiritos. Exibem características hidrodinâmicas variáveis, constituindo zonas aquíferas

localizadas, em áreas de depressões de terreno sobre rochas impermeáveis (filitos, xistos e dolomitos) com restituição de águas perenizadas, mas com grande variação sazonal.

As cangas não chegam a constituir aquíferos em virtude da pequena espessura, mas em razão da elevada capacidade de infiltração facilitam a recarga dos aquíferos sotopostos.

## **5. AS ESTRUTURAS TECTÔNICAS E DEMAIS SUPERFÍCIES DE DESCONTINUIDADE**

A influência das estruturas tectônicas como condutos de água subterrânea e na ruptura de barreiras hidráulicas é, no geral, pouco discutida em trabalhos realizados na área. 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.

O maior avanço obtido na análise detalhada em campo dos diversos pontos de descarga refere-se ao entendimento dos processos que condicionam o fluxo nas formações ferríferas. Notou-se que a dissolução e a lixiviação são controladas pela composição mineralógica das bandas e pelas estruturas de descontinuidades representadas por fraturas, clivagens de fraturas e falhas. Os dois fatores em conjunção propiciam a percolação da água e facilitam a atuação dos processos de alteração supergênica.

A dissolução diferencial da rocha determinada pela composição das bandas foi observada tanto nos itabiritos quanto em corpos de hematita compacta laminada manifestando-se como cavidades de dimensões centimétricas a decimétricas. Estudos efetuados na mina de Tamanduá por Zavaglia (1995) demonstram que as bandas com maior concentração em goethita, magnetita e quartzo tendem a se mostrar mais porosas.

Quanto às estruturas de descontinuidade, verificou-se um padrão que se repete na região e foi encontrado em praticamente todas as fontes relacionadas ao aquífero Cauê. As fraturas e clivagens com percolação preferencial de água são plano-axiais de dobramentos abertos e suaves ou em joelho (*kink-bands*) que se sobrepõem a dobras assimétricas e apertadas. Duas famílias de fraturas foram identificadas (Figura 2): 1) clivagens de fraturas ou fraturas com direção em torno de NS e mergulho variável de subhorizontal a vertical associadas a dobras amplas com eixos de mergulho mediano a elevado (50 a 90°); 2) clivagens de fraturas ou fraturas orientadas próximo a EW e também de caimentos variáveis relacionadas a dobras assimétricas com eixos

subhorizontais.

A importância da tectônica recente na geração de planos abertos que propiciem o fluxo de água subterrânea ainda não está bem definida, embora na nascente do Miguelão haja fortes indícios de que a reativação de estruturas pretéritas NS tenha gerado superfície preferencial para o escoamento.

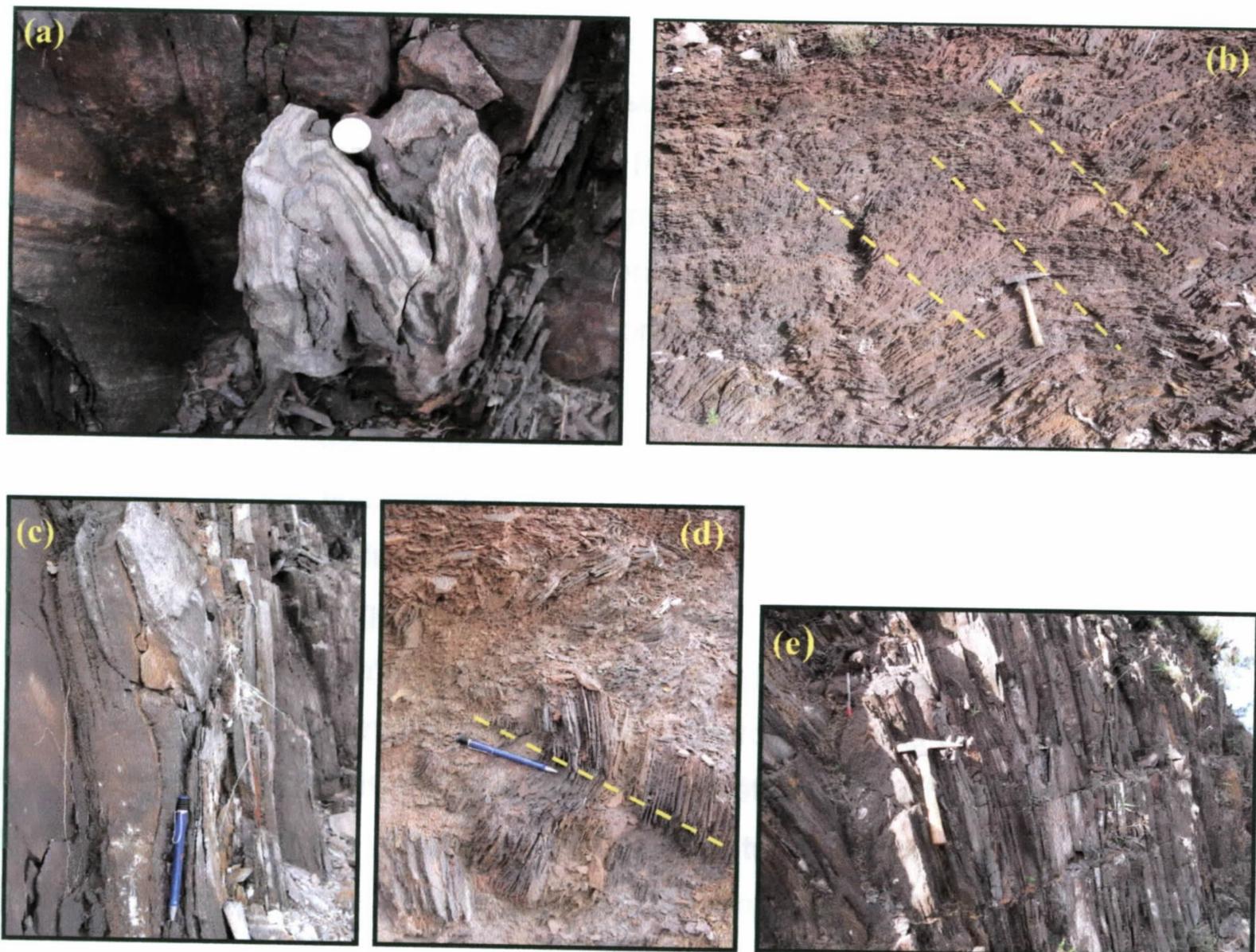


Figura 2 -Estruturas dúcteis e dúcteis-rúpteis identificadas na Serra do Rola Moça, mas de ocorrência generalizada na área da pesquisa. (a) dobras redobradas em laço e intrafoliais à laminação do itabirito – estruturas mais antigas de natureza essencialmente dúctil; (b) dobras amplas em joelho com clivagem espaçada de mergulho médio a alto; (c) dobras amplas com eixos subhorizontais associadas a clivagem espaçada de mergulho baixo a médio (d) e (e).

## 6. CARACTERIZAÇÃO DAS TIPOLOGIAS DOS MINÉRIOS DE FERRO, FORMAÇÕES FERRÍFERAS E DEMAIS LITOLOGIAS ASSOCIADAS

Os principais aspectos observados nas rochas que possibilitam estabelecer inferências quanto à facilidade de percolação e armazenamento da água subterrânea corresponde basicamente à porosidade secundária, intersticial ou fissural, e a conectividade entre os poros.

Os minérios de ferro friáveis são seguramente as rochas de maior porosidade na unidade ferruginosa o que se deve à dissolução e lixiviação dos silicatos e carbonatos. Ainda que esse processo tenha promovido um rearranjo dos grãos pela perda de massa,

a granulometria e forma dos cristais de hematita mantêm os vazios conectados e claramente visíveis na lupa com aumento de 10 vezes, perfazendo até mais de 30% do volume da rocha.

A hematita compacta laminada pode apresentar também porosidade relativamente alta, mas de caráter localizado onde o processo de meteorização afetou preferencialmente as bandas constituídas além da hematita, de magnetita, goethita e quartzo. Conduitos centimétricos podem ser formados, mas normalmente encontram-se isolados pelas bandas não afetadas pelo processo supergênico (essencialmente hematíticas) e a conexão destes depende provavelmente dos fraturamentos.

Porosidade expressiva foi igualmente verificada na hematita compacta maciça. Entretanto, a despeito do tamanho dos poros (diâmetro médio de 0,5 cm), estes não se encontram conectados o que indica uma baixa capacidade de transmissão da água.

Os itabiritos exibem tanto porosidade intersticial quanto fissural, com uma forte relação entre os dois tipos. As fraturas e falhas de espaçamento centimétrico que afetam a rocha facilitam a dissolução das bandas silicatadas e carbonatadas com a geração de vários condutos ao longo de um mesmo nível. Outro aspecto também comum é a alternância de níveis hematíticos endurecidos com níveis quartzosos muito friáveis e de porosidade intersticial elevada. Nesse caso, o meio apresenta-se altamente heterogêneo e anisotrópico com níveis centimétricos a decimétricos de alta condutividade hidráulica bordejados por bandas pouco permeáveis e todo o conjunto é entrecortado por fraturamentos, por vezes de alta densidade. Essas feições foram encontradas desde a superfície até profundidades acima de 200m, entretanto à medida que se aprofunda no pacote ferruginoso vão se tornando mais raras. É preciso ressaltar que não é incomum encontrar, em toda a sucessão litológica, porções extremamente compactas de itabirito.

Os itabiritos dolomíticos, em decorrência de sua composição, representam as rochas em que os processos supergênicos apresentam maior facilidade de atuação o que é demonstrado pelo intenso enriquecimento em ferro verificado nas minas de Capão Xavier e Águas Claras onde constituem o protolito. Nos furos em que foram interceptados apresentam-se muito frescos e compactos, sem sinais aparentes de dissolução, sendo afetados por fraturas e falhamentos de espaçamento centimétrico, muitas vezes preenchidos por venulações de quartzo e calcita.

A Formação Batatal mostra uma expressiva heterogeneidade dada pela presença freqüente dos níveis de chert intercalados aos filitos e que representam intervalos de maior condutividade hidráulica deduzida pela granulometria (areia fina), alta porosidade e baixa compactidade. Os filitos frescos são bastante compactos, no entanto, à medida que

o grau de intemperização aumenta a rocha passa a exibir deslocamento ao longo da foliação.

A avaliação hidrogeológica das rochas básicas intrusivas mostra-se bastante difícil visto que existem quatro gerações de diques que foram afetados distintamente pelos eventos tectônicos, de acordo com a idade da intrusão. Portanto, além da variabilidade composicional, há também a diversidade relativa às estruturas de descontinuidade (foliação e fraturamentos). Além disso, deve-se considerar o grau de intemperismo que provoca mudanças expressivas na rocha. Diques foliados e muito decompostos tendem a apresentar feições de deslocamento como observado nos filitos da Formação Batatal.

## **7. PROPRIEDADES FÍSICAS DAS FORMAÇÕES FERRÍFERAS, MINÉRIOS DE FERRO E DEMAIS LITOLOGIAS ASSOCIADAS**

Amostras representativas dos diversos litotipos que compõem as formações Cauê, Gandarela e Batatal, bem como de diques de rochas básicas, em diferentes graus de intemperismo, foram coletadas durante a descrição de testemunhos de sondagem e submetidas a testes físicos para determinação da permeabilidade intrínseca e porosidade total. Os testes foram efetuados nas direções aproximadamente paralelas e perpendiculares à foliação e ou acamamento.

Praticamente todas as amostras mais friáveis, ou seja, mais decompostas, quebraram-se durante o procedimento de corte de pluques e não puderam ser analisadas, em especial aquelas referentes às hematitas e aos itabiritos. Os resultados obtidos devem ser considerados, portanto, como valores mínimos para as rochas que constituem os aquíferos de maior potencial na área.

Os itabiritos frescos, independentes da composição, apresentam permeabilidade e porosidade muito reduzidas, com médias de 0.08 milidarcy e 1,4%. Distinção significativa destes parâmetros, conforme a direção do teste, foi verificada somente na amostra de itabirito silicoso fresco com resultados mais elevados para a direção paralela ao bandamento. Por outro lado, os itabiritos laterizados e friáveis revelaram valores muito expressivos, variáveis de 261 a 1260 milidarcy e 30,3 a 39,6%, com destaque para o primeiro tipo que exibiu as maiores permeabilidade (1260 milidarcy) e porosidade (39.59%) dentre todo o conjunto de amostras, para a direção específica ao longo do acamamento.

Os maiores valores de permeabilidade intrínseca (máximo de 933 milidarcy) e de porosidade total (máximo de 35.3%) encontrados referem-se às hematitas médias (semi-friáveis) e hematitas compactas laminadas. Verifica-se acentuada diferença da

permeabilidade nas direções aproximadamente paralelas e perpendiculares à laminação sendo aquela ao longo do acamamento de 2,5 a 3 vezes superior à da direção ortogonal.

A única amostra de hematita compacta maciça mostra baixas permeabilidade e porosidade (<0,0001 milidarcy e 3,4%), indiferentes à direção do teste.

Os resultados analíticos indicaram que a amostra de filito decomposto possui porosidade (24,2% – direção XY e 29,1% - direção Z) e permeabilidade (94,9 milidarcy – direção XY e 711,0 milidarcy – direção Z) significativamente mais elevadas que o filito semi-decomposto (11,71% e 9,02 milidarcy), de certa forma semelhantes aos valores das hematitas laminadas e itabirito macio.

As rochas básicas foliadas indicaram valores baixos para os parâmetros físicos, tanto para a amostra fresca (média de 0,0025 milidarcy e 4,5%) quanto semi-decomposta (média de 0,012 e 15,7%), entretanto o segundo tipo mostra permeabilidade e porosidade bem superiores.

## **8. CONCLUSÕES**

O entendimento da dinâmica de fluxo subterrâneo do aquífero Cauê, um aquífero de grande complexidade e importância para a manutenção das condições ambientais e que possui estreita relação com as jazidas de ferro, carece ainda da elucidação de várias questões e incertezas. Os estudos efetuados permitiram um avanço na compreensão do papel das estruturas tectônicas e demais superfícies de descontinuidade no condicionamento do fluxo subterrâneo e evolução do aquífero, na identificação das tipologias principais que formam o aquífero e suas unidades limitantes, bem como na determinação de seus valores mínimos de porosidade intrínseca, porosidade total e densidade.

O fluxo subterrâneo regional encontra-se delimitado em três grandes blocos de origem tectônica: Homoclinal Serra do Curral, Sinclinal da Moeda e Faixa Transpressiva Mutuca-Capitão do Mato. As descargas estão freqüentemente relacionadas ao contato com as rochas menos permeáveis (filitos) da formação Batatal, em pontos de maior dissecação de relevo, e eventualmente condicionadas a falhas ou fraturamentos. Os processos de dissolução/lixiviação das rochas itabiríticas e conseqüente geração e desenvolvimento da porosidade são controlados pela composição mineralógica das bandas e pelas estruturas de descontinuidades representadas por fraturas, clivagens de fraturas e falhas.

As rochas de maiores permeabilidade intrínseca e porosidade total correspondem ao minério friável, seguido de hematitas médias (semi-friáveis), hematitas compactas

laminadas e itabiritos friáveis. Os valores da permeabilidade nas direções aproximadamente paralelas ao acamamento/foliação suplantaram em cerca de 2,5 a 3 vezes àquelas obtidas na direção ortogonal. Os itabiritos frescos, hematitas compactas maciças, filitos frescos da formação Batatal e rochas básicas frescas e semi-intemperizadas exibiram valores para os parâmetros físicos equiparáveis ao de rochas metamórficas não fraturadas. Já os filitos intemperizados mostraram resultados semelhantes aos de hematita laminada e itabirito friável.

## 9. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG pelo apoio financeiro.

## 10. 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: 5º Relatório de Andamento*. Fevereiro de 2002. Belo Horizonte: Vallourec & Mannesmann Tubes, 2002b. 10p. Inclui anexos de gráficos e mapas.
- 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. *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. *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.; 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.
- AMORIM, L. Q.; GRANDCHAMP, C. A. P. *Interferências das Atividades da MBR nos Recursos Hídricos - com ênfase na bacia do Ribeirão dos Macacos*. Belo Horizonte: MBR, 2001. 96p. Relatório Interno.

COPASA. Sistemas de Abastecimento. Disponível em: [http://www.copasa.com.br/Producao\\_de\\_agua/PAGINA/Principal\\_prodagua.htm](http://www.copasa.com.br/Producao_de_agua/PAGINA/Principal_prodagua.htm). Acesso em: 22 out. 2004.

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

ECOLAB. *Relatório Técnico para Outorga de Água. Estudos Hidrológicos e Hidrogeológicos: Projeto Capão Xavier*. REL-MBR-MAC001/01. Belo Horizonte: MBR, 2002. v.1. Inclui anexos de mapas.

GRANDCHAMP, C.A.P. *Estudo da Recuperação do Aquífero Cauê e do Enchimento da Cava da Mina de Águas Claras, Serra do Curral, município de Nova Lima, MG*. 2003. 148f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração, BRANDT Meio Ambiente. *Contribuição do IBRAM para o Zoneamento Ecológico-Econômico e o Planejamento Ambiental de Municípios Integrantes da APA Sul RMBH*. Belo Horizonte:IBRAM/BRANDT Meio Ambiente, 2003.1 CD

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. *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.

MEDINA, A. I. M.; DANTAS, M.; 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, 2005.v.6.

MORRIS, R. C. Iron Ore Genesis and Post-Ore Metasomatism at Mount Tom Price. In: IRON ORE CONFERENCE, 9, 2002, Perth, West Australia: 2002. p.3-12.

SILVA, S.L.; MONTEIRO, C. Mapa Geológico, Blocos Brumadinho, Rio Acima, Acuruí. In: *Projeto APA Sul RMBH*. Estudos do Meio Físico. Apêndices A, B e C. Belo Horizonte: CPRM/SEMAD/CEMIG, 2004.v.1

TAYLOR, D., DALSTRA, H.J., HARDING, A.E., BROADBENT, G.C., BARLEY, M.E. Genesis of High-Grade hematite orebodies of the Hamersley Provinca, Western Australia. *Econ. Geol.*, 96, 837-873, 2001.

WEBB, A. D.; DICKENS, G. R.; 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.

ZAVAGLIA, G. *Condicionantes Geológicas do Comportamento dos Minérios de Ferro do Depósito de Tamanduá (MG) no processo metalúrgico de redução direta*. 1995. 200 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1995.