



XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

AValiação DO FLUXO SUBTERRÂNEO E DESCARGA DE NASCENTES NA SERRA DA MOEDA, MINAS GERAIS

Rafael Cavalcanti de Albuquerque^{1*}; *Danilo Almeida*¹; *Mauro C.C.M. Prado*¹, *Alexandre Frederico de Almeida*²

Resumo – Um estudo hidrogeológico e hidrogeoquímico foi realizado na Serra da Moeda, Minas Gerais. A área de estudo possui um arcabouço hidrogeológico complexo e heterogêneo, sendo caracterizada por uma sequência de unidades metassedimentares dobradas com propriedades hidrodinâmicas distintas. Os principais aquíferos na região são o Cauê e o Gandarela. O estudo envolveu a análise de água de poços e nascentes para hidroquímica e isótopos. Foram obtidas séries históricas de vazão e nível d'água. A avaliação dos resultados obtidos, em conjunto com uma ampla revisão bibliográfica, indicou uma forte correlação entre as vazões das nascentes associadas à Formação Cauê e as variações pluviométricas de longo prazo, bem como uma potencial compartimentação estrutural dos sistemas aquíferos. A combinação da hidrogeologia complexa com uma crescente demanda pelos recursos hídricos subterrâneos apresenta um desafio para a gestão dos aquíferos nesta região.

Palavras-Chave – aquífero, nascente, Itabirito

GROUNDWATER FLOW AND SPRING DISCHARGE ASSESSMENT ON SERRA DA MOEDA, MINAS GERAIS

Abstract – A hydrogeological and hydrochemical study was conducted on Serra da Moeda, Minas Gerais State. The study area is set within a complex and heterogeneous hydrogeology framework and is characterized by a sequence of folded, metasedimentary units with distinct hydraulic properties. The main aquifers in the region are the Cauê and Gandarela. The study included the analysis of groundwater from natural springs and tubular wells for ions and isotopes. Existing data series for spring flows and water levels were also revised. The assessment of the obtained results, combined with an in-depth literature survey, have indicated a strong correlation between the Cauê Formation springs' flows and the long-term precipitation rates, as well as a significant potential for structural aquifer compartmentalization. The combination of a complex hydrogeology with increasing demand for groundwater resources presents a challenge for aquifer management in the region.

Keywords – aquifer, spring, Itabirito.

¹ Water Services Brasil. rafael.albuquerque@waterservices.com.br; danilo.almeida@waterservices.com.br; mauro.prado@waterservices.com.br

² Coca-Cola FEMSA Brasil. alexandre.almeida@kof.com.mx

* Autor Correspondente



XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

INTRODUÇÃO

O objetivo do estudo é caracterizar em detalhe a hidrogeologia de um setor da Serra da Moeda, localizada na parte oeste do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, no extremo oeste do Sinclinal Moeda. A área foco está localizada entre as minas Pau Branco, da Vallourec (ao norte), e Várzea do Lópes, da Gerdau (ao sul), perfazendo 13 quilômetros de extensão ao longo da serra. Não há outras mineradoras em atividade neste setor e, por isso, há relativamente pouca informação quanto à hidrogeologia em comparação a outras áreas do Quadrilátero Ferrífero.

O Sinclinal Moeda abriga empreendimentos imobiliários e industriais, mineradoras e bairros residenciais. Está localizado na bacia do Alto Velhas, sendo uma das áreas de onde é drenada parte expressiva da água aproveitada no abastecimento da região metropolitana de Belo Horizonte. Ademais, existem iniciativas nessa mesma região que visam a ampliação ou a instalação de novas indústrias e condomínios, o que potencialmente aumentará a demanda local por água. Este contexto reforça a necessidade de estudos, como o aqui apresentado, que possibilitem um melhor entendimento acerca do fluxo e da disponibilidade hídrica, em particular a subterrânea, uma vez que um dos fatores fundamentais para o desenvolvimento ordenado do entorno da Serra da Moeda é a quantificação das reservas hídricas.

A Serra da Moeda possui um arcabouço hidrogeológico complexo e heterogêneo, sendo caracterizada por uma sequência de unidades metassedimentares dobradas, as quais possuem propriedades hidrodinâmicas distintas entre si. Dentre estas, destaca-se a Formação Cauê, onde são encontrados os principais corpos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero e que, ao mesmo tempo, se comporta como um aquífero (aquífero Cauê) com elevadas vazões de descarga (acima de 100 m³/h). Adicionalmente, conforme indicado por Mourão (2007), ao longo de toda a Serra da Moeda se observa intenso controle no fluxo de água subterrânea em função de estruturas como falhas, diques e rochas menos permeáveis.

O estudo foi planejado para ser executado em três fases: 1) Estudo inicial, consistindo em levantamento de campo e bibliográfico, cadastramento de nascentes, análises hidroquímica e isotópica de amostras de água, interpretação dos dados, elaboração de um modelo hidrogeológico conceitual e recomendação para atividades complementares; 2) Execução das atividades recomendadas na Fase 1, incluindo ensaios de bombeamento com múltiplos poços de observação, mapeamento estrutural detalhado, monitoramento hidrogeoquímico e hidrogeológico; e 3) Atualização do modelo hidrogeológico conceitual com base nos dados coletados na Fase 2 e elaboração de modelo numérico de fluxo para simulação de cenários.

Até o envio do presente resumo (maio de 2017), a Fase 1 do estudo já havia sido concluída, ao passo que as atividades da Fase 2 estavam sendo iniciadas. Desta forma, os resultados e discussão apresentados se referem à primeira fase dos trabalhos.

CONTEXTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

A geologia do Quadrilátero Ferrífero foi descrita em detalhe em trabalhos como Dorr (1969) e Rosière e Chemale Jr. (2000), enquanto a tese de doutorado de Mourão (2007) inclui

XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS
26 de novembro a 01 de dezembro de 2017
Florianópolis- SC

extensa descrição das unidades hidroestratigráficas do Sinclinal Moeda. Um resumo das unidades geológicas de maior interesse para o estudo é apresentado a seguir. Na Figura 1 é apresentado um mapa geológico da área de estudo e os pontos de amostragem considerados.

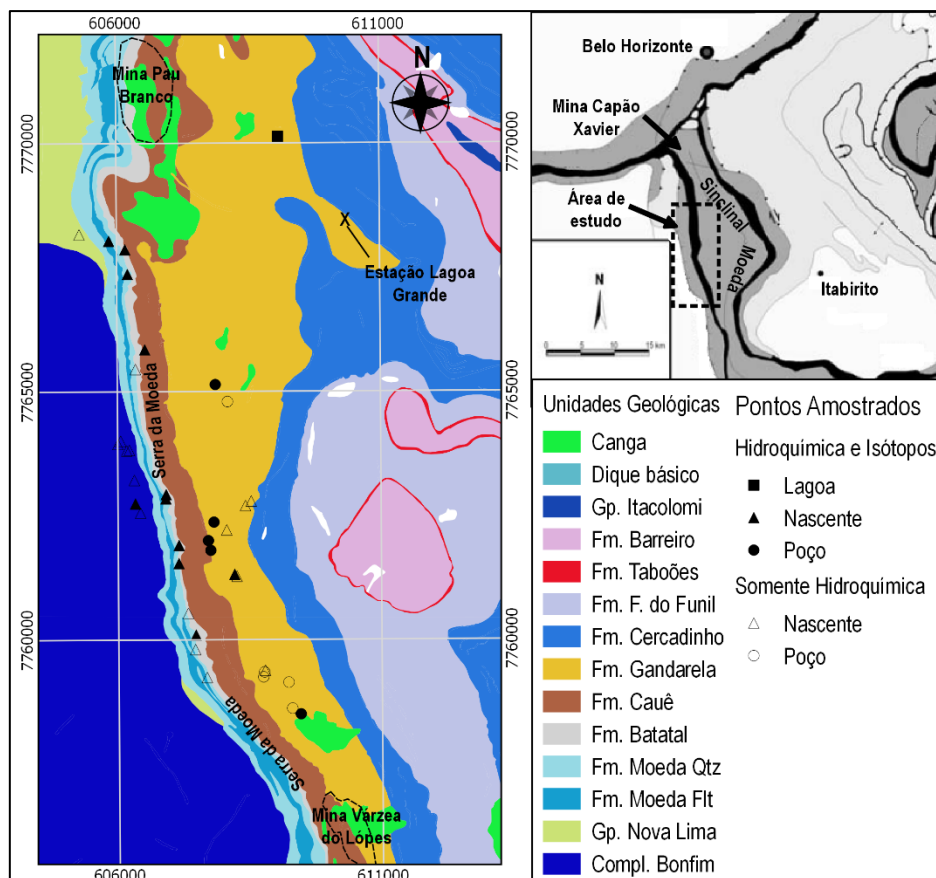


Figura 1 – Mapa geológico da área de estudo (simplificado de Baltazar et al., 2005) indicando os pontos de amostragem de água do presente estudo e outros pontos mencionados no texto

A oeste da Serra da Moeda afloram rochas de idade arqueana de baixa permeabilidade: unidades Complexo Bonfim (gnaisse granítico) e Grupo Nova Lima (xistos). As nascentes identificadas em campo nesta área estão associadas ao colúvio depositado na base oeste da serra sobre as rochas arqueanas, os quais formam aquíferos inconsolidados localizados.

O Sinclinal Moeda se sobrepõe às rochas arqueanas, sendo formado principalmente por rochas metasedimentares clásticas e químicas, de idade paleoproterozóica, que compõem o Supergrupo Minas. Toda a sequência metasedimentar na Serra da Moeda está orientada predominantemente no sentido norte-sul, mergulhando aproximadamente 60 graus para leste.

Na base desta sequência está a Formação (Fm.) Moeda, a qual aflora ao longo da vertente oeste da Serra da Moeda e consiste em uma intercalação de quartzitos e filitos. Os quartzitos



XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

se comportam como aquíferos, no entanto os pontos de descarga (nascentes) destes possuem vazões baixas, inferiores a 5 m³/h. Sobreposta à Fm. Moeda, ainda na escarpa oeste da Serra da Moeda, aflora a Fm. Batatal, constituída predominantemente por filitos. Por possuir condutividade hidráulica muito baixa, a mesma é considerada um aquíclode, atuando como uma barreira de fluxo subterrâneo que delimita a extensão do aquífero Cauê a oeste.

A Fm. Cauê se sobrepõe à Fm. Batatal e aflora por parte do lado oeste e por todo o lado leste da Serra da Moeda. Esta unidade é constituída principalmente por itabiritos e hematitas, sendo o principal aquífero da área de estudo. Dorr (1969) estabelece três tipos composicionais para os itabiritos da Fm. Cauê: silicosos, dolomíticos e anfíbolíticos. Também são definidas subdivisões internas à Fm. Cauê em decorrência de propriedades físicas, como textura e porosidade. A exemplo disto, os itabiritos e hematitas são classificados como friáveis, médios ou compactos, os quais possuem distintas propriedades hidrodinâmicas (Mourão, 2007).

A Fm. Gandarela aflora no interior do Sinclinal Moeda, sobrepondo-se à Fm. Cauê, sendo composta por dolomitos, mármore, filitos e itabiritos dolomíticos. Estas rochas são frequentemente sobrepostas por material intemperizado argiloso. O contato entre as formações Gandarela e Cauê é gradativo, não havendo em geral uma nítida separação entre elas. Do ponto de vista hidrogeológico, a Fm. Gandarela é uma unidade heterogênea, por se comportar como um aquífero, nas intercalações com itabiritos e nas áreas de ocorrências de fraturas e cavidades nas rochas dolomíticas, e como um aquítarde em sua porção intemperizada. A Fm. Gandarela é limitada a leste pelo contato com as rochas do Grupo Piracicaba. Estas afloram na porção central do Sinclinal Moeda, já fora da área do presente estudo.

Diques máficos seccionam todas as unidades geológicas do Supergrupo Minas. Diques seccionando a Fm. Cauê são encontrados em cavas de minas de ferro, expostos à superfície.

METODOLOGIA

A metodologia adotada envolveu um levantamento de campo realizado entre os meses de julho e setembro (período seco) de 2016. Este incluiu um inventário de nascentes e demais pontos de interesse hidrogeológico (como poços, lagoas e drenagens) nos dois lados da Serra da Moeda. Cada nascente levantada foi associada a uma unidade litológica/hidroestratigráfica, tendo sido feitas medições de vazão e dos parâmetros pH, condutividade elétrica e temperatura.

Em 38 pontos (Figura 1) foram coletadas amostras de água para análise de parâmetros hidroquímicos (cátions, ânions e metais) no laboratório Mériex NutriSciences/Bioagri em Belo Horizonte. Em 17 desses pontos foram coletadas amostras para análise dos seguintes isótopos da água: oxigênio-18, deutério, trítio, carbono-13 e carbono-14. Estes foram analisados no laboratório EILAB da University of Waterloo, no Canadá.

Foram compilados dados existentes, obtidos na literatura científica, e dados de monitoramento coletados pelos seguintes empreendimentos: Fábrica da Coca-Cola FEMSA, minas Várzea do Lopes, Pau Branco e Capão Xavier (localizada a norte da área enfocada no estudo), Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Itabirito (SAAE-Itabirito) e condomínios



XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS
26 de novembro a 01 de dezembro de 2017
Florianópolis- SC

residenciais. Foram considerados dados de precipitação obtidos da estação Lagoa Grande, operada pela Agência Nacional de Águas (ANA), cuja série histórica se inicia em 1941.

PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS

Valores para os parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos de interesse foram obtidos principalmente pela interpretação de ensaios de bombeamento realizados anteriormente na área de estudo pela empresa Hidropoços. Os resultados obtidos para o aquífero Cauê são consistentes com observações feitas em outras áreas do Quadrilátero Ferrífero (Mourão, 2007). Os poços analisados apresentam vazões superiores a 160 m³/h e capacidade específica (Q/s) variando entre 5,8 m³/h/m e 12,0 m³/h/m. A interpretação destes ensaios também mostra valores elevados de condutividade hidráulica, entre 1,2 x 10⁻⁵ m/s e 3,5 x 10⁻⁵ m/s. Outros ensaios realizados em poços próximos, porém completados na Fm. Gandarela, resultaram em vazões que variam entre 21 m³/h e 128 m³/h, com capacidade específica entre 0,2 m³/h/m a 2,2 m³/h/m e condutividade hidráulica entre 1,6 x 10⁻⁷ m/s e 1,7 x 10⁻⁵.

Esses resultados indicam a relevância dessas formações como fonte potencial de abastecimento de água para áreas residenciais e empreendimentos próximos à Serra da Moeda.

NASCENTES

Dentre as 36 nascentes levantadas, aquelas associadas à Fm. Cauê (seis nascentes) foram as que apresentaram vazões mais elevadas, entre 4,6 m³/h e 191,2 m³/h. Estas nascentes estão posicionadas no lado oeste da Serra da Moeda, próximas ao contato com a Fm. Batatal. Isto indica que a Fm. Batatal, ao se comportar como uma barreira de fluxo subterrâneo, propicia a descarga da água subterrânea oriunda do aquífero Cauê (Mourão, 2007). As demais nascentes levantadas na porção oeste da serra possuem vazões baixas, inferiores a 3,0 m³/h, o que mostra que as descargas do colúvio e das formações Moeda e Batatal são bem menos relevantes.

Das nascentes identificadas a leste da serra, apenas uma nascente, levantada na área de afloramento da Fm. Gandarela apresentou vazão significativa, de 25 m³/h. Com base nos resultados de isótopos, discutidos adiante, foi possível estabelecer que se trata na realidade de um ponto de descarga do aquífero Cauê na área de ocorrência da Fm. Gandarela, o que demonstra a interconexão do fluxo subterrâneo entre essas duas unidades.

Os dados de monitoramento de vazão das nascentes e cursos d'água obtidos dos empreendimentos permitiram avaliar o comportamento temporal das descargas da Fm. Cauê e demais unidades. Como exemplo, na Figura 2 é apresentado um gráfico comparando dados de vazão monitorados pela VALE desde a década de 1990, no entorno da Mina Capão Xavier, em dois pontos representativos: o vertedouro VTD03/94 que monitora a vazão de drenagens associadas à Fm. Moeda e ao Grupo Nova Lima (com contribuições de escoamento superficial); e o vertedouro VTD-04/94, que monitora um ponto de descarga da Fm. Cauê no extremo norte da Serra da Moeda.

XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

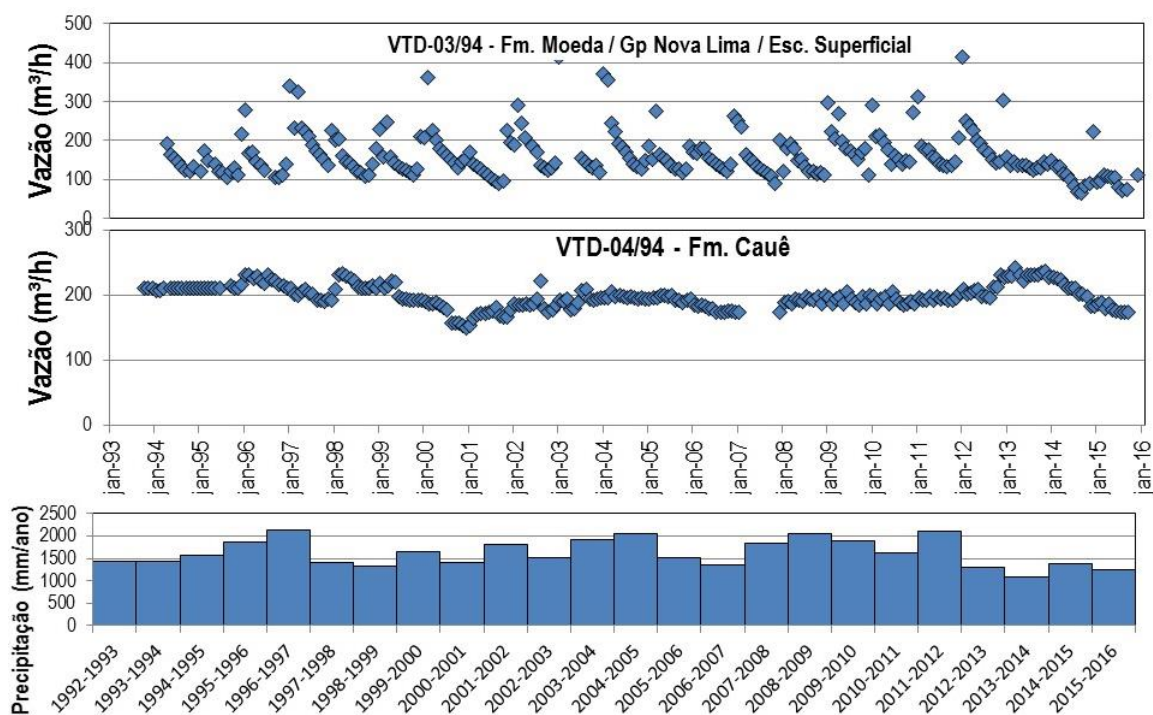


Figura 2 – Dados de monitoramento de vazão em pontos próximos à mina Capão Xavier (dados de Vale, 2016)

A Figura 2 ilustra que: a) As vazões das nascentes não associadas à Fm. Cauê (ex. ponto VTD03/94), apresentam oscilações expressivas devido à sazonalidade climática; e b) Em contraste, a ausência deste comportamento nos pontos de descarga do aquífero Cauê (ex. ponto VTD-04/94) demonstra pouca sensibilidade à precipitação recente. Observa-se também que as vazões neste ponto apresentam correlação principalmente com a ocorrência de anos seguidos de baixa ou elevada precipitação, refletindo o elevado armazenamento do aquífero Cauê.

Outro aspecto relevante observado em relação ao aquífero Cauê diz respeito aos valores calculados para o coeficiente de deflúvio em diferentes pontos de descarga desta unidade, todos os quais resultaram superiores a 100%. Isso indica que a área de contribuição das nascentes não coincide com as áreas de contribuição em superfície (sub-bacias hidrográficas), o que por sua vez sugere um forte controle estrutural no sistema de fluxo subterrâneo nesta formação.

HIDROGEOQUÍMICA E ISÓTOPOS

Os resultados hidroquímicos obtidos revelam baixa salinidade da água subterrânea em todas as unidades amostradas (condutividade elétrica inferior à 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e sólidos dissolvidos totais inferior à 100 mg/L), o que se dá em função da pouca reatividade dos minerais predominantes no meio. Ao mesmo tempo, os resultados obtidos para as nascentes da Fm. Cauê apresentam forte correlação entre bicarbonato (HCO_3), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), indicando

XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

controle do mineral dolomita nas concentrações da água nestes pontos (Figura 3). Estes resultados são consistentes com observações feitas por Rosière e Chemale Jr. (2000), que descrevem a presença de material dolomítico no contato das formações Cauê e Batatal, justamente onde estão posicionadas as nascentes.

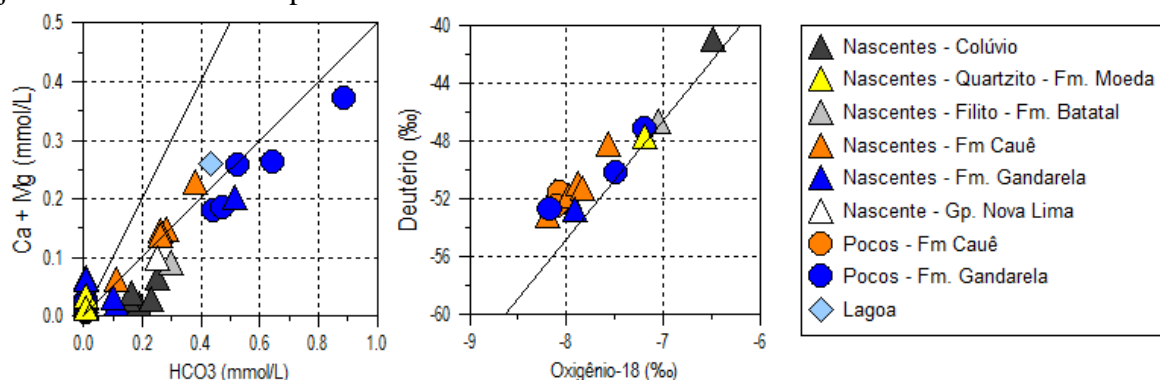


Figura 3 – Gráficos mostrando resultados hidroquímicos (Ca, Mg e HCO_3) e de isótopos da água

Já nos poços amostrados no lado leste da Serra da Moeda não se observa a referida correlação entre Ca, Mg e HCO_3 . Isto mostra que a água captada por estes poços é oriunda de uma porção do aquífero Cauê composta predominantemente por itabirito silicoso e, portanto, distinta das nascentes. Este contraste permite utilizar o monitoramento hidroquímico dos poços para verificar o eventual avanço das zonas de influência dos mesmos em direção às nascentes.

No gráfico dos resultados de oxigênio-18 e deutério (Figura 3), verifica-se que as amostras coletadas de nascentes e poços da Fm. Cauê se posicionam numa área específica do diagrama, acima da linha meteórica global, distinta da maior parte das amostras coletadas de outros pontos. Isto indica que a água subterrânea no aquífero Cauê possui tempo de residência suficientemente longo para interagir com minerais silicatados (os resultados de trítio indicam um tempo de residência superior a 50 anos no aquífero Cauê), resultando num enriquecimento de deutério na água em função do processo de hidrólise (descrito por Clark e Fritz, 1997).

Também se observa que dois pontos posicionados no domínio da Fm. Gandarela apresentam composição isotópica semelhante às águas subterrâneas do aquífero Cauê, demonstrando que há contribuição nestes locais de água oriunda do aquífero Cauê e comprovando a interconexão no fluxo subterrâneo entre estas duas formações.

CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas foram: a) As formações Cauê e Gandarela são fontes potenciais de abastecimento de água na área avaliada; b) As descargas do aquífero Cauê são sensíveis a variações de precipitação de longo prazo, mas não apresentam clara resposta à sazonalidade climática anual; c) Há indicação de um forte controle estrutural ao fluxo subterrâneo no aquífero Cauê, sendo necessário um detalhamento das estruturas existentes ao



XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

longo da serra; d) Apesar da baixa salinidade, existem variações na hidroquímica da água subterrânea do aquífero Cauê, as quais são associadas à mineralogia do meio; e) Encontrou-se evidências de interconexão no fluxo subterrâneo entre os aquíferos Cauê e Gandarela.

Com isso, pode-se tecer as seguintes considerações quanto à quantificação das reservas hídricas renovável e permanente na Serra da Moeda: a) Os aquíferos Cauê e Gandarela, por estarem interconectados, devem ser considerados como um único compartimento hidrogeológico. Ao mesmo tempo, eles possuem propriedades físicas (recarga, permeabilidade e porosidade) distintas; b) A área espacial a ser considerada no cálculo das reservas deve ser limitada pelos contatos com unidades de menor condutividade hidráulica (Fm. Batatal e Grupo Piracicaba) e com os diques básicos que seccionam a serra; c) O comportamento hidrodinâmico dos aquíferos Cauê e Gandarela ainda é desconhecido abaixo dos 300 metros de profundidade, o que levará a um grau elevado de incerteza a quantificação da reserva permanente.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado por meio de um trabalho de consultoria contratado pela Coca-Cola FEMSA, a quem agradecemos o suporte. Também agradecemos as seguintes instituições e indivíduos pelo auxílio e fornecimento de informações relevantes ao estudo: SAAE-Itabirito, Gerdau, IGAM, ONGs Abrace a Serra e Arca AMASERRA, Neusa Sousa Frederico, Mateus Mol, Maria Antonieta Mourão, Milton Pereira Filho e Antônio Seabra.

REFERÊNCIAS

BALTAZAR, O.F. *et al* (2005). Mapa Geológico na Escala 1:50.000 com Nota Explicativa. In: *Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa*. Lobato *et al* (2005) CODEMIG. Belo Horizonte.

CLARK, I., FRITZ, P. (1997). *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. CRC Press. 328 p.

DORR II, J.V.N. (1969). Physiographic stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *U.S. Geol. Survey Prof. Paper 614-A*, USGS 110 p.

MOURAO, M.A.A. (2007). *Caracterização Hidrogeológica do Aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG*. 321 p. Tese (Doutorado em Meio Ambiente) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

ROSIÈRE, C.A.; CHEMALE JR., F. (2000) Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero - uma visão geral e discussão. *Geonomos*, 8:27-43.

VALE (2016). *Relatório de Acompanhamento Hidrogeológico da Mina Capão Xavier*. 193 p.