

O Aqüífero Cauê e Unidades Hidrogeológicas Associadas: Principais Características Hidroquímicas, Porção Ocidental do Quadrilátero Ferrífero, MG.

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

Resumo - O aqüífero Cauê abrange a unidade geológica hospedeira dos corpos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero (Formação Cauê). As águas do aqüífero Cauê são muito pouco mineralizadas (condutividade elétrica média de 13,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$), sem uma assinatura específica. A grande variabilidade composicional das águas revela a heterogeneidade mineralógica da unidade Cauê e a provável mistura de águas originárias dos aqüíferos profundos adjacentes e dos aqüíferos rasos inconsolidados. Pode haver ainda alguma alteração química decorrente de atividade antrópica. A unidade limitante de topo, o aqüífero Gandarela, constitui-se de rochas carbonáticas e apresenta feições cársticas importantes junto ao eixo do Sinclinal Moeda e no segmento oriental do Homoclinal Serra do Curral. Exibe identidade química caracterizada pela elevada condutividade elétrica (média de 108,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$), e composição predominante de cálcio, magnésio e bicarbonatos. A unidade confinante Batatal, que constitui a base do aqüífero Cauê, mostra baixa permeabilidade em praticamente toda a área. Na faixa Tectônica Tamanduá-Mutuca, a grande densidade de estruturas (especialmente rúpteis), decorrentes da deformação, favoreceu a percolação de água subterrânea nos filitos que mostram dois importantes pontos de descarga ao longo do ribeirão de Fechos. Trata-se de águas redutoras com elevada concentração em metais dissolvidos, em especial, ferro.

Abstract - The Cauê aquifer encompasses the geological unit that is the host of the Iron Quadrangle bodies of iron ore (Cauê formation). The waters of the Cauê aquifer are very poorly mineralised (average electric conductivity of 13.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$), having no specific signature. The top limiting hydrostratigraphic unit of the Cauê aquifer, named the Gandarela aquifer, is made of carbonatic rocks and displays important karst features where it joins with the Serra da Moeda Sinclinal, and in the oriental segment of the Serra do Curral Homoclinal. It exhibits a chemical identity characterised by high electric conductivity (mean of 108.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$) and a composition in which, calcium, magnesium and bicarbonates predominate. The confining hydrostratigraphic unit, named Batatal, constitutes the base for the Cauê aquifer and displays low permeability in almost all of its domain. As to their chemical characteristics, the waters of the Cauê aquifer are very poorly mineralised (average electric conductivity of 13.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$), having no specific signature. In the Tamanduá-Mutuca tectonic shear zone, the great density of structures (especially ruptile ones), due to the deformation, favoured the percolation of groundwater in the phyllites that show two important discharge points along the Fechos stream. The water in these two points is characterized by a reducing condition and a high concentration of dissolved metals, especially iron.

Palavras-Chave – Aqüífero Cauê, Hidroquímica, Quadrilátero Ferrífero

¹Hidrogeóloga, CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Av. Brasil 1731, Funcionários, Belo Horizonte, MG, Brasil, CEP 30.140-002, Tel: (31) 3878-0385; e-mail: antonieta@bh.cprm.gov.br

²Professor de Hidrogeologia Ambiental, 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) 3409-1884. e-mail: celso@desa.ufmg.br.

³Professor de Geologia, 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

A composição natural da água subterrânea é o resultado da combinação de vários fatores que incluem o tempo de residência da água na formação rochosa, a dissolução de minerais formadores das rochas pelas quais a água circula, e as características climáticas, assim como a composição, granulometria, estrutura e espessura da zona não-saturada.

Em terrenos hidrogeológicos de grande heterogeneidade e anisotropia, em que se somam os fatores primários, relativos aos ambientes de formação das seqüências sedimentares, aos aspectos secundários, derivados da evolução tectono-metamórfica e de processos de alteração meteórica, prevê-se que a hidrogeoquímica reflita em parte essa complexidade.

A área selecionada para o estudo corresponde à porção ocidental do Quadrilátero Ferrífero, abrangendo o setor centro-norte do Sinclinal da Moeda e o segmento central do Homoclinal da Serra do Curral (Figura 1). A delimitação da área baseou-se em um conjunto de características incluindo: a representatividade geológica; a grande concentração de minerações de ferro; a existência de estudos realizados pelas mineradoras; e a importância para o abastecimento de Belo Horizonte, refletida na existência de áreas de proteção especial de mananciais.

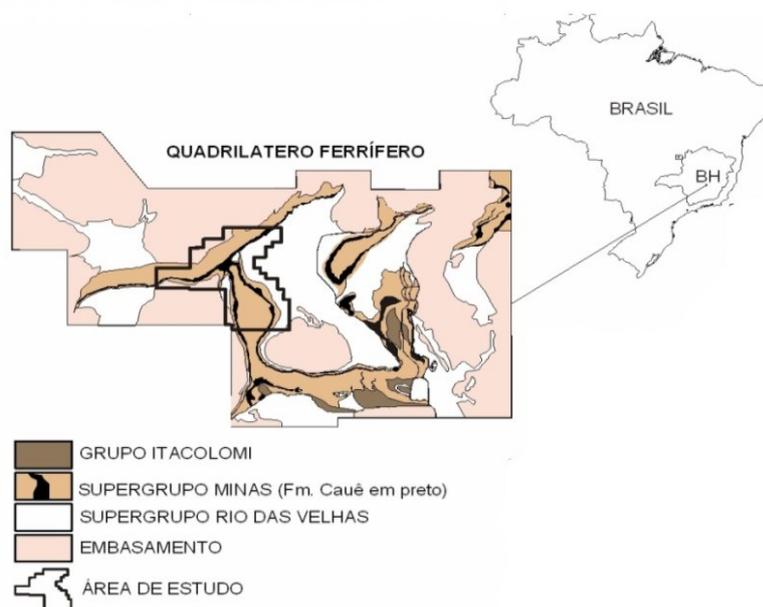


Figura 1 – Localização da área de estudo

Nessa área destaca-se a ocorrência da Formação Cauê que constitui a hospedeira do minério de ferro e corresponde ao principal aquífero do Quadrilátero Ferrífero. Exibe grande variabilidade textural e composicional, de origem primária e secundária, o que imprime notável heterogeneidade e anisotropia ao aquífero que pode se comportar como um meio essencialmente poroso ou fissural, com passagens de natureza intermediária ou mesmo maciças.

Nas grandes estruturas dobradas, o aquífero Cauê apresenta-se, em geral, como um aquífero livre balizado lateralmente por dolomitos da unidade de topo (Formação Gandarela) e pelos filitos da unidade de base (Formação Batatal). Diques de rocha básica, considerados aquícludes, cortam as formações e compartimentam localmente o aquífero. A descarga está condicionada aos fraturamentos e falhas, ao contato com os filitos Batatal e/ou aos efeitos de processos erosivos que conduzem à exposição do nível d'água. As vazões das nascentes são, em geral, muito elevadas chegando a alcançar valores acima de 100 m³/h.

Por fim, deve-se ressaltar que esse estudo envolve a compilação de parte dos resultados apresentados pela primeira autora em sua tese de doutoramento (Mourão, 2007).

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 450 Ma. 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.

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 anfíbolítico, com lentes de margas, xistos e filito. Possui espessura bastante variável, sendo estimados por Dorr (1969) valores entre 200 e 400 metros para porções pouco deformadas que pode elevar-se para 1000 metros em áreas mais tectonizadas.

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

Dentre os materiais de cobertura, deve-se destacar a presença da canga - um produto de alteração, de espessura variável de 2 a 10 metros, consistindo de fragmentos de formação ferrífera, hematita compacta e, minoritariamente, outros minerais, cimentados por óxido de ferro hidratado.

2.2 Arcabouço tectônico proterozóico

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 (Baço, 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).

Na área da pesquisa, as rochas do Supergrupo Minas conformam-se em duas principais feições estruturais: o sinclinal Moeda e o Homoclinal Serra do Curral. Zavaglia (1995) identificou, ao longo do flanco nordeste do Sinclinal Moeda, um corredor transpressivo-sinistral (Faixa Tamanduá-Mutuca), de idade Brasiliana, formado por zonas de cisalhamento dúcteis de direção geral NS, com movimentos reversos sinistrais, e por falhas transcorrentes dextrais de orientação ENE-WSW.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A interpretação dos dados hidroquímicos foi feita, primeiramente, de forma generalizada, buscando a caracterização das unidades hidrogeológicas tratadas no estudo (Aqüíferos Cauê e Gandarela e Unidade Confinante Batatal). Foram empregadas as análises realizadas durante o trabalho, bem como aquelas reunidas ou efetuadas por Beato e Bertachinni (2005).

Ainda que o conjunto envolvesse amostras coletadas em anos e períodos sazonais distintos bem como métodos e limites de detecção diversos, a avaliação e tratamento dos resultados demonstraram que, salvo alguns poucos casos, não há variações químicas expressivas para os pontos d'água que foram objeto de várias coletas ao longo do tempo. Mesmo assim, procurou-se trabalhar com os dados de forma cautelosa, adotando-se para a análise e interpretação os íons mais abundantes e evitando-se o estabelecimento de conclusões que pudessem ser influenciadas por questões analíticas.

As concentrações absolutas ou relativas dos íons foram tratadas por meio de procedimentos gráficos e de técnicas estatísticas de correlação. Procedeu-se também a avaliações mais detalhadas, utilizando-se exclusivamente das amostras coletadas durante a pesquisa e abrangendo os grandes compartimentos geológicos.

4. CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA

4.1. Aquífero Cauê

As amostras referentes ao aquífero Cauê estão localizadas principalmente no Sinclinal Moeda e no segmento sudoeste do Homoclinal da Serra do Curral (Figura 2). São provenientes de pontos d'água de natureza bastante diversificada, abrangendo nascentes, cabeceiras de drenagem, poços tubulares, galeria e *sink-cut* (fundo de cava).

A grande variabilidade composicional das águas, destacada pelos diagramas de Chadha e de Piper-Schoeller (Figuras 3 e 4, respectivamente), revela a heterogeneidade mineralógica da unidade Cauê e a provável mistura de águas originárias dos aquíferos profundos adjacentes e dos aquíferos rasos inconsolidados. Pode haver ainda alguma alteração química decorrente de atividade antrópica visto que muitos pontos encontram-se próximos a minerações ou áreas urbanas. Não se devem descartar também a influência da baixa mineralização, e a conseqüente dificuldade analítica, na diversidade química.

Em virtude dessa diversidade de tipos de águas foi efetuado um agrupamento de amostras semelhantes utilizando-se do diagrama da diferença (em meq/L) entre as concentrações de metais alcalino terrosos e alcalinos *versus* a diferença (em meq/L) entre os teores de ânions de ácidos fracos (carbonatos e bicarbonatos) e ácidos fortes (cloretos e sulfatos). Esse diagrama representa uma adaptação daquele proposto por Chadha (1999), tendo sido adotadas as concentrações absolutas ao invés dos valores relativos em porcentagem. Esse procedimento visou a distinção das amostras também pela quantidade de íons dissolvidos. Observa-se na Figura 3 que as análises podem ser reunidas em três grupos. Os Grupos 1 e 2 envolvem águas bicarbonatadas cálcicas e magnesianas que se distinguem pela quantidade de íons dissolvidos, sendo maior para o primeiro. O Grupo 3 é composto por águas bicarbonatadas sódicas fracamente mineralizadas.

Os pontos d'água associados ao Grupo 1 representam 16 amostras (8% de um total de 61 amostras) e indicam fluxos subterrâneos em fácies carbonáticas do aquífero Cauê ou a conexão hidráulica com o aquífero Gandarela. Grande parte desses pontos encontra-se localizada no flanco oeste do Sinclinal Moeda e na extremidade nordeste do Homoclinal da Serra do Curral (Figura 2).

O Grupo 2 reúne 26 amostras (43% do total) e exibe composição característica de águas que percolam itabiritos essencialmente silicosos, marcada pelo grau de mineralização muito baixo. As amostras do Grupo 3 (14 amostras) assemelham-se a essas em termos de concentração de íons dissolvidos, mas são individualizadas pela predominância do sódio com relação ao cálcio e o magnésio, aspecto químico que pode decorrer dos seguintes fatores: i) presença de níveis pelíticos

que promovem, localmente, o enriquecimento em sódio por meio do processo de troca de bases; ii) influência de águas oriundas dos aquíferos inconsolidados de cobertura que exibem concentração média desse elemento cerca de 4 (quatro) vezes superior ao aquífero Cauê; e iii) efeito da reunião de resultados provenientes de métodos e limites de detecção distintos.

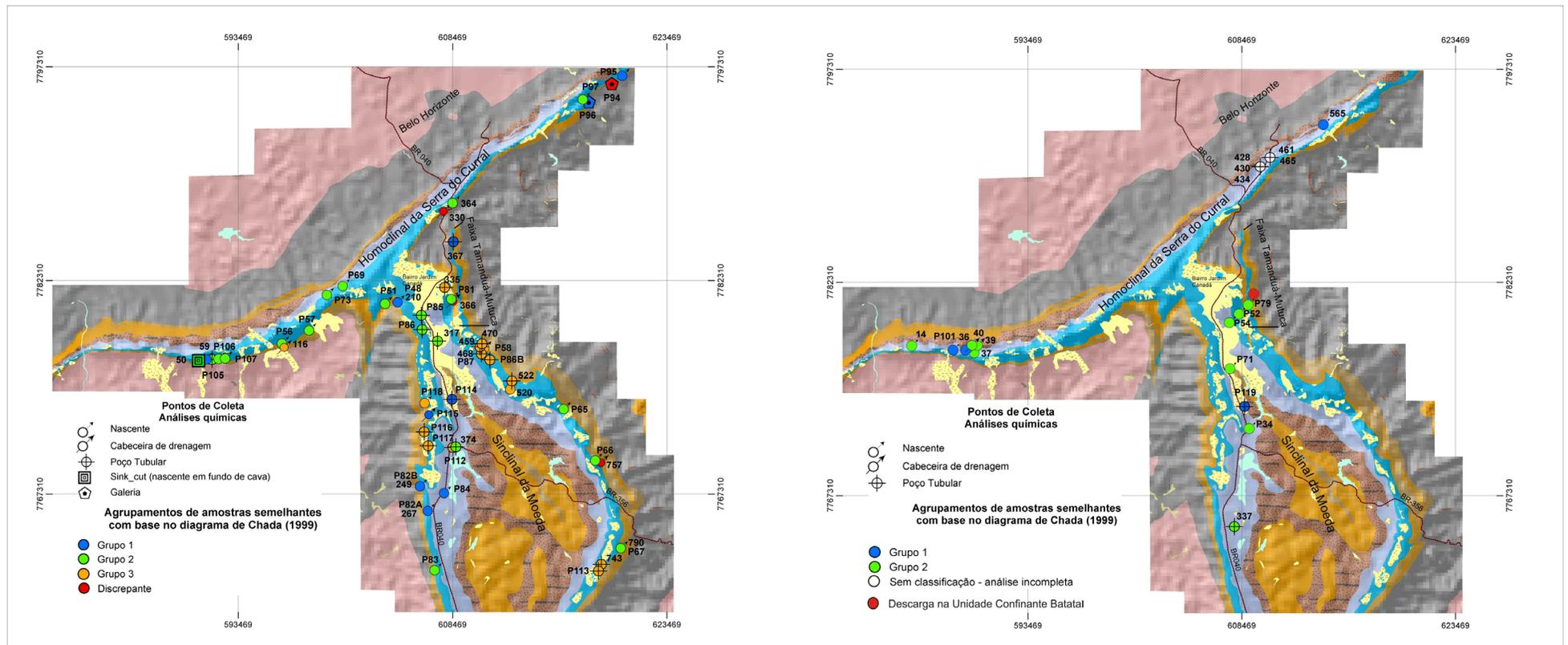
É interessante notar nas Figuras 2, 3 e 4 que os poços de rebaixamento das minas de Tamanduá (459, 468, 470, P58, P86B e P87), Capitão do Mato (520 e 522), Pico (743 e P113) e Pau-Branco (P116 e P117) mostram concentrações de sódio superiores às dos demais cátions, constituindo a maioria das amostras com essa característica. Esse aspecto pode estar ligado à alteração do padrão de fluxo subterrâneo pelo bombeamento contínuo induzindo a drenança de água a partir de níveis pelíticos, conforme discutido por HEM (1986).

A determinação da origem do sódio ou o cálculo do índice de troca de bases (icb) são prejudicados pela grande diferença dos limites de detecção entre Na e Cl, 0,001 e 1 mg/L, respectivamente para as análises efetuadas pelo laboratório do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) da UFMG. Diferenças dessa magnitude são também verificadas para as análises inventariadas as quais são também devidas aos respectivos métodos analíticos.

As amostras discrepantes evidenciam uma questão importante quanto ao local de coleta. Ou seja, com exceção de P94, as demais amostras foram obtidas a jusante dos pontos de exsudação, a uma distância superior a duas centenas de metros. Quando comparadas com aquelas referentes às nascentes, mostram características químicas bastante distintas como é o caso de Mutuca Auxiliar (330 e 364), Captação de Trovões (757 e P66) e Barragem Auxiliar de Fechos (366 e P81). Este fato deve refletir a interação das águas subterrâneas com o ar, com o solo e com a vegetação ao longo do escoamento superficial ou mesmo a mistura com águas de nascentes difusas no leito do curso. Situação semelhante foi também encontrada para as águas do vertedouro da nascente da Tutaméia (P115) e do ponto de surgência (P118), sendo que a primeira enquadra-se no Grupo 2 e a segunda no Grupo 3 do diagrama da Figura 3.

As águas do aquífero Cauê são caracteristicamente pouco mineralizadas exibindo condutividade elétrica média de 13,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com variação, entre os grupos, de 10,2 a 15,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e pH médio de 5,96, com limites para os grupos de 5,37 a 6,14. Valores de pH em torno de 5,6-5,7, bem como as baixas condutividades elétricas, são esperados para os itabiritos silicosos em virtude da baixa reatividade dos minerais constituintes (hematita, magnetita e quartzo).

Deste modo, o pH reflete, de maneira geral e com algumas pequenas alterações, as águas meteóricas. Valores abaixo de 5,2 foram encontrados somente em poços tubulares o que pode ser decorrente de modificações promovidas pelo bombeamento ou por diferenças em profundidade no equilíbrio entre as espécies de carbono inorgânico dissolvidas.



UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

Aqüíferos Inconsolidados

- AQUÍFERO EM ELÚVIOS E COLUVIOS
- AQUÍFERO EM CANGAS E LATERITAS

Aqüíferos Quartzíticos

- AQUÍFEROS MAQUINÉ, MOEDA, TABÕES E ITACOLOMI
- AQUÍFERO CERCADINHO

Aqüífero Carbonático

- AQUÍFERO GANDARELA

Aqüífero em Formações Ferríferas

- AQUÍFERO CAUÊ
- AQUÍFERO EM FORMAÇÃO FERRIFERA TIPO ALGOMA

Aqüífero em Xistos

- AQUÍFEROS NOVA LIMA E SABARÁ

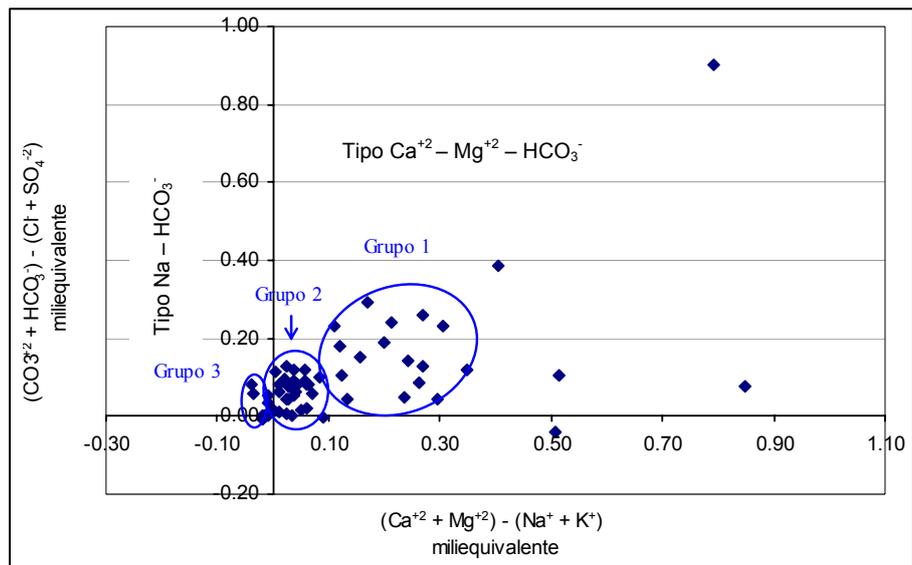
Aqüífero em rochas granito-gnáissicas

- AQUÍFERO COMPLEXO ORTOGNÁISSICO

Unidades Confinantes

- UNIDADES CONFINANTES MOEDA, BATATAL, FECHO DO FUNIL E BARREIRO

Figura 2 - Mapas de localização dos pontos de coleta de amostras de água subterrânea discriminados por grupos de característica química semelhante: a) Aquífero Cauê e b) Aquífero Gandarela e Unidade Confinante Batatal.



Aquífero Cauê				
Grupos de Amostras				
1	2		3	Discrepantes
P48	P56	51	P58	P94
P82A	P57	65	P86B	210
P82B	P65	267	P87	330
P84	P66	317	P112	366
P95	P67	364	P113	757
P96	P69	374	P116	
P114	P73	468	P117	
50	P81	790	P118	
50	P83A	790	335	
59	P85		459	
59	P86		470	
65	P97		520	
65	P105		522	
116	P106		743	
249	P107			
741	P115			
367				

Figura 3 - Diagrama adaptado de Chadha (1999) e a separação das amostras do aquífero Cauê em grupos com características químicas semelhantes. Fonte: Mourão (2007)

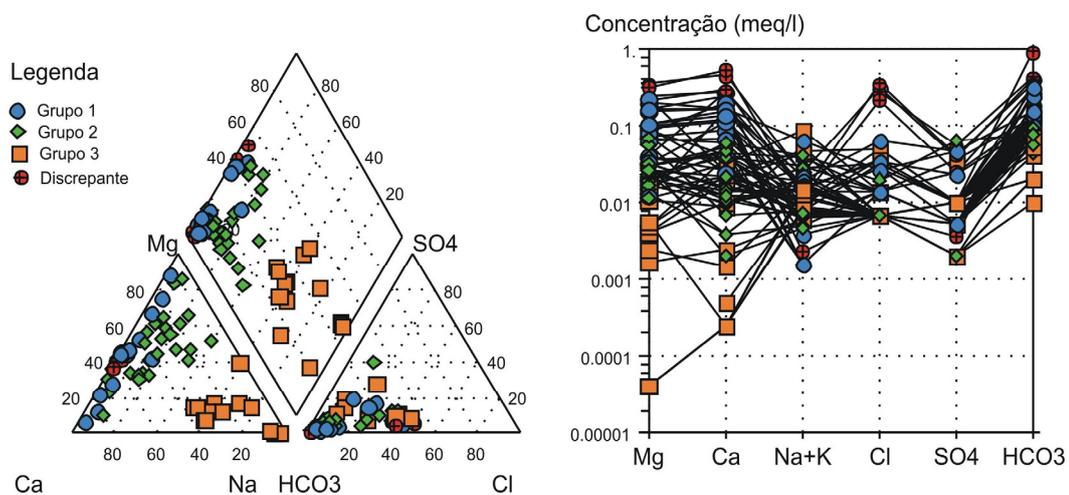


Figura 4 - Diagramas de Piper e Schoeller para o aquífero Cauê. Fonte: Mourão (2007)

Concentrações mais elevadas em ferro (máximo de 1,41 mg/L), zinco (máximo de 1,02 mg/L), sulfato (máximo de 3,10 mg/L), nitrato (máximo de 4,36), chumbo (máximo de 0,07 mg/L), bário (máximo de 0,23 mg/L) e fósforo (máximo de 0,6 mg/L) são de ocorrência rara. Cloretos em teores acima de 1 mg/L (com máximo de 12,8 mg/L) são verificados em 15 amostras (24% do total) e fazem com que as águas sejam classificadas como bicarbonatadas cloretadas.

A Tabela 1 apresenta os resultados estatísticos dos parâmetros físico-químicos para todas as amostras relativas ao aquífero e para cada grupo definido. Correlações entre os principais parâmetros físico-químicos foram efetuadas para maior compreensão dos aspectos químicos. Dentre as correlações positivas encontradas, destacam-se aquelas entre ferro e manganês, entre bicarbonato, cálcio e magnésio e entre turbidez e nitrato. A presença de nitrato (em níveis baixos, com máximo de 4,3 mg/L) associado à turbidez, especialmente junto a minerações, é um indicativo de contaminação.

Por fim, deve-se ressaltar que a baixa mineralização das águas do aquífero Cauê resultam em análises com erros de balanço iônico comumente elevados, ainda que dentro do limite admissível, visto que as concentrações para alguns constituintes são muitas vezes inferiores ao limite de detecção. Esse aspecto impede que sejam efetuados tratamentos mais específicos, como por exemplo, o uso de razões iônicas para determinação de evolução química.

4.2 Aquífero Gandarela

As amostras representativas do aquífero carbonático encontram-se localizadas principalmente no Sinclinal Moeda e nas extremidades ocidental e oriental do Homoclinal da Serra do Curral (Figura 2). Relacionam-se principalmente a nascentes e poços tubulares.

O diagrama da Figura 5 mostra que a maioria das amostras insere-se no Grupo 2 marcado por condutividade elétrica entre 73,0 e 126,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média de 95,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e pH entre 6,8 a 8,4, com média de 7,6. O Grupo 1 é constituído por apenas 4 amostras com águas bem mais mineralizadas que as demais, sendo caracterizado por condutividade elétrica média de 141,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$. A amostra destoante refere-se ao poço tubular do BH Shopping (amostra 465) que exibe condutividade elétrica de 16,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e pH de 7,01. Entretanto, a origem da água é confirmada pela descrição do perfil litológico que aponta a presença de dolomito branco entre camadas métricas de material ocre.

As águas classificam-se como cálcicas-magnesianas, magnesianas-cálcicas ou essencialmente cálcicas e têm assinatura química bastante característica em que as diferenças restringem-se às variações nos teores de cálcio e magnésio (Figura 6).

Quanto aos elementos traços destaca-se a presença comum de ferro total com valor médio de 0,56 mg/L e máximo de 2,28 mg/L e a ocorrência eventual de zinco (média de 0,02 mg/L), níquel

(média de 0,02 mg/L) e fósforo (máximo de 0,3 mg/L). O manganês foi identificado em apenas 4 amostras com concentrações entre 0,01 a 0,13 mg/L. O nitrato foi encontrado em 67% das amostras em que foi analisado, mas em concentrações geralmente baixas (média de 0,51 mg/L). Apenas 1 amostra exibiu teor de NO_3^- relativamente elevado (3,0 mg/L – Ponto 40), mas que não se repetiu em análise realizada nove meses depois. Os resultados estatísticos dos constituintes químicos encontram na Tabela 2.

Análises estatísticas realizadas para os diversos parâmetros demonstraram correlações entre bicarbonato, dureza e magnésio e entre sólidos dissolvidos e magnésio apontando a influência química da dissolução da dolomita. Correlação negativa foi encontrada para pH *in loco* e sólidos dissolvidos o que deve ser resultado de dois fatores. O primeiro fator refere-se ao equilíbrio das reações entre a água e as espécies sólidas de carbonato de cálcio e magnésio, de tal forma que para águas próximas ou na saturação para calcita e dolomita há a tendência de precipitação e conseqüente consumo do íon hidroxila (OH^-). Por outro lado, águas subsaturadas em carbonatos demonstram a tendência de dissolução dos minerais na rocha e liberação de OH^- . Destaca-se que essa mesma relação foi observada por HEM (1986). A reação de dissolução de carbonatos é a seguinte:



O segundo fator que pode contribuir para a correlação negativa entre pH *in loco* e STD é a defasagem de tempo entre a medida feita na coleta e a análise laboratorial do resíduo permitindo a ocorrência de alguma precipitação de carbonatos.

Deve-se esclarecer que as nascentes localizadas na extremidade ocidental da Homoclinal da Serra do Curral e a nascente do Parque das Mangabeiras (ponto 565) foram associadas ao aquífero Gandarela em virtude de seu posicionamento e dos aspectos hidroquímicos. Entretanto, ao contrário das surgências do Sinclinal Moeda, são de natureza difusa e de baixa vazão o que pode sugerir origem a partir do material elúvio-coluvionar e/ou fluxo na interface material inconsolidado e rocha carbonática.

Tabela 1 - Dados estatísticos de parâmetros físico-químicos para o Aquífero Cauê.

Parâmetros	Número de medidas	Valores >LD	Geral (n=61)				Grupo 1 (n=17)				Grupo 2 (n=25)				Grupo 3 (n=14)			
			Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Mínimo	Máximo
Temperatura in loco (°C)	50	50	20,41	20,50	17,20	23,30	20,72	20,9	18,2	23,3	20,57	20,75	18,60	22,80	19,75	19,80	17,20	22,90
Cond. Elétrica in loco (mS/cm)	61	61	13,22	10,00	2,00	81,90	15,96	15,78	3,8	37,6	10,18	10,00	3,85	23,50	10,37	9,27	5,51	20,50
pH in loco	53	53	5,96	5,93	4,68	7,74	6,14	6,03	5,29	7	6,06	6,06	4,74	7,50	5,37	5,25	4,68	6,40
PH Lab	47	47	6,14	6,10	4,78	7,97	6,72	6,4	6,1	7,9	5,83	5,70	5,00	7,50	5,46	5,50	4,78	6,20
Eh in loco (mV)	49	49	352,12	344,00	153,00	657,00	320,70	340,5	153	410	355,08	360,50	234,00	462,00	379,31	340,00	281,00	657,00
Turbidez (NTU)	44	15	4,90	0,85	0,25	44,00	1,73	0,55	0,30	5,50	0,90	0,83	0,25	1,50	12,24	6,00	0,30	44,00
Resíduo total (mg/l)	45	43	21,52	22,00	2,00	49,00	28,02	28,00	15,00	40,00	20,22	20,00	5,00	42,00	15,14	11,50	2,00	48,00
Resíduo suspenso (mg/L)	44	12	4,95	2,00	1,00	26,00	6,80	4,00	2,00	14,40	1,50	1,50	1,00	2,00	6,60	2,00	1,00	26,00
Resíduo dissolvido (mg/L)	45	44	21,82	18,00	1,00	50,00	23,34	20,00	4,50	45,92	19,61	17,00	3,00	50,00	11,13	10,00	1,00	22,00
Acidez carbônica (mg/L em CaCO ₃)	33	33	9,60	9,90	1,40	17,10	10,43	10,40	1,40	16,30	8,69	7,40	2,20	17,10	10,54	10,50	6,90	16,40
Dureza total (em CaCO ₃ , mg/L)	53	52	6,71	4,50	0,05	45,00	10,93	11,10	1,61	18,50	4,61	4,50	0,05	12,00	2,46	2,48	0,21	6,00
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	61	61	8,72	6,10	0,60	56,12	12,01	10,37	4,88	24,4	5,69	5,86	1,21	9,76	2,62	1,83	0,60	7,93
Cloretos (mg/L)	61	17	3,40	1,30	0,50	12,80	2,66	1,08	0,50	11,30	1,38	1,10	1,00	2,30	1,55	1,55	1,30	1,80
Sulfatos (mg/L)	61	11	1,77	1,90	0,18	3,10	2,08	2,05	1,10	3,10	1,70	1,70	1,20	2,20				1,69
Nitrogênio nitroso (mg/L)	57	1				0,01	0,05											
Nitrogênio nítrico (mg/L)	61	43	0,71	0,25	0,07	4,30	1,23	0,275	0,07	4,3	0,25	0,20	0,09	0,94	0,55	0,31	0,07	3,33
Fósforo (P mg/L)	49	16	0,16	0,06	0,015	0,60	0,05	0,06	0,03	0,06	0,21	0,20	0,02	0,60	0,08	0,02	0,02	0,20
Fluoreto (mg/L)	47	1				0,20								0,20				
Cálcio (mg/L)	61	56	1,65	0,70	0,029	10,8	2,50	2,37	0,51	5,6	0,45	0,32	0,04	1,18	0,26	0,20	0,03	0,64
Magnésio (mg/L)	61	51	0,87	0,39	0,02	4,36	1,10	1,11	0,146	2,5	0,44	0,32	0,06	2,80	0,09	0,07	0,02	0,21
Sódio (mg/L)	61	55	0,32	0,20	0,06	1,97	0,33	0,185	0,06	1,48	0,21	0,15	0,07	0,56	0,51	0,30	0,08	1,97
Potássio (mg/L)	59	42	0,20	0,13	0,03	0,9	0,19	0,11	0,03	0,5	0,22	0,12	0,06	0,90	0,21	0,18	0,07	0,37
Ferro ferroso (mg/L)	57	6	0,22	0,23	0,04	0,52	0,21	0,26		0,52	0,23	0,23	0,21	0,24				0,05
Ferro Férrico (mg/L)	26	26	0,13	0,05	0,005	1,41	0,09	0,04	0,009	0,42	0,22	0,055	0,005	1,41	0,08	0,03	0,01	0,24
Ferro Total (mg/L)	47	27	0,16	0,06	0,005	1,41	0,15	0,055	0,009	0,66	0,25	0,055	0,01	1,41	0,09	0,03	0,01	0,29
Alumínio Total (mg/L)	43	15	0,08	0,07	0,01	0,2	0,03	0,03	0,02	0,04	0,11	0,10	0,01	0,20	0,06	0,07	0,03	0,10
Cobre Total (mg/L)	43	5	0,07	0,014	0,006	0,321	0,008		0,008	0,008	0,01		0,01	0,02	0,17		0,01	0,32
Chumbo Total (mg/L)	43	2			0,03	0,07	0,03			0,03	0,07			0,07				
Zinco Total (mg/L)	43	33	0,09	0,03	0,002	1,02	0,04	0,055	0,016	0,069	0,12	0,028	0,003	1,02	0,05	0,02	0,00	0,16
Manganês Total (mg/L)	50	14	0,02	0,02	0,002	0,1	0,03	0,02	0,015	0,05				0,02	0,02	0,01	0,00	0,10
Níquel Total (mg/L)	43	15	0,02	0,02	0,003	0,05				0,02	0,02	0,02	0,003	0,03	0,03	0,02	0,01	0,05
Bário Total (mg/L)	43	18	0,044	0,03	0,014	0,23	0,04	0,04	0,02	0,05	0,02		0,014	0,03	0,08	0,03	0,02	0,23
Sílica (mg/L SiO ₂)	40	39	6,19	6,44	1,35	12,72	6,83	6,74	1,75	12,72	5,49	5,00	1,86	9,85	5,29	5,19	1,35	9,23

LD - Limite de detecção.

Fonte: Mourão (2007)

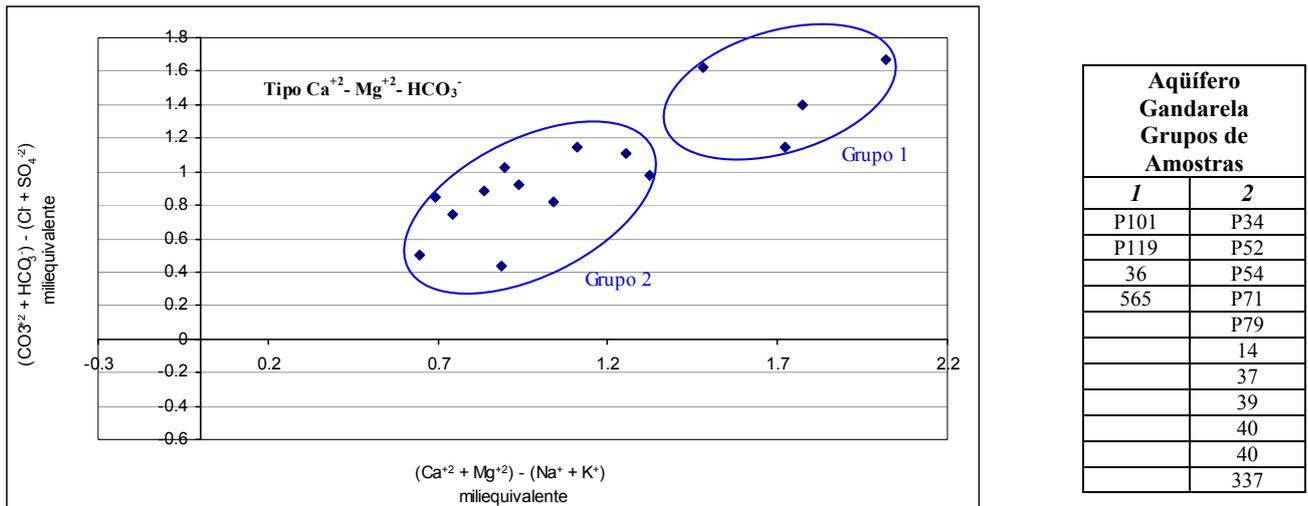


Figura 5 - Diagrama adaptado de Chadha (1999) e a separação das amostras do aquífero Gandarela em grupos com características químicas semelhantes. Fonte: Mourão (2007)

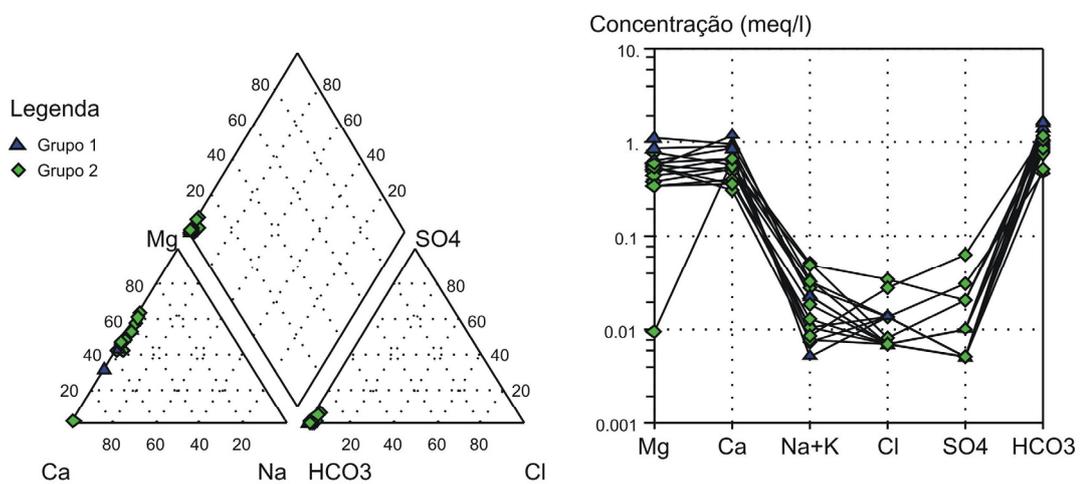


Figura 6 - Diagramas de Piper e Schoeller para o aquífero Gandarela. Fonte: Mourão (2007)

Tabela 2 - Dados estatísticos de parâmetros físico-químicos para o Aquífero Gandarela.

Parâmetros	Número de medidas	Valores >LD	Geral (n=15)				Grupo 1 (n=4)				Grupo 2 (n=11)			
			Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Mínimo	Máximo
Temperatura in loco (°C)	10	10	21,30	21,55	20,00	22,50	21,33	21,40	20,30	22,30	21,29	21,70	20,00	22,50
Cond. Elétrica in loco (mS/cm)	15	15	107,75	101,00	72,30	158,30	141,90	146,55	116,20	158,30	95,33	93,40	72,30	126,00
pH in loco	12	12	7,54	7,62	6,60	8,40	7,26	7,04	6,60	8,13	7,63	7,76	6,73	8,40
PH Lab	10	10	7,73	7,77	6,60	8,60	7,66	8,10	6,60	8,29	7,76	7,64	6,80	8,60
Eh in loco (mV)	10	10	268,40	269,00	166,00	404,00	274,33	219,00	200,00	404,00	265,86	269,00	166,00	330,00
Turbidez (NTU)	10	5	3,54	3,00	1,70	6,50				3,00	3,90	3,50	1,70	6,50
Resíduo total (mg/l)	10	10	72,30	72,00	47,00	95,00	82,53	85,60	67,00	95,00	67,91	71,00	47,00	84,40
Resíduo suspenso (mg/L)	10	2			2,00	3,00							2,00	3,00
Resíduo dissolvido (mg/L)	12	12	80,17	76,50	47,00	126,00	96,00	95,00	67,00	126,00	74,89	73,00	47,00	101,00
Acidez carbônica (em CaCO ₃) (mg/L)	7	7	12,70	10,60	3,70	37,00	23,95	23,95	10,90	37,00	8,20	9,20	3,70	11,90
Dureza total (em CaCO ₃) (mg/L)	15	15	63,15	59,00	32,60	103,10	85,23	86,40	65,00	103,10	55,12	55,00	32,60	74,00
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	15	15	63,68	61,00	29,28	102,48	89,98	93,33	70,76	102,48	54,12	54,90	29,28	73,20
Cloretos (mg/L)	15	5	0,70	0,50	0,30	1,20					0,70	0,50	0,30	1,20
Sulfatos (mg/L)	15	4	1,62	1,25	1,00	3,00					1,62	1,25	1,00	3,00
Nitrogênio nitroso (mg/L)	15	0												
Nitrogênio nítrico (mg/L)	15	10	0,51	0,23	0,10	3,05	0,29	0,38	0,10	0,40	0,60	0,21	0,12	3,05
Fósforo (P mg/L)	10	5	0,16	0,13	0,03	0,30				0,03	0,19	0,22	0,03	0,30
Fluoreto (mg/L)	12	0												
Cálcio (mg/L)	15	15	12,63	11,20	6,18	24,00	19,63	18,70	17,10	24,00	10,09	10,40	6,18	13,50
Magnésio (mg/L)	15	15	6,68	6,63	0,12	13,50	9,61	9,15	6,63	13,50	5,61	6,10	0,12	9,70
Sódio (mg/L)	15	15	0,37	0,23	0,09	0,90	0,36	0,31	0,11	0,69	0,38	0,23	0,09	0,90
Potássio (mg/L)	15	12	0,27	0,19	0,07	0,51	0,31	0,23	0,18	0,51	0,25	0,18	0,07	0,50
Ferro ferroso (mg/L)	15	4	0,25	0,19	0,09	0,55					0,25	0,19	0,09	0,55
Ferro Férrico mg/L	10	10	0,54	0,23	0,02	2,28	0,14	0,13	0,04	0,27	0,80	0,76	0,02	2,28
Ferro Total (mg/L)	13	10	0,56	0,23	0,02	2,40	0,14	0,13	0,04	0,27	0,83	0,80	0,02	2,40
Alumínio Total (mg/L)	10	4	0,12		0,03	0,25				0,03	0,15	0,14	0,07	0,25
Cobre Total (mg/L)	10	1				0,01				0,01				
Chumbo Total (mg/L)	10	0												
Zinco Total (mg/L)	10	7	0,02	0,01	0,01	0,04	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,04
Manganês Total (mg/L)	15	4	0,05	0,04	0,01	0,13					0,05	0,04	0,01	0,13
Níquel Total (mg/L)	10	5	0,02	0,02	0,01	0,02				0,02	0,02	0,02	0,01	0,02
Bário Total (mg/L)	10	4	0,04	0,04	0,03	0,05	0,04	0,04	0,03	0,05	0,04	0,04	0,03	0,05
Silica (mg/L SiO ₂)	10	9	7,60	7,60	4,43	12,43	7,63	6,72	4,64	12,43	7,57	8,80	4,43	9,40

LD - Limite de detecção. Fonte: Mourão (2007)

Um dos pontos de descarga induzida por escavação corresponde ao manancial captado de Fechos Galeria (P52) que representa uma antiga estrutura de prospecção cuja abertura está implantada em itabiritos não carbonáticos da Formação Cauê. Entretanto, a qualidade da água, marcada por pH elevado (7,8), alta condutividade elétrica (95,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$) e concentrações significativas de cálcio (6,18 mg/L), magnésio (9,85 mg/L) e bicarbonato (54,9 mg/L), indica a percolação em meio carbonatado. É bastante provável a conexão hidráulica entre os dois aquíferos nesse ponto.

Assim, para investigar essa questão foi feita uma simulação, utilizando-se do Programa Aquachem 3.7, de qual seria a proporção da mistura entre as águas dos aquíferos Cauê e Gandarela que melhor representaria a qualidade da água observada no ponto P52 (Fechos Galeria). Partindo-se da composição de um ponto d'água do aquífero Cauê, situado nas proximidades de Fechos Galeria (P81 – Nascente Fechos Auxiliar), e usando a amostra da nascente de Fechos Cárstica (P54) como a solução a ser adicionada, verificou-se que uma contribuição das águas do Gandarela, em proporção superior a 90%, na mistura com a água do Cauê resultaria em uma água com qualidade da água similar àquela amostra no ponto P52 (Fechos Galeria).

Na Tabela 3 estão mostrados os resultados desta simulação, onde, nas duas últimas colunas pode-se verificar a similaridade entre as águas da amostra P52 e da mistura simulada.

Tabela 3 - Simulação de mistura de águas dos aquíferos Cauê e Gandarela.

	Aquífero	Tipo da água		
Amostra 1 : P81 (Fechos Auxiliar)	Aquífero Cauê	Ca-Mg-HCO ₃ -Cl		
Amostra 2 : P54 (Fechos Cárstica)	Aquífero Gandarela	Ca-Mg-HCO ₃		
Amostra de referência : P52 (Fechos Galeria)	Aquíferos Gandarela/Cauê	Mg-Ca-HCO ₃		
Contribuição da amostra P81 em P52 : 5%				
Parâmetro (mg/L)	Amostra P81	Amostra P54	Amostra P52	Hidroquímica calculada para a mistura
Na	0,18	0,205	0,09	0,21
Ca	0,77	7,230	6,18	7,10
Mg	0,28	4,170	6,54	4,09
Cl	1,80	0,250	0,25	0,28
SO ₄	0,50	0,250	0,25	0,26
pH	6,4	8,4	7,8	8,36
Cond. Elétrica	7,60	89,0	95,90	87,37

4.3. Unidade confinante Batatal

Apresenta na área de pesquisa apenas um ponto de descarga importante (P77) que se localiza na faixa tectônica Tamanduá-Mutuca e se relaciona ao filito sulfetado.

São águas de característica química bastante peculiar, marcada por caráter redutor (Eh de -23 mV), altas concentrações em ferro dissolvido (2,4 mg/L) e manganês (0,3 mg/L), turbidez elevada (29,0 NTU) e acentuada mineralização (condutividade elétrica de 157 μ S/cm). Em termos de metais pesados foram determinados zinco (0,02 mg/L) e níquel (0,02 mg/L). Classificam-se como bicarbonatadas cálcicas-magnesianas.

4.4. Cálculo do Índice de Saturação

Buscando compreender melhor os aspectos químicos das águas subterrâneas, foi efetuado o cálculo do Índice de Saturação (IS) para os diversos minerais (Figura 7 e Tabela 4). O índice de saturação é definido como a diferença entre o logaritmo do produto da atividade dos íons na água (logPAI) e o logaritmo da constante de solubilidade do mineral em equilíbrio (logK), tal que:

$$IS = \log(PAI/K) \quad (\text{EQUAÇÃO 2})$$

Onde:

IS = Índice de saturação;

PAI = Produto da atividade do íon;

K= constante de solubilidade do mineral.

De acordo com esta definição, se SI é equivalente a zero, a solução está em equilíbrio com o mineral. Mas, valores menores ou maiores que zero indicam, respectivamente, subsaturação ou sobressaturação. Como ressaltado por Appelo e Postma (1994), raramente a água subterrânea encontra-se em equilíbrio químico e, portanto, o índice de saturação deve ser compreendido como um indicativo da direção do processo reativo, ou seja, para a subsaturação a dissolução é esperada, enquanto que a sobressaturação sugere precipitação.

O índice de saturação foi calculado por meio do programa PHREEQC, modulado ao programa Aquachem 3.7 o qual utiliza, além das concentrações iônicas, os valores de Eh, pH e temperatura para os cálculos das constantes de equilíbrio e dos coeficientes de atividade. As incertezas dos cálculos relacionam-se a diversos fatores, a saber: i) qualidade da análise; ii) a precisão do valor determinado para o pH visto que, para alguns minerais, pequenos erros (e.g. 0,33) podem afetar o logIAP de até uma unidade (APPELO e POSTMA, 1994); iii) a imprecisão das medidas de Eh efetuadas utilizando-se de eletrodos de platina (HEM, 1986 e APPELO e POSTMA, 1994).

Aspectos interessantes sobressaem do diagrama de índice de saturação para calcita e dolomita *versus* sólidos totais dissolvidos (Figura 7). Verifica-se que a maioria das amostras de água subterrânea encontra-se subsaturada em calcita e principalmente, dolomita. Todavia, amostras relacionadas ao aquífero Gandarela, com STD superior a 45 mg/L, mostram-se próximas ou no estado de saturação para esses minerais.

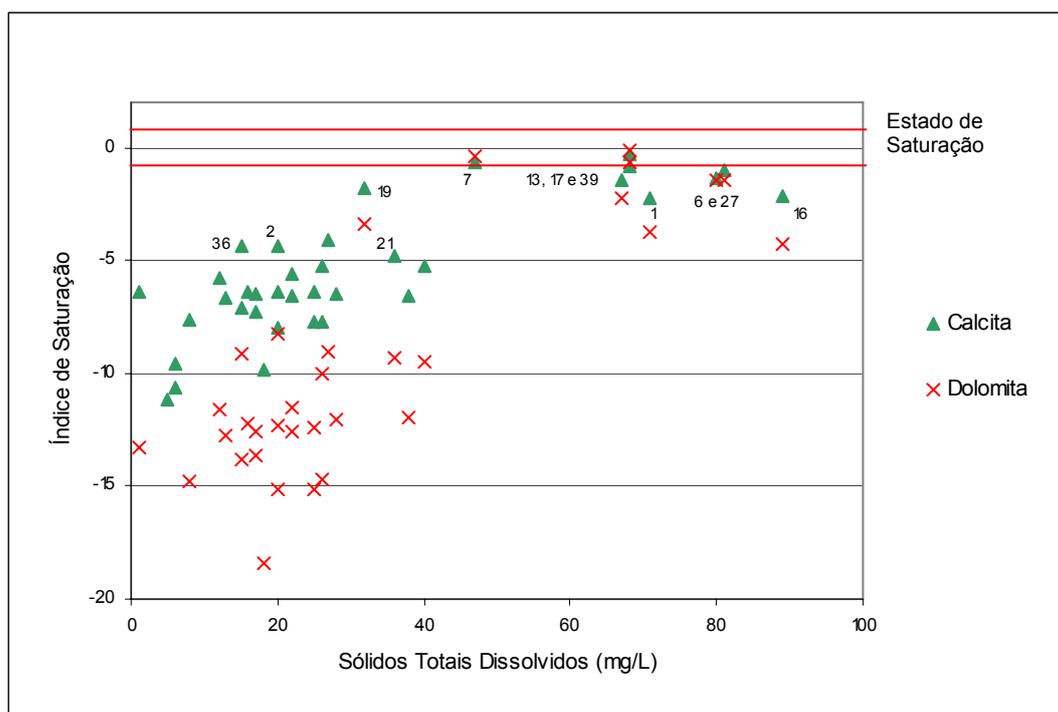


Figura 7 - Diagrama de índice de saturação para calcita e dolomita *versus* sólidos totais dissolvidos. Fonte: Mourão (2007)

Destaca-se da Figura 7 a ocorrência de águas com STD inferior a 40 mg/L, mas com índice de saturação (IS) acima de -5. Referem-se às nascentes da captação Catarina Principal (ponto 2 - P48), Clube Serra da Moeda (ponto 21 – P84), Retiro do Chalé-Capitão Valente (ponto 19 – P82A) e poço tubular no Condomínio Miguelão (ponto 36 – P114). Essa observação reforça a hipótese de interação da água com minerais carbonáticos ou a conexão com o aquífero Gandarela.

O cálculo do índice de saturação para outros minerais nas águas (Tabela 4) mostra que estas se encontram geralmente saturadas em quartzo, hematita e goetita, comuns na área. Saturação em mineral de manganês e em talco é identificada em algumas amostras relacionadas aos aquíferos Cauê e Gandarela. Ressalta-se a existência de várias ocorrências de manganês na região e a descrição de talco em dolomitos da Formação Gandarela por Souza (1987).

A presença de hematita, goetita e manganita em estado de sobressaturamento deve-se ao fato de que oxihidróxidos de ferro e óxidos de manganês apresentam estabilidade nas condições comumente encontradas nas águas subterrâneas da área, ou seja, pH entre 6 e 8 e Eh oxidante (APPELO e POSTMA, 1994). Por se encontrarem dissolvidos, possivelmente estão em situação metaestável. Quanto à sílica, HEM (1986) menciona que as águas naturais normalmente têm mais sílica dissolvida que o valor de equilíbrio para o quartzo, porém menos do que o valor para a sílica amorfa.

A amostra que mais se diferencia das demais se relaciona à Formação Batatal, na faixa tectônica Tamanduá-Mutuca (ponto16 – P77). A saturação é verificada somente para o quartzo e o sulfeto de ferro, estando os demais minerais em condição de subsaturação.

Tabela 4 - Índice de saturação (IS) na água, para os principais minerais de ocorrência na área de estudo.

Código da amostra	Resíduo dissolvido (mg/L)	Índice de Saturação								
		Calcita	Dolomita	Quartzo	Fe(OH) ₃	FeS	Goetita* ¹	Hematita	Manganita* ²	Talco* ³
1 (P34)	71	-2,24	-3,72	2,05	1,26	<-100,0	8,15	19,05		-0,36
2 (P48)	20	-4,34	-8,27	ND	-2,73	-54,34	3,17	7,96		ND
3 (P50)	17	-6,5	-12,54	ND	-0,6	<-100,0	6,29	15,2		ND
5 (P51)	17	-7,26	-13,63	ND	-1,13	<-100,0	5,76	14,2		ND
6 (P52)	80	-1,32	-1,42	ND	1,5	<-100,0	8,39	19,47		ND
7 (P54)	47	-0,62	-0,38	ND	1,73	<-100,0	8,63	19,87		ND
8 (P57)	15	-7,07	-13,85	ND	-1,28	<-100,0	5,61	13,92		ND
9 (P665)	8	-7,61	-14,8	ND	-1,11	<-100,0	5,78	14,28		ND
10 (P66)	13	-6,65	-12,75	ND	-0,66	<-100,0	6,24	15,16		ND
11 (P67)	16	-6,4	-12,26	ND	-0,41	<-100,0	6,48	15,53		ND
12 (P69)	22	-6,56	-12,55	ND	-1,08	<-100,0	5,81	14,28		ND
13 (P71)	68	-0,86	-0,66	ND	1,67	<-100,0	8,56	19,87		ND
14 (P72)	20	-8	-15,18	ND	-0,97	<-100,0	5,92	14,47		ND
15 (P73)	25	-6,41	-12,38	ND	-0,81	<-100,0	6,08	14,85		ND
16 (P77)	89	-2,18	-4,29	1,8	<-100,0	-0,34	<-100,0	<-100,0	<-100,0	-4,29
17 (P79)	68	-0,32	-0,14	2,7	2,77	<-100,0	9,66	22,13	26,77	7,88
18 (P81)	12	-5,79	-11,6	1,83	-0,51	<-100,0	6,38	15,42		-13,1
19 (P82A)	32	-1,79	-3,43	1,8	1,13	<-100,0	8,02	18,91		3,1
20 (P82B)	40	-5,22	-9,52		-0,06	<-100,0	6,83	16,15	14,47	
21 (P84)	36	-4,79	-9,27	2,16	0,75	<-100,0	7,65	17,83		-9,07
22 (P86B)	1	-6,4	-13,31	1,37	0,08	<-100,0	6,98	16,56	11,24	-17,8
23 (P88)	22	-5,56	-11,52	1,47	-1,05	<-100,0	5,84	14,46	11,28	
24 (P89)	25	-7,71	-15,11	1,62	-2,11	<-100,0	4,78	12,22	8,83	-18,8
25 (P96)	20	-6,38	-12,29	2,01	-1,03	<-100,0	5,86	14,44		-13,7
26 (P92)	38	-6,6	-11,96	2,2	-1,2	<-100,0	5,69	14,11		-10,9
27 (P104)	81	-1,03	-1,43	2,78	2,81	<-100,0	9,7	21,92	28,58	10,57
28 (P105)	26	-7,76	-14,74	1,87	-1,15	<-100,0	5,74	14,09		-17
29 (P106)	28	-6,46	-12,03	2,15	-0,57	<-100,0	6,32	15,23		-11,5
30 (P107)	26	-5,28	-10,06	2,27	1,33	<-100,0	8,22	18,97		-8,5
31 (P108)	27	-4,12	-9,07	1,36	0,1	<-100,0	6,99	16,67		-12,6
32 (P109)	6	-10,61		2	-2,57	<-100,0	4,32	11,32		
33 (P110)	32	-3,32	-6,47	2,01	0,85	<-100,0	7,74	17,79		-6,14
34 (P111)	32	-2,75	-4,78	2,04	-0,2	<-100,0	6,69	16,04	18,29	-3,06
35 (P113)	5	-11,15		2,18	-2,69	<-100,0	4,2	10,87	6,14	
36 (P114)	15	-4,37	-9,14	2,24	-0,74	<-100,0	6,15	14,96	14,82	-10,6
37 (P117)	18	-9,87	-18,45	2,18	-1,51	<-100,0	5,38	13,33	7,69	-19,2
38 (P118)	6	-9,58		2,14	-1,96	<-100,0	4,93	12,42	6,94	
39 (P119)	67	-1,46	-2,21	2,56	1,69	<-100,0	8,59	19,82		9,06

ND - concentração de sílica não determinada;

*1 - Goethita: Óxido de ferro hidratado -FeO (OH) ;

*2 - Manganita: Óxido de manganês hidratado – MnO (OH);

*3 - Talco: Filossilicato de magnésio hidratado - Mg₆(Si₈O₂₀)(OH)₄.

Fonte: Mourão (2007)

5. CONCLUSÕES

A análise hidroquímica efetuada envolveu a classificação e tratamento das análises com base em diagramas hidroquímicos e procedimentos estatísticos, os quais permitiram identificar grupos composicionais distintos para cada unidade hidrogeológica como também inferências quanto às alterações promovidas por atividades antrópicas.

De modo geral, as águas do aquífero Cauê possuem baixa mineralização e pH ácido, com valores da mediana equivalentes a 10,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 5,93, respectivamente. Grande parte dos pontos de descarga e exploração, inseridos nesse aquífero, são bastante semelhantes em termos hidroquímicos e revelam a percolação subterrânea em itabiritos essencialmente silicosos. Amostras com maior proporção em cálcio, magnésio e bicarbonatos podem indicar o escoamento em fácies carbonáticas ou a mistura de águas com o aquífero Gandarela. Entretanto, é importante ressaltar que a concentração desses íons nestas amostras é, no mínimo, três vezes inferior à média observada para o aquífero Gandarela. Deste modo, pode-se concluir que, mesmo existindo a conexão hidráulica entre os dois aquíferos, a diluição por águas do Cauê é geralmente expressiva.

A presença de sódio pode refletir a interação com o material de cobertura e a troca de bases com minerais micáceos. O sódio pode se originar também da água de chuva. Valores elevados das concentrações em cloreto podem se relacionar também às coberturas, evidenciando com isso a existência de tempos de trânsito relativamente curtos, para alguns pontos de descarga. Porém, como os níveis de detecção de Na e Cl são bastante distintos, em torno de uma ordem de grandeza, não há como estabelecer uma razão inequívoca para esses íons.

As águas do aquífero Gandarela exibem assinatura química bastante característica, expressa por caráter alcalino (pH mediano de 7,62), alta condutividade elétrica (mediana de 101,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$), predominância dos íons bicarbonato, cálcio e magnésio e saturação em calcita e dolomita.

A faixa tectônica Tamanduá-Mutuca possui a peculiaridade de ser o único local na área a apresentar descargas expressivas associadas à Formação Batatal, cujas águas se caracterizam por uma saturação em sulfeto de ferro, caráter redutor, elevada mineralização e conteúdo significativo em metais dissolvidos.

Evidências de alterações provocadas por atividades antrópicas foram ocasionalmente verificadas, especialmente quanto à presença de nitratos em concentrações anômalas, mas quase sempre dentro do limite de potabilidade.

6. AGRADECIMENTOS

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

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

APPELO, C.A.J.; POSTMA, D. *Geochemistry, groundwater and pollution*. 2. ed. Rotterdam: A.A. Balkema, 1994. 536p.

BEATO, D.A.C.; 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. Parte C.

CHADHA, D. K. A. proposed new diagram for geochemical classification of natural waters and interpretation of chemical data. *Hidrogeology Journal*, v.7, p.431-439, 1999.

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

HEM, J.D. *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water*. United States Geological Survey Water-Supply Paper, USGS, 1986, n. 2254.

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

SOUZA, P.C. *Zur Petrographie und Geochemie der Gandarela – Formation Minas – Supergruppe, Eisernes Viereck, Minas Gerais, Brasilien*. 1987. 210 f. Dissertation (Doktor der Naturwissenschaften). Mathematisch-Naturwissen Fakultät, Technischen Universität Clausthal, Clausthal, 1987.

ZAVAGLIA, G. *Condicionantes Geológicos 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.