

## AVALIAÇÃO E DIAGNÓSTICO HIDROGEOLÓGICO DOS AQUÍFEROS DE ÁGUAS MINERAIS DO BARREIRO DO ARAXÁ, MG - BRASIL.

Décio Antônio Chaves Beato<sup>1</sup>; Haroldo Santos Viana<sup>2</sup> & Elizabeth Guelman Davis<sup>3</sup>

**Resumo:** A estância hidromineral do Barreiro de Araxá - MG é conhecida desde o século XIX e apresenta, simultaneamente, um grande potencial turístico e mineiro que resultam em conflitos ambientais. O estudo geoambiental desenvolvido pela CPRM / COMIG, em 1997, procurou reunir as diversas informações hidrogeológicas sobre a área, investigar o atual estágio de contaminação dos recursos hídricos locais - inclusive fora das áreas mínero-industriais e contaminadas - e avaliar a eficácia das medidas de remediação.

O rebaixamento do nível freático para a extração do minério de fosfato, bem como a disposição inadequada de efluentes do beneficiamento de nióbio, causaram alterações na qualidade e hidrodinâmica de parte do manancial subterrâneo que vem sendo monitorado e suficientemente solucionado pelas empresas mineradoras.

As águas subterrâneas naturais são diversificadas quanto às suas composições em função das origens aquíferas - granular e fraturado- e na maioria pouco mineralizadas. As águas minerais são alcalino-sulfurosa-termal-radioativa e oligomineral-radioativa, e as águas contaminadas são cloretadas cálcicas com elevados teores de bário.

Os resultados indicaram a necessidade de intensificar-se as ações mitigadoras implantadas, inclusive ampliando sua área de abrangência para reverter o processo de contaminação dos aquíferos.

**Palavras-chave** - Hidrogeologia ambiental; água mineral, contaminação de bário.

<sup>1</sup> Hidrogeólogo - CPRM - Serviço Geológico do Brasil . Av. Brasil, 1731. Belo Horizonte MG. (31) 261-0415

<sup>2</sup> Geólogo - CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Av. Brasil, 1731. Belo Horizonte MG. (31) 261-0364

<sup>3</sup> Hidróloga - CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Av. Brasil, 1731. Belo Horizonte MG. (31) 261-0337 - Fax: (31) 261-4484. E-mail: cprmnels@estaminas.com.br

## 1. INTRODUÇÃO

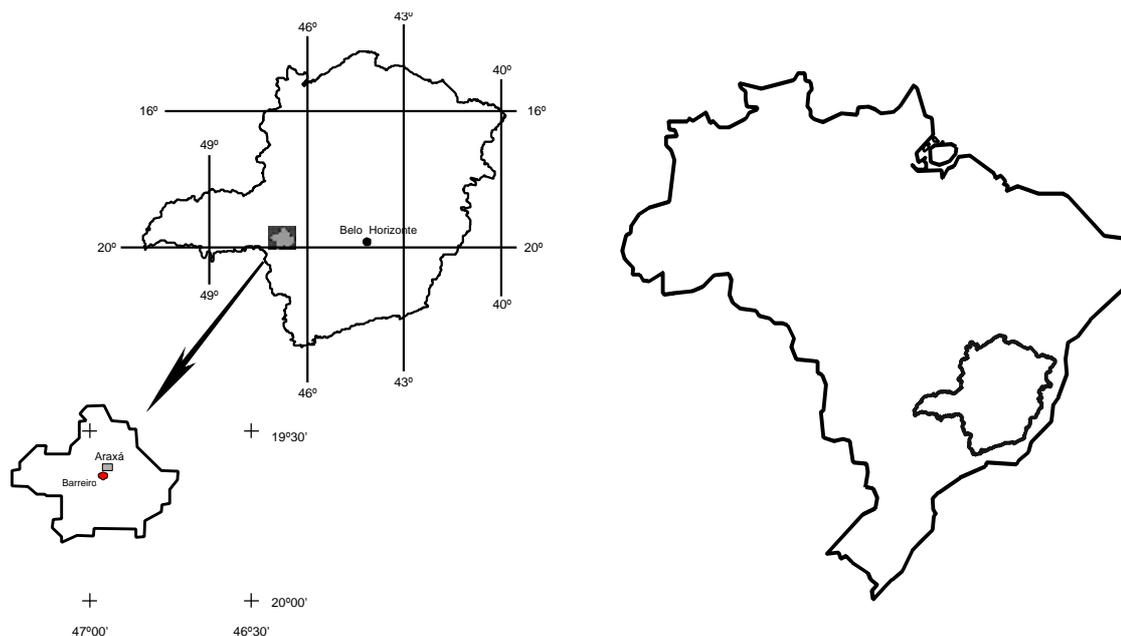
As informações tratadas neste artigo fazem parte do Projeto Araxá: Estudo Geoambiental das Fontes Hidrominerais, resultante do convênio entre a CPRM - Serviço Geológico do Brasil e a Secretaria do Estado de Minas e Energia, através da Cia. Mineradora de Minas Gerais/COMIG, realizado em 1997 e 1998, e publicado em 1999.

A região de Araxá é conhecida desde os tempos do império (século XIX), quando uma personagem mítica, conhecida como Dona Beja, marcou época pelo seu modo de vida e suas ingerências políticas na corte. Até os dias atuais as lendas sobre sua personalidade estimulam a valorização do patrimônio natural e cultural desta região.

A estância hidromineral do Barreiro, distrito do município de Araxá, é conhecida desde o início do século XIX como uma das mais importantes do estado de Minas Gerais, pelas propriedades terapêuticas de suas águas. Já na segunda metade do século XX, a região vivenciou o reconhecimento de importantes jazidas de nióbio e fosfato.

O distrito do Barreiro apresenta peculiaridades geológicas, principalmente quanto à presença de rochas carbonatíticas, e intervenções antrópicas decorrentes da ocupação urbana desordenada, mineração de fosfato e mineração e beneficiamento de nióbio, repercutindo no modelo hidrogeológico e na qualidade das águas locais.

Araxá localiza-se na porção central do Brasil na região do Triângulo Mineiro, oeste do estado de Minas Gerais. Dista 367 km de Belo Horizonte, pela BR-262 (figura 1). O distrito do Barreiro situa-se a cerca de seis quilômetros ao sul da sede do município, nas coordenadas 19°38' latitude S e 46°56' longitude W.



**Figura 1:** Mapa de localização do distrito do Barreiro.

O Barão de Eschwege, em 1816, foi responsável pelo primeiro comunicado sobre a existência de águas minerais de “grande e notável” valor nesta região. Em 1912, foi construído o primeiro balneário, culminando, em 1942, com a inauguração das Termas e Grande Hotel de Araxá, até hoje admirado pelas suntuosas e grandiosas instalações.

Em 1960, iniciou-se a lavra a céu aberto de fosfato e nióbio. Em 1978, foi detectada a interferência da atividade minerária no manancial subterrâneo, conseqüência do rebaixamento do nível freático na mina de fosfato. Posteriormente, em 1982, constatou-se a contaminação das águas subterrâneas por cloreto de bário, resíduo do beneficiamento do minério de nióbio. Desde então, diversos estudos e ações mitigadoras procuraram amenizar o impacto ambiental das atividades mineradoras e industriais.

## 2. METODOLOGIA

Para o estudo utilizou-se dados obtidos em diversos trabalhos científicos anteriormente realizados, dentre eles o mapeamento geológico realizado por GROSSI SAAD *et alii* (1970); estudos hidrogeológicos realizados por PRATINI DE MORAES (1984, 1989, 1990 e 1995); e dados do monitoramento piezométrico e físico-químico ( $\text{SO}_4^{=}$ ,  $\text{Cl}^-$ , Ba, condut. elétrica e pH), realizados pelas mineradoras entre 1982 e 1997.

No levantamento hidrogeológico de campo, inspecionou-se a maioria dos poços de monitoramento, sangria e infiltração, além de todos os poços de abastecimento, fontes hidrominerais e nascentes. Nos pontos vistoriados avaliou-se as condições construtivas, operacionais, usos, riscos e vulnerabilidade à contaminação e mediu-se os níveis d'água, condutividades elétricas, pH, temperaturas e vazões, quando possível.

A partir da avaliação da representatividade e confiabilidade dos poços, foram selecionados 19 pontos para a coleta de amostras de água para análises físico-químicas e microbiológicas. Realizou-se um total de 33 coletas (alguns pontos foram amostrados mais de uma vez), sendo seis em captações hidrominerais.

Os parâmetros escolhidos para análise em laboratório variaram de acordo com a natureza do ponto, sendo que as análises completas foram realizadas nas captações de água mineral. Analisou-se cor; turbidez; resíduo seco; dureza de carbonatos, não carbonatos e total; íons principais ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , Fe e Mn totais); metais (Al, As, Cd, Cr, Pb, Ni, Ba, Zn, Li e Se); nitrogênio amoniacal e orgânico e parâmetros microbiológicos (bactérias heterotróficas, pseudomonas, coliformes fecais e totais e estreptococos fecais).

### 3. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

O Complexo Carbonatítico do Barreiro/Araxá destaca-se, economicamente, como o mais importante entre os complexos alcalinos do Alto Paranaíba. Trata-se de rochas plutônicas intrudidas em quartzitos, com xistos subordinados, do Grupo Araxá.

O manto de intemperismo recobre todo o conjunto de rochas do Complexo, contendo importantes depósitos minerais de nióbio (pandaíta), lavrado pela Cia. Brasileira de Mineração e Metalurgia (CBMM) e fosfato (apatita), lavrado pela Arafertil. A reserva de nióbio é considerada, mundialmente, como a maior já descoberta, com  $461,7 \times 10^6$  t de minério com teor médio de 2,5% de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  (ISSA FILHO *et alii*, 1984).

O Complexo do Barreiro apresenta contorno circular, com aproximadamente 4,5 km de diâmetro, com uma área aproximada de 2.516 ha, modelado por rochas quartzíticas encaixantes, extremamente fissuradas e, em parte, fenitizadas.

Na região ocorrem as unidades geológicas denominadas de Complexo Granito-Gnáissico (granitos e gnaisses de composição granodiorítica), Grupo Araxá (micaxistos e quartzitos), Grupo Canastra (filitos e quartzitos), Formação Ibiá (calcoxistos), Intrusivas Alcalinas e Coberturas Detrito-Laterítica (BARBOSA *et alii*, 1970, *in*: VIANA, 1999).

Localmente, o Complexo do Barreiro encontra-se encaixado nas rochas do Grupo Araxá. Este Grupo é constituído de quartzitos e micaxistos com intercalações de anfibolitos. Os metamorfitos atingiram a fácies epidoto-anfibolito.

Os quartzitos, mapeados como unidade inferior, são os responsáveis diretos pela conformação dômica do Complexo, com espessura estimada entre 100 e 600 m. Ocorrem em camadas centimétricas a decimétricas e são constituídos, principalmente, de quartzo, via de regra recristalizado, resultante dos efeitos de contato. Os principais minerais acessórios são: sodanfíbólios, microclina, apatita, dolomita, ortoclase, moscovita, oligoclásio, cloritóides e opacos. Exceto os cloritóides, os outros são resultantes do metassomatismo. As rochas quartzíticas são as que mais evidenciam os efeitos da intrusão, verificados através da fenitização e do intenso fraturamento.

A unidade geológica superior é um quartzo-biotita xisto, na sua maioria fenitizado e alterado, mantendo sua textura original. A sericita está presente como parte dos minerais originados antes da intrusão. Como mineral acessório ocorre a cianita.

O metassomatismo silicoso se faz presente, com introdução de quartzo de contorno hexagonal, de dimensões até 2mm, envolvendo grãos de biotita, anfibólio e ortoclásio. Nos processos de fenitização, foram gerados anfibólio e K-feldspato.

Quanto às rochas intrusivas, estudos desenvolvidos por ISSA FILHO *et alii* (1984) definiram três tipos principais: carbonatito, glimerito e uma rocha constituída de carbonato, flogopita, apatita e magnetita, denominada de foscorito.

Os carbonatitos ocorrem como um sistema complicado de veios e diques penetrando as rochas glimeríticas, apresentando estrutura brechada. É do tipo beforsítico e constituído, predominantemente, de dolomita e contém calcita, ankerita, barita, apatita, magnetita, perovskita, quartzo secundário, pirita, flogopita, anfibólio sódico, isokita e estroncionita, como minerais subordinados.

O glimerito ocorre disperso no complexo e apresenta a flogopita como o principal mineral constituinte, podendo ocorrer dolomita em percentuais consideráveis. Encontra-se freqüentemente brechado e cortado por carbonatitos.

O foscorito ocorre associado ao carbonatito, na parte central do Complexo, e trata-se de uma rocha brechada, contendo carbonato, magnetita, apatita e flogopita. A rocha mostra-se rica em pirocloro, destacando-se como o mais importante minério primário.

O relevo predominante é de morros arredondados a ovalados com encostas suaves e topos aplainados. A altitude máxima verificada no Complexo é 1.222 m, na porção sul, e a menor 935 m, no leito do córrego do Sal, na porção norte.

## **4. ASPECTOS HIDROCLIMATOLÓGICOS**

De acordo com a classificação de NIMER, 1977 (*in*: DAVIS, 1999), a região possui o clima tropical subquente e semi-úmido com período chuvoso entre outubro e abril.

Segundo DAVIS (*op. cit.*), os principais parâmetros climatológicos obtidos a partir da estação climatológica de Araxá (1972-1996), são: temperatura média anual de 20,6°C; precipitação média anual de 1.562 mm; evapotranspiração total anual (método Thornthwaite) de 973,7 mm.

A rede de drenagem da área do Barreiro de Araxá é dirigida pelo rio Capivara que nasce na serra da Bocaina e tem entre seus tributários os córregos Tamanduá e do Sal.

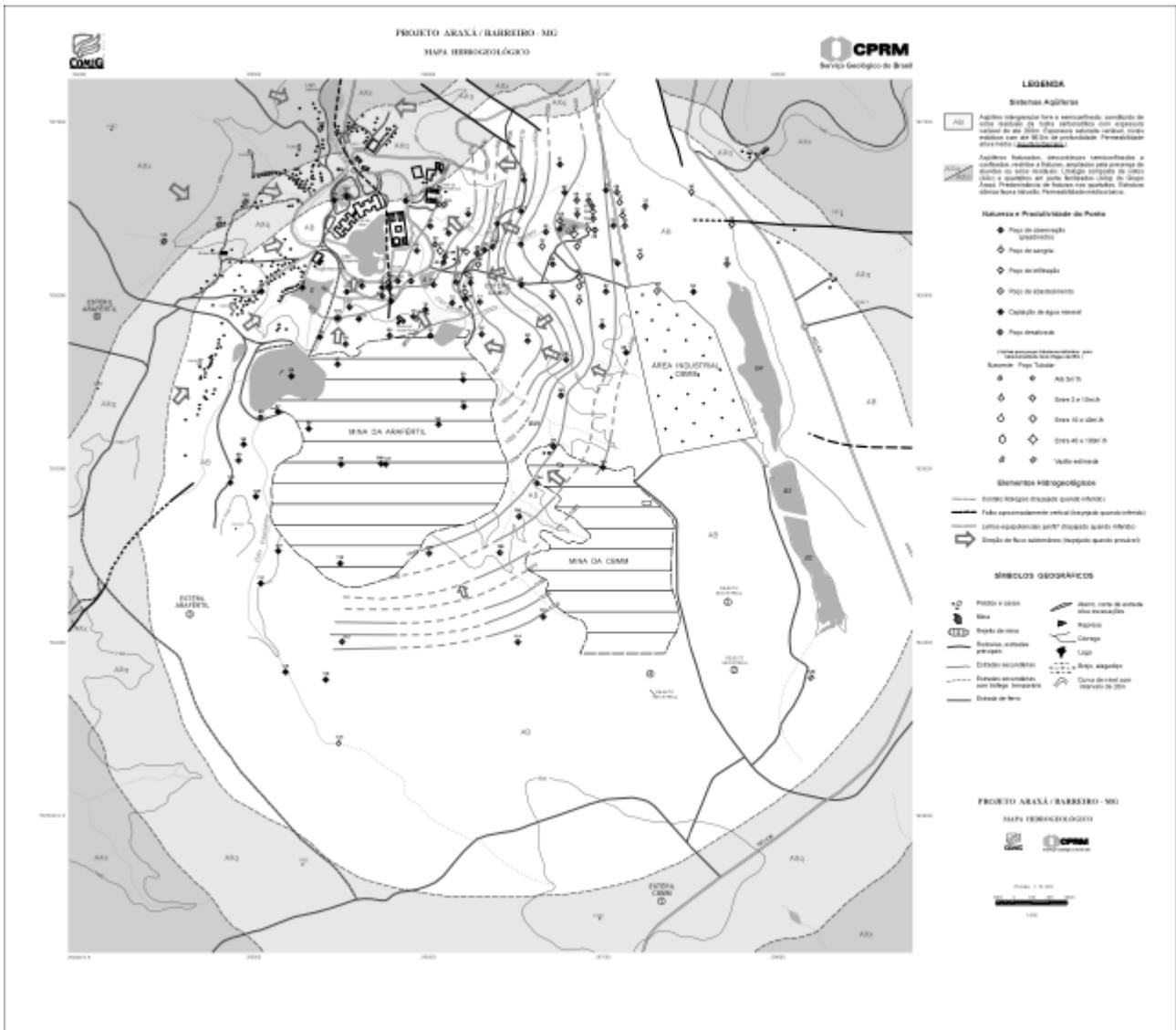
Os cursos que drenam o Barreiro são o córrego da Mata, Cascatinha e Baritina, afluentes do córrego do Sal. Este tem um curso de escoamento rápido e funciona como receptor de esgotos domésticos e efluentes das atividades mineiro-industriais.

De maneira geral, a qualidade das águas superficiais que drenam o Barreiro não atendem os padrões definidos para a classe 2 (Deliberação Normativa 010/86 - COPAM).

## **5. HIDROGEOLOGIA**

### **5.1. UNIDADES AQÜÍFERAS**

Segundo o estudo hidrogeológico realizado por BEATO (1999), os aquíferos são do tipo granular, livre a semiconfinado no manto de intemperismo das rochas do Complexo Carbonatítico e das rochas encaixantes, e fraturado livre a semiconfinado nos quartzitos, xistos e nas rochas carbonatíticas frescas (figura 5.1).



**Figura 5.1.** Mapa Hidrogeológico (original em tamanho A1 e colorido)

O aquífero granular predomina, principalmente no domínio do corpo intrusivo, com cerca de 2 km de diâmetro. Sua espessura é bastante variável, chegando a atingir 200 m na porção sul, próximo à mina de nióbio. Ocorre de forma livre e localmente pode ser semiconfinado por níveis mais argilosos do manto intemperizado.

Trata-se de um solo residual razoavelmente poroso, em alguns locais recoberto por uma canga laterítica e com cavidades resultantes da dissolução de carbonatos. O solo origina-se da alteração das rochas do Complexo Carbonatítico e mostra uma coloração vermelho-tijolo. O nióbio e o fosfato (com barita disseminada) são extraídos deste solo residual enriquecido, com transições mais ou menos contínuas entre um e outro depósito.

Os minerais presentes são predominantemente: apatita, pandaíta (variedade de pirocloro com bário), monazita, goyazita, rutilo, barita, magnetita, ilmenita, hematita, goetita, quartzo, vermiculita, anatásio, leucóxênio e caolim (GROSSI SAAD *et alii*, 1970).

Estudos desenvolvidos por PRATINI DE MORAES (1989), determinaram as condutividades hidráulicas, na área da mina de fosfato, entre  $10^{-6}$  e  $10^{-4}$  cm/s. O valor encontrado é definido para terrenos pouco permeáveis - aquíardos (CUSTODIO *et alii*, 1983, p473). Avaliando as vazões específicas médias de dez poços situados na pluma contaminada ( $0,81 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ , profundidade média de 80,15 m) e três poços no parque do Anel Verde ( $7,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ , profundidade média de 42,0 m), além da rápida resposta na vazão da Fonte Beja à infiltração das águas pluviais, pode-se classificar o aquífero, na sua porção superior, como pobre a bom, com condutividade hidráulica estimada entre  $10^{-4}$  e  $10^{-2}$  cm/seg.

A recarga do aquífero se dá por infiltração pluvial direta nas áreas de cotas mais elevadas, escoando em subsuperfície por linhas de fluxo convergentes até o nível de base, ou zona de descarga, que são os lagos do Grande Hotel (Superior) e do Barreiro (Inferior). A recarga também ocorre pela infiltração das águas das barragens "E", "F", "A" e "G" (figura 5.1).

Os níveis freáticos encontram-se a profundidades variáveis, desde aflorante na superfície (Fonte Beja) até profundidades em torno de 97,0 m, a leste da mina de fosfato. As cotas piezométricas estão entre 956 e 1.108 m.

O aquífero fraturado ocorre principalmente nas rochas em torno do Complexo Carbonatítico. O aquífero é do tipo livre a semiconfinado. As rochas encaixantes são quartzitos e xistos. Destaca-se o aquífero existente nos quartzitos, intensamente fraturados em decorrência da intrusão plutônica. O quartzito forma um anel envolvendo a intrusão com espessura de 100 a 600 m.

Os poucos dados referentes à produtividade do aquífero (vazões de exploração em três poços de abastecimento e na Fonte Andrade Júnior) e o tipo de fraturamento no quartzito sugerem um aquífero com um potencial razoável, podendo proporcionar vazões da ordem de 10 m<sup>3</sup>/h e níveis estáticos com profundidades de 10 a 30 m.

A recarga se dá por infiltração direta de águas pluviais nos poucos pontos de afloramento e por infiltração de águas do solo residual do quartzito. O fluxo apresenta-se em várias direções, uma vez que o corpo é circular e apresenta diferentes altitudes.

## 5.2 INVENTÁRIO DE PONTOS D'ÁGUA

O inventário realizado em fins de 1997 identificou 131 pontos entre poços de abastecimento doméstico, sangria da pluma contaminada, infiltração de solução neutralizante, piezômetros de monitoramento químico e níveis piezométricos (alguns de níveis múltiplos), poços de extração de água mineral e nascentes. O quadro 5.1 relaciona a natureza dos pontos levantados e os responsáveis pela manutenção e monitoramento.

Natureza do ponto	CBMM	Arafertil	COMIG/ Superágua	Outros	Total
Poço de abastecimento	01 (01)	02 (02)	01 (0)	03 (02)	07 (05)
Poço de sangria	10 (04)	--	--	--	10 (04)
Poço de monitoramento	52 (43)	31 (15)	--	--	83 (68)
Poço de infiltração	25 (17)	--	--	--	25 (17)
Poço de água mineral	--	--	04 (03)	--	04 (03)
Nascente	--	01	01	--	02
<b>Total</b>	<b>88 (65)</b>	<b>34 (17)</b>	<b>06 (03)</b>	<b>03 (02)</b>	<b>131 (87)</b>

**Quadro 5.1.** Inventário de pontos d'água no distrito do Barreiro. ( ) poços em funcionamento.

A grande quantidade de poços em uma pequena área deve-se às exigências legais de que as próprias empresas avaliassem e remediassem os impactos ambientais causados pelas suas atividades mineradoras e industriais. A maioria dos poços é utilizada no monitoramento e neutralização da pluma contaminada por cloreto de bário. O restante destina-se ao monitoramento do rebaixamento do nível freático na mina de fosfato.

Os poços de monitoramento e infiltração (108) são revestidos de PVC, Ø 63,5 e 76,2 mm, com profundidade máxima de 125,7 m e média de 70,6 m. Alguns são do tipo

multiníveis (39 poços). Dos poços de sangria (10), somente quatro operavam: dois na barragem B4, um na barragem “D” e um no córrego da Mata. São poços revestidos de aço, Ø 200 mm, e profundidade média de 135,0 m (poços da barragem B4). Todos foram perfurados no manto de intemperismo da rocha carbonatítica.

Identificou-se 39 poços desativados por motivos diversos, sem terem sido adequadamente lacrados de maneira a evitar-se os riscos de contaminação direta ao aquífero.

Dos sete poços de abastecimento, cinco operavam atendendo hotéis, população local, mineiros e operários. O volume de extração foi estimado em 32 m<sup>3</sup>/h, em poços revestidos de aço, Ø 152 mm e sem dados geológicos-construtivos.

Em 1997, os poços de extração de água mineral eram quatro: três poços encontram-se no parque Anel Verde, e pertencem a unidade engarrafadora, também abastecem os bebedouros da Fonte Beja. O outro poço é o da Fonte Sulfurosa ou Andrade Júnior que atende às termas e bebedouros de uso público.

As captações para engarrafamento de água mineral são revestidas de aço inox, Ø 152 mm, com profundidade máxima de 55,0 m (média de 42,2 m) e vazões específicas médias de 7,49 m<sup>3</sup>/h/m.

### **5.3. FONTES HIDROMINERAIS BEJA E ANDRADE JÚNIOR (SULFUROSA)**

A **Fonte Beja** é uma nascente captada no próprio local onde foi construído o fontanário, no início da década de 40. Trata-se de uma água oligomineral, radioativa - 146,5 unidades Mache (MOURÃO, 1990, p458), fria (22,7 °C) e resíduo seco de 112,0 mg/L. É utilizada essencialmente nos banhos das termas, enquanto a água servida nos bebedouros do fontanário é proveniente do poço utilizado no engarrafamento.

A fonte resulta da interseção natural do lençol freático com a topografia, com volume variável em torno de 45 m<sup>3</sup>/h. O restante do escoamento subterrâneo alimenta o Lago do Grande Hotel e Lago do Barreiro. A água da fonte é proveniente da infiltração de águas pluviais nos terrenos a montante, primordialmente, da área do parque do Anel Verde e da área da mina de fosfato (figura 5.1). Parte da recarga é exercida pelas barragens “F”, “E”, “A” e “G”, situadas no parque do Anel Verde.

As barragens “F”, “E” e “A” foram construídas no início da década de 80 para acumularem a água do rebaixamento do nível freático na mina, recarregando o aquífero e mantendo o nível freático a jusante, conservando, assim, a vazão da Fonte D. Beja. Sua construção atingiu os objetivos previstos, mantendo os níveis freáticos a jusante da mina

e, principalmente, regulando a recarga da fonte, antes diretamente relacionada com a infiltração pluvial. As obras proporcionaram, inclusive, vazões de descarga acima do nível histórico de 50 m<sup>3</sup>/h, anterior a 1945 (MAGALHÃES, 1945, p17), como revelam os dados do monitoramento (figura 5.2 ). A figura 5.3 ilustra as alterações de fluxo subterrâneo antes e após as construções das barragens.

A **Fonte Andrade Júnior ou Sulfurosa** é uma captação por poço tubular que encontra-se no próprio fontanário. A água é do tipo alcalino sulfurosa, mesotermal (29,1°C), radioativa - 44 unidades Mache (MOURÃO, *op. cit.*, p458) e resíduo seco de 3.818,0 mg/L. A água é utilizada em banhos nas termas e ingerida pelo público nos bebedouros do fontanário. O excedente do reservatório e dos bebedouros é lançado no lago adjacente para a maturação da lama medicinal utilizada nos banhos das termas.

O poço é jorrante, revestido com aço, Ø de 200 mm e profundidade provável de 54,0 m. Apresenta 5 tomadas d'água na sua coluna de revestimento que se conectam com o reservatório de 335 m<sup>3</sup>, de onde a água é bombeada através de bombas helicoidais para as termas e torneiras de uso público.

A água tem um horizonte de percolação profundo, como indicam as altas temperaturas de 32,4 °C, determinada em uma surgência próxima ao poço, e 29,1 °C na Fonte Andrade Júnior (provavelmente a temperatura real é maior, uma vez que a água amostrada foi proveniente do reservatório). A temperatura estaria associada ao gradiente geotérmico que cresce cerca de 1 °C a cada 30 m em profundidade (Custódio, 1982 p1069). Como a temperatura média das águas subterrâneas locais situa-se em torno de 23 °C, as águas percolariam a uma profundidade acima de 200 m.

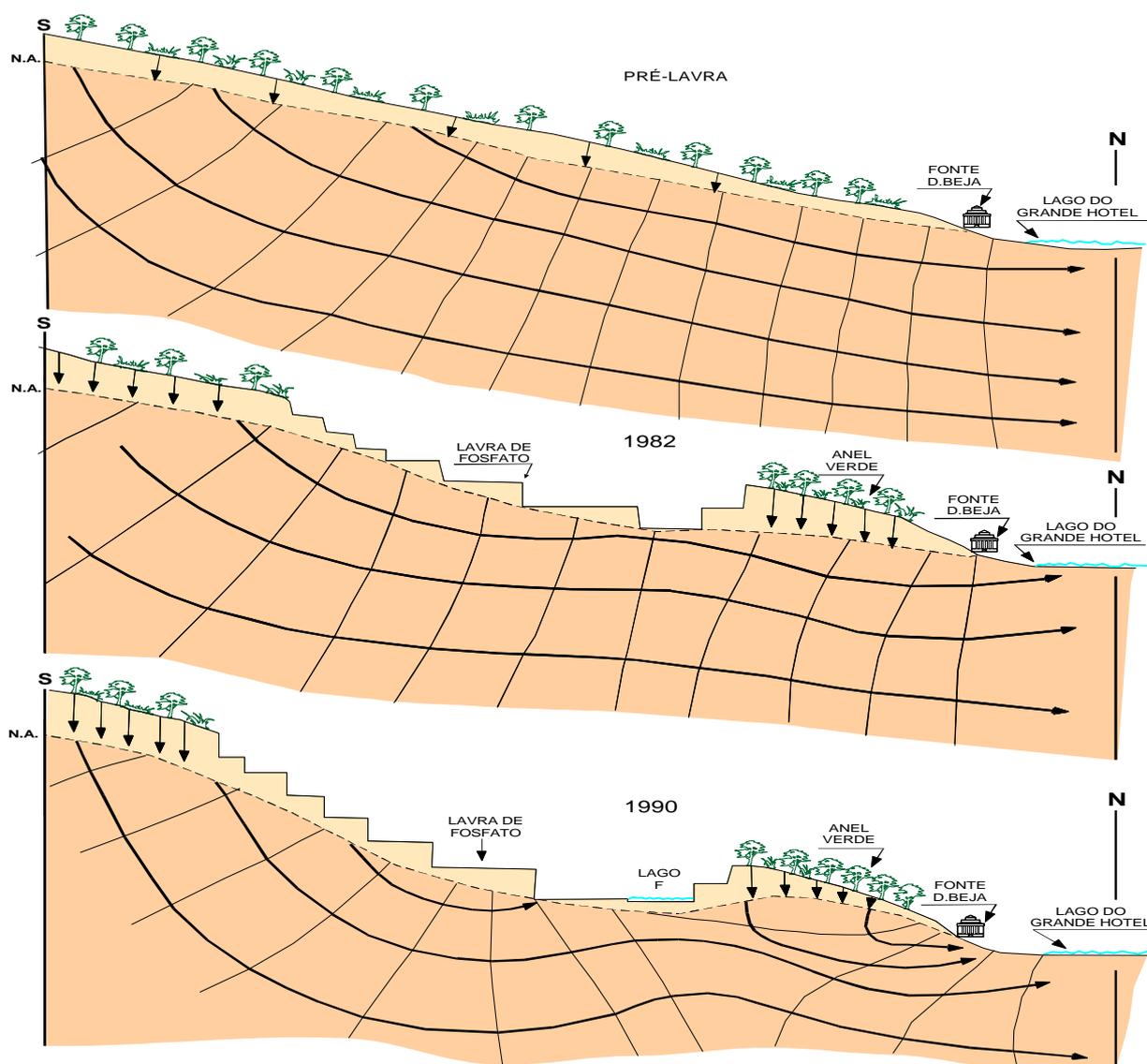
As águas percolando em profundidade adquirem a temperatura ambiente e durante o seu trajeto de ascensão podem ocorrer perdas caloríficas pelo contato com o meio e por misturas com águas de recarga mais próximas da superfície e mais frias. Portanto, a profundidade de percolação das águas sulfurosas pode estar bem acima dos 200 m inicialmente estimados.

O poço de captação da fonte foi perfurado na zona de contato da rocha quartzítica, fraturada e fenitizada com a intrusão carbonatítica, pois segundo observações feitas pelos estudos de GROSSI SAAD *et alii* (1970), no local do lago de maturação da lama, e próximo à fonte, ocorre um afloramento de “uma brecha de quartzito do anel, venulado por diques, soleiras e veios de carbonatito de grão grosseiro” .

A hipótese para a mineralização da água, a partir da sua composição química (rica em sódio e pobre em cálcio), é de que a água de infiltração percola através das fraturas profundas nos quartzitos fraturados e fenitizados (nas proximidades da fonte o quartzito apresenta espessuras de até 500 m), dissolvendo os minerais sódicos (anfíbólio e piroxênio sódicos e feldspatos alcalinos) dos fenitos. Ao atingir o contato com as rochas

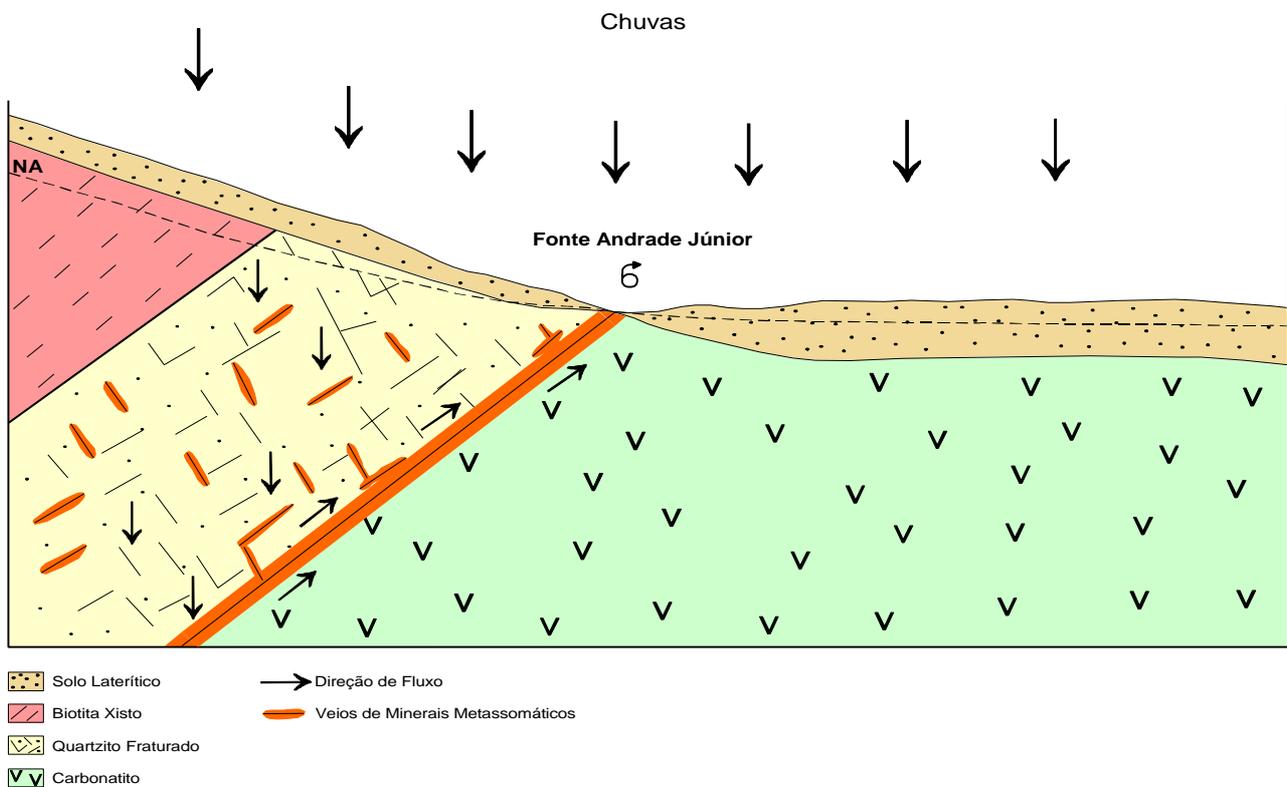


**Figura: 5.2. Vazões da Fonte Beja (1984-1997).** Fonte: Prati, 1994  
Arafertil, 1996-1997



**Figura: 5.3. Esboço das alterações do fluxo subterrâneo decorrente da mina de fosfato**

a montante do Lago do Grande Hotel ou Superior.



**Figura 5.4.** Modelo hipotético da Fonte Sulfurosa.

intrusivas, o escoamento se daria por esta zona, dissolvendo os sulfetos presentes no carbonatito, até aflorar em superfície, justamente onde encontra-se a fonte (figura 5.4).

## 6. HIDROQUÍMICA

Os resultados estatísticos das principais características físico-químicas das águas naturais e contaminadas do aquífero granular encontram-se no quadro 6.1, incluídos os resultados das análises das fontes Beja e Andrade Júnior (Sulfurosa).

As águas naturais do aquífero granular, inclusive minerais, são do tipo bicarbonatadas cálcicas (figura 6.1, pontos 1, 2, 3, 5, 7, 8, A, B, E e F), radioativas - Fonte D. Beja com 146,5 unidades mache (MOURÃO, *op. cit.*), frias (média de 22,9 °C), pH alcalino a levemente ácido (entre 6,09 e 8,90 e média de 7,31), resíduo seco entre 66,7 e 170,0 mg/L (média de 120,6 mg/L) e dureza total entre 30,2 e 117,6 mg/L.

Quanto aos íons principais, predominam o bicarbonato e cálcio, podendo ocorrer algum cloreto na zona de interface (zona de diluição) com a pluma contaminada. Em relação aos elementos menores, destaca-se o fósforo total com valores entre 0,13 e 3,00mg/L, e média de 0,68 mg/L de P. A sílica ocorre com valores entre 4,71 e 10,37

mg/L e média de 6,54 mg/L e nitrogênio amoniacal médio de 0,18 mg/L. O teor de bário situa-se entre 0,50 e 2,03 mg/L (média de 1,35 mg/L).

## CPRM - Serviço Geológico do

PARÂMETROS FISICO-	Máximo		Mínimo		Média		Desvio Pad.		Núm. de		Fonte	Fonte	Fonte
	aquífero	pluma	aquífero	pluma	aquífero	pluma	aquífero	pluma	aquífero	pluma	Beja	Beja 1	Sulfurosa
Data	09-11/1997										23/09/97	31/07/97	24/09/97
Temperatura °C ("in loco")	24,30	25,10	22,00	22,60	22,86	24,20	0,65	0,98	11	4	22,7	22,7	29,1
Turbidez	2,43	0,40	0,30	0,40	1,20	0,40	0,74	0,00	5	3	0,6	0,4	6
Cor	0,00		0,00		0,00		0,00		4		<5	<5	<5
pH	8,90	6,44	6,09	5,69	7,31	6,05	0,67	0,27	11	4	7,00	7,80	9,78
C. Elétrica (uS/cm a)	228,00	3.160,00	71,30	1.014,00	158,13	1.898,25	49,03	858,22	11	4	155,80	149,90	5.800,00
Resíduo Seco	170,00	2.535,00	66,67	760,00	120,57	1.533,00	28,90	673,73	10	4	112,00	98,00	3.818,00
Dur. não Carbonatos	6,40	900,87	0,00	216,40	3,40	474,02	2,63	303,98	3	3		3,80	ND
Dur. de Carbonato	88,50	42,00	66,00	15,00	74,83	28,33	9,80	11,03	3	3		70,00	3,80
Dur.Total (mg/l)	117,60	915,87	30,20	258,40	79,96	516,99	26,30	255,84	10	4	78,00	73,80	3,80
Radioativ. (Mache/-)													44
Bicarbonato ( HCO3-	134,80	48,92	17,08	18,30	90,97	33,28	30,01	10,87	10	4	89,06	85,40	3.257,00
Carbonato ( CO3=	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10	4	ND	0,00	108,00
Cloretos ( Cl- )	22,11	929,71	0,48	264,92	4,30	533,59	6,24	267,04	10	4	3,00	3,57	4,81
Sulfatos ( SO4=	1,90	0,00	0,00	0,00	0,79	0,00	0,63	0,00	9	4	0,30	ND	325,08
Nitritos ( NO2- )	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	10	4	ND	ND	ND
Nitratos ( NO3- )	1,37	4,00	0,00	1,24	0,52	2,36	0,44	1,10	10	4	0,19	0,17	0,42
Cálcio ( Ca++ )	26,81	311,54	7,79	58,78	17,70	155,50	5,43	96,37	10	4	17,00	14,19	0,35
Magnésio ( Mg++ )	9,07	42,32	0,26	19,05	6,41	29,31	2,41	9,22	10	4	7,28	6,95	0,07
Sódio ( Na+ )	5,79	104,73	0,51	48,22	2,13	74,79	1,87	21,51	10	4	0,94	0,86	1333,1
Potássio ( K+ )	4,88	100,30	0,23	18,48	1,81	60,20	1,25	34,47	10	4	2,16	2,23	135,06
Ferro Total ( Fe2 + Fe3	0,86	0,48	0,01	0,01	0,24	0,14	0,27	0,20	8	4	0,273	0,009	0,025
Manganês ( Mn++ )	0,13	0,05	0,00	0,00	0,04	0,02	0,05	0,02	8	4	0,005	ND	0,006
Alumínio ( mg/l Al	0,03	0,12	0,00	0,03	0,01	0,06	0,01	0,04	4	4		<0,010	0,026
Anid. Carbônico (mg/l	4,50		1,10		2,67		1,40		3			2,40	
Arsênio ( mg/l As	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3	2		ND	ND
Bário (mg/l	2,03	44,73	0,50	14,04	1,35	27,34	0,45	13,43	10	4	1,619	1,445	0,078
Cádmio ( mg/l Cd	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3	2		ND	0,001
Chumbo ( mg/l Pb	0,00		0,00		0,00		0,00		3			ND	ND
Cobre ( mg/l Cu	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4	3		<0,003	< 0,003
Cromo Total ( mg/l Cr	0,01		0,00		0,00		0,00		3			<0,005	0,008
Fluoreto ( mg/l F	0,37	0,20	0,10	0,04	0,25	0,15	0,08	0,06	10	4	0,25	0,23	0,84
Fosfato total em P	3,00	0,48	0,13	0,14	0,68	0,29	0,81	0,14	10	4	0,40	0,37	0,72
Lítio (mg/l Li)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3	2		<0,10	0,102
Níquel (mg/l													ND
Silica ( mg/l Si	10,37	7,24	4,71	4,33	6,54	5,93	2,25	1,12	4	4		5,273	6,435
Zinco (mg/l Zn)	0,04		0,01		0,02		0,02		3			0,008	0,007
Selênio (mg/l	0,00		0,00		0,00		0,00		3			ND	ND
Sól.Dissolvidos ( mg/l	121,00	2.108,00	65,00	708,00	90,75	1.221,67	20,81	629,37	4	3		80,00	
Fenóis ( mg/l Fn		0,00		0,00		0,00		0,00		2			
N. Amoniacal ( mg/l N	0,33	4,80	0,09	0,89	0,18	2,71	0,09	1,61	4	3		0,11	9,4
N. Orgânico ( mg/l N	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4	3		ND	ND

**Quadro 6.1.** Resultados estatísticos das análises físico-químicas das águas naturais e da pluma contaminada no aquífero granular e resultados da análises físico-químicas da Fonte Beja, Beja 1 (poço de 25 m de profundidade ao lado da fonte) e Sulfurosa (Andrade Júnior).

É bastante provável que a alta radioatividade encontrada nas águas da Fonte D. Beja (146,5 unidades mache) também seja encontrada nas outras águas do aquífero. Isto devido à presença de minerais radioativos como urânio, tório e monazita, disseminados na rocha carbonatítica.

As águas provenientes da pluma contaminada são cloretadas cálcicas (figura 6.1 pontos 4, 6, A e D), conseqüência do aporte de cloretos da solução contaminante.

Suas principais características são: temperatura média de 24,2 °C; pH entre 5,69 e 6,44; resíduo seco entre 760,0 e 2.535,0 mg/L; dureza total entre 258,4 e 915,9 mg/L; cloretos entre 264,9 e 929,7 mg/L e bário entre 14,04 e 44,73 mg/L.

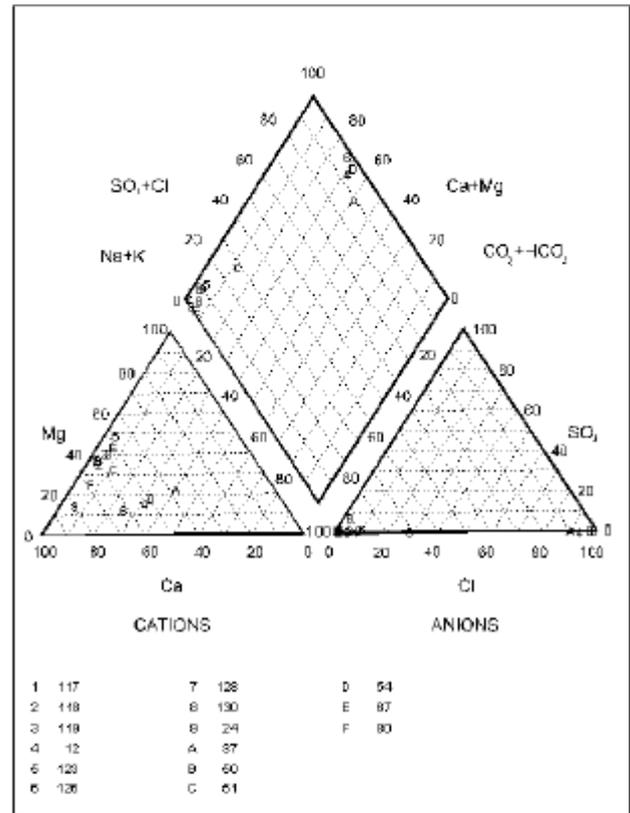
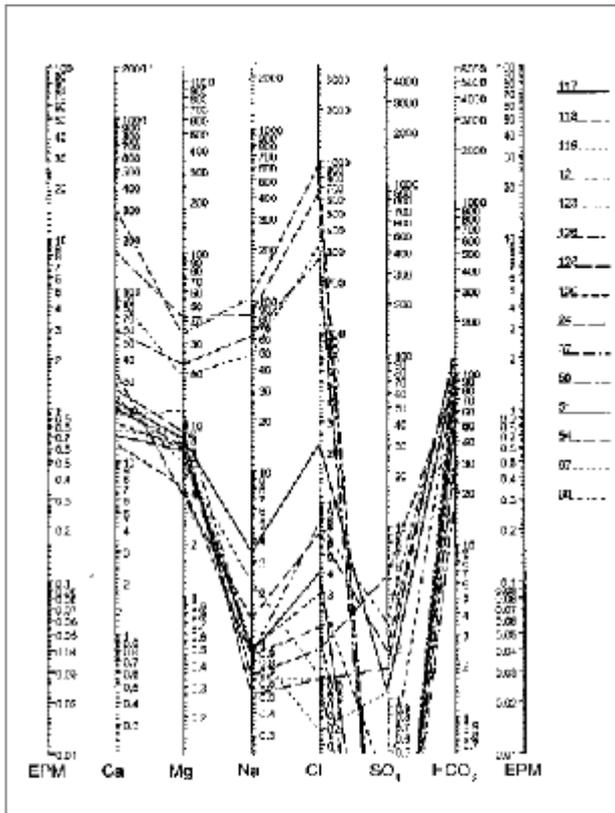


Figura 6.1: Diagramas de Schoeller e Piper das águas do aquífero granular

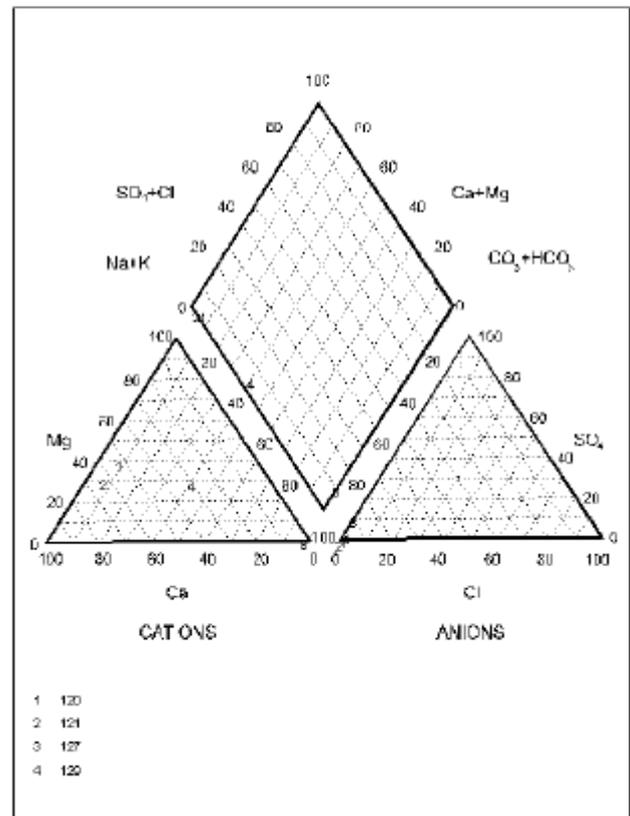
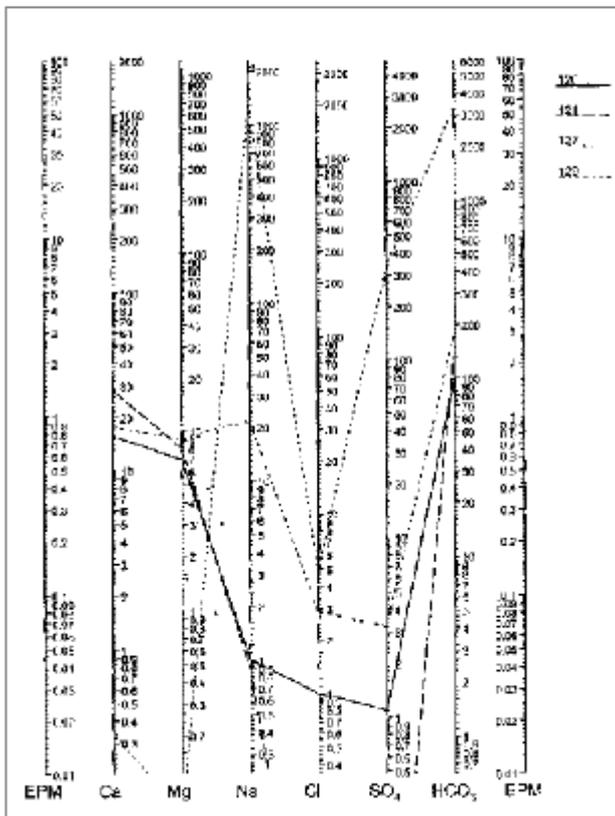


Figura 6.2: Diagramas de Schoeller e Piper das águas do aquífero fraturado

O aquífero fraturado é representado pelas amostras dos poços de abastecimento 120, 121 e Fonte Andrade Júnior. As águas dos poços são bicarbonatadas cálcicas (figura 6.2, pontos 1 e 2) com valores médios de temperatura de 22,8 °C; resíduo seco 136,5 mg/L; dureza total 94,3 mg/L; e pH 7,32.

Predominam o ânion bicarbonato e o cátion cálcio, seguido de sódio. Os valores médios dos principais elementos traços são: bário 0,52 mg/L; fosfato total 0,19 mg/L; sílica 7,98 mg/L; e N amoniacal com 0,29 mg/L.

As águas da Fonte Andrade Júnior e de uma pequena surgência próxima, consideradas como do aquífero fraturado profundo, são bicarbonatadas sódicas (figura 6.2, ponto 3), sulfatadas, radioativas - 44 unidades mache (MOURÃO, *op. cit.*), hipotermiais (29,1-32,4 °C), alcalinas (pH 9,8), resíduo seco em torno de 3.800 mg/L e dureza total de 3,8 e 2,8 mg/L.

Predominam os ânions bicarbonato (3.257,0 mg/L) e sulfatos (325,1 mg/L) e cátions sódio (1.333,1 mg/L) e potássio (135,1 mg/L). Os outros íons principais encontram-se com teores bastante reduzidos. O bário ocorre com teor de 0,08 mg/L, fosfato total 0,74 mg/L de P e sílica com até 6,44 mg/L.

As diferenças de composição entre as águas do aquífero fraturado estão relacionadas ao tipo litológico, tempo de trânsito e profundidade por onde percolam. As águas da Fonte Andrade Júnior percolam por terrenos profundos e ricos em minerais sódicos (fenitos) e sulfetados (carbonatitos) e quando captadas do aquífero fraturado em rochas quartzíticas superficiais, são pouco mineralizadas devido ao pouco tempo de trânsito e da provável escassez de fenitos, possivelmente, já solubilizados nos horizontes mais próximos da superfície ou até, ausentes.

## **6.1 CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS POR BÁRIO**

O bário é um elemento bastante raro na crosta terrestre. Encontrado substituindo o potássio nos feldspatos, em alguns minerais de rochas ígneas (Witherita) e no mineral barita ( $BaSO_4$ ) que apresenta baixa solubilidade ocasionando a escassa presença de bário em soluções.

No Barreiro, os elevados teores de bário começaram a ser detectados em 1982, após análises da água do lago da barragem B4 que recebia os efluentes do processo de beneficiamento do minério de nióbio. Para a concentração do minério, o pirocloro ( $BaNb_2O_6$ ) era calcinado com cloreto de cálcio onde o bário é substituído pelo cálcio,

formando, como um dos produtos finais, cloreto de bário ( $\text{BaCl}_2$ ) que é um sal altamente solúvel. O cloreto de bário era então descartado e lançado na barragem de rejeito B4, juntamente com outros resíduos. A partir da massa de rejeito, o bário contaminou as águas superficiais e, principalmente, as subterrâneas.

A solução adotada foi a introdução, nos corpos d'água, de sulfato de sódio que em solução com o cloreto de bário forma barita, mineral pouco solúvel e abundante na área ( $\text{BaCl}_2 + \text{SO}_4\text{Na}_2 \leftrightarrow \text{BaSO}_4 + 2 \text{ClNa}$ ). A neutralização foi, e continua sendo feita, através da injeção ininterrupta de sulfato de sódio, por meio de poços infiltradores localizados em pontos estratégicos a jusante da barragem e na área assoreada do lago B4. A solução também é lançada no lago da barragem B4 e no canal que recebe a água bombeada dos poços de sangria e do lago B4, rebaixando desta maneira o teor de bário das águas superficiais.

Os resultados do monitoramento químico nos poços (considerados a partir de 1989) mostram valores da ordem de até 37,3 mg/L de bário. Os maiores valores situam-se justamente na posição atual da pluma contaminada, próximo à barragem "A".

A análise das figuras 6.3 A e B que mostram a situação da pluma contaminada em jun/1989 e jun/1997, a partir dos teores de bário independente das profundidades amostradas, indica que houve um deslocamento da pluma para a área do antigo depósito de estéril da CAMIG e a montante, em direção à barragem B4, justamente onde não operavam poços de sangria. Isto indica que as medidas de bombeamento e neutralização contínua, executadas na área da barragem B4 e ao longo do córrego da Mata, apresentaram efeitos positivos. Ao mesmo tempo, comprova a necessidade de atitudes similares na área onde atualmente encontra-se a pluma.

Estudos realizados entre 1991 e 1995 por PRATINI DE MORAES (1995), indicaram o aumento dos teores de bário e cloretos nas águas da Fonte Beja e do córrego Baritina, possivelmente relacionado à presença próxima da pluma contaminada. Todavia, resultados do monitoramento realizado em junho de 1997, na Fonte Beja, apresentaram valores menores do que os de 1994, provavelmente devido a variações sazonais de recarga, não descartando o risco de contaminação do manancial que abastece a fonte.

Talvez a explicação para que a presença da pluma contaminada ainda não tenha sido efetivamente detectada na área do parque Anel Verde, seja a maior contribuição da recarga oriunda da área da mina da fosfato e do parque, juntamente com as barragens de recarga, que favorecem a diluição da água contaminada e impedem o avanço da pluma.

Alterações do volume de descarga, como o aumento nas taxas de bombeamento dos poços do parque Anel Verde acima da taxa de recarga, criarão um gradiente que

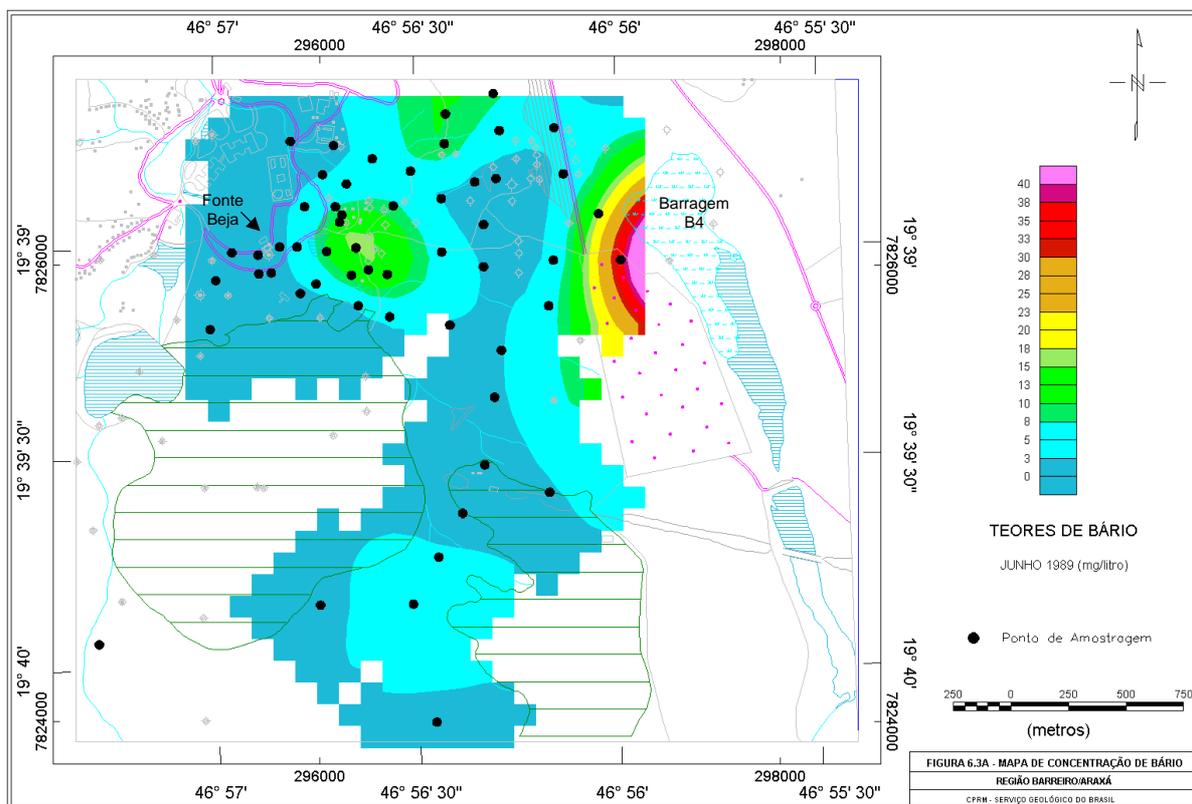


Figura 6.3. A: Mapa de concentração de bário em junho de 1989.

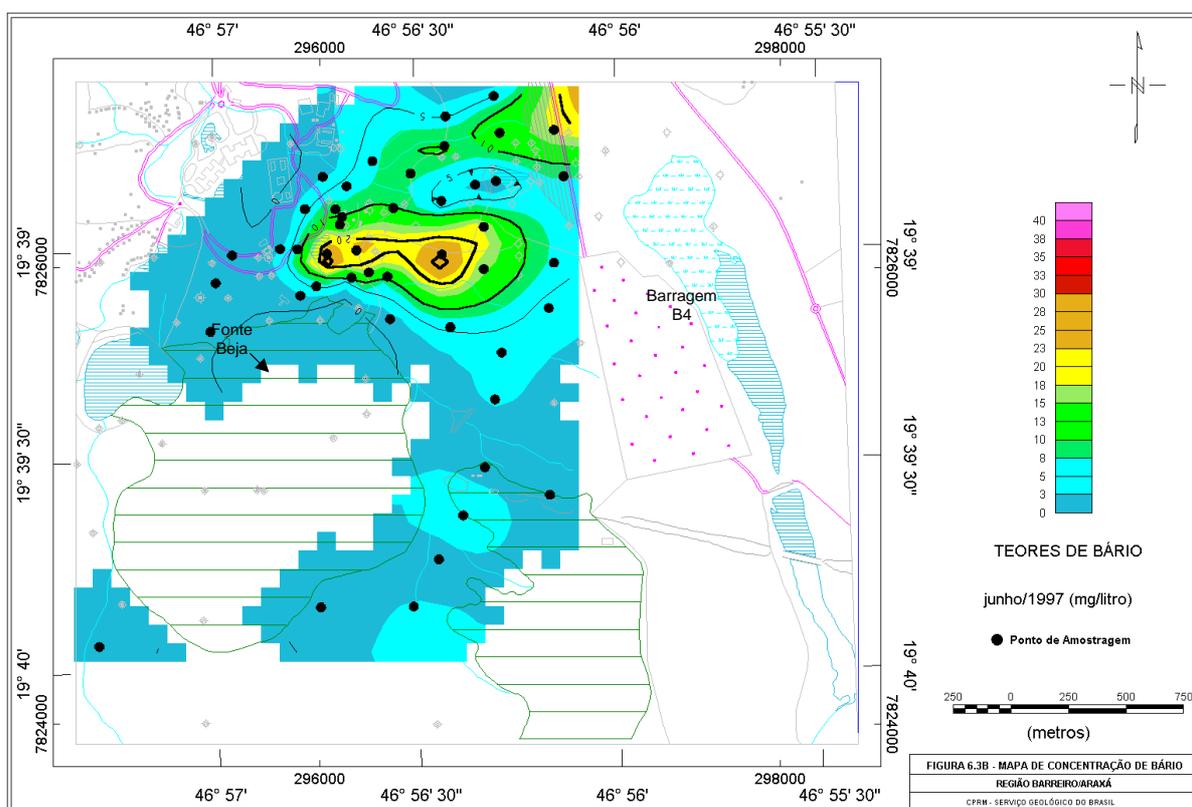


Figura 6.3 B: Mapa de concentração de bário em junho de 1997.

induzirá o fluxo na direção do Anel Verde, podendo contaminar esta zona do aquífero.

O bário também foi encontrado no ponto 129, um poço tubular no aquífero fraturado, vizinho ao Lago Inferior. O teor de 2,5 mg/L é anômalo em relação aos outros dois poços do mesmo aquífero (0,6 e 0,4 mg/L). Sua presença, provavelmente, é resultado da contaminação do lago receptor das águas superficiais da área contaminada.

Em poços fora da área da pluma, em águas naturais do aquífero granular, nota-se que os teores de bário são relativamente baixos, da ordem de 1,35 mg/L em média, oriundo da dissolução do carbonato de bário existente nas rochas do Complexo.

Outra observação a partir dos poços de monitoramento multiníveis, é o aumento dos teores com a profundidade da água captada. Isto está de acordo com o sistema de recarga pluvial predominante, onde águas com menos tempo de residência apresentam menor mineralização e conseqüentemente menores teores de bário.

## **6.2 QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

Quanto à qualidade, as águas naturais apresentam valores acima do permitido pela legislação, de bário no aquífero granular e nitrogênio amoniacal no aquífero granular e fraturado. O valor máximo de bário permitido pela legislação brasileira para águas de consumo humano e minerais é de 1,0 mg/L e a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) estabelece um máximo de 2,0 mg/L (FETTER, 1994, p437).

O bário é um metal que pode provocar intoxicações agudas e sua ação se dá sobre a célula muscular aumentando o tônus muscular e a pressão arterial. Localiza-se no tecido ósseo, muscular, medula óssea, baço, pulmão e mucosa intestinal.

As águas provenientes da pluma contaminada encontram-se poluídas por cloreto de bário e pela solução neutralizante de sulfato de sódio. Esta contaminação aumentou consideravelmente os teores de cloreto de sódio e bário, inviabilizando o uso para consumo humano. Nesta área, os teores médios de bário são da ordem de 18,0 mg/L.

As águas naturais do aquífero Barreiro apresentaram teores de bário entre 0,5 e 2,0 mg/L. O bário tem origem nos minerais das rochas carbonatíticas, onde ocorre como barita (pouco solúvel) e sob a forma de carbonato de bário de onde é solubilizado. No aquífero fraturado, o bário ocorre com teores baixos (0,52 mg/L), inclusive nas águas profundas da Fonte Andrade Júnior (0,08 mg/L). O nitrogênio amoniacal ocorre de forma generalizada, atingindo valores elevados de até 2,45 mg/L. Possivelmente, tem origem na decomposição da matéria orgânica existente no solo e, devido à infiltração relativamente

rápida, a água enriquecida em nitrogênio amoniacal atinge a zona saturada sem transformações ou retenções no solo.

## 7. CONCLUSÕES

- Os aquíferos são do tipo granular, livre a semiconfinado no manto de intemperismo das rochas do Complexo Carbonatítico e rochas encaixantes (quartzitos e xistos), e fraturado livre a semiconfinado nos quartzitos, xistos e carbonatitos.

- A recarga do aquífero granular e da Fonte Dona Beja dá-se por infiltração de águas pluviais em cotas mais elevadas e das águas acumuladas nos lagos das barragens “E”, “F”, “A”, “B” e “G”, escoando por linhas de fluxo convergentes até a zona de descarga que são os lagos no Parque das Águas.

- A recarga do aquífero fraturado dá-se por infiltração direta de águas pluviais nos poucos pontos de afloramento e solo residual sobreposto às rochas. A percolação pode atingir grandes profundidades em razão da espessura e fraturamento dos quartzitos.

- Existem 131 pontos d’água entre poços de abastecimento, monitoramento químico e piezométrico, extração de água mineral e nascentes. A maioria é utilizada no monitoramento e neutralização da pluma contaminada e rebaixamento do nível freático.

- A manutenção e a limpeza parcial dos poços de monitoramento podem causar resultados físico-químicos e piezométricos errôneos.

- Existem 39 poços desativados, por motivos diversos, sem terem sido adequadamente cimentados de maneira a evitar os riscos de contaminação direta ao aquífero.

- A água da Fonte Andrade Júnior é alcalina, bicarbonatada sódica, sulfatada, radioativa, hipotermal, e proveniente dos quartzitos intensamente fraturados, preenchidos por minerais sódicos (fenitos). Provavelmente a percolação atingiria grandes profundidades (centenas de metros) até a zona de contato com os carbonatitos, aflorando em superfície justamente no contato superficial entre as unidades litológicas.

- As águas naturais do aquífero granular são bicarbonatadas cálcicas, oligominerais, frias, radioativas, alcalinas a levemente ácidas. Os teores de bário situam-se em torno de 1,4 mg/L e originam-se da dissolução do carbonato de bário do carbonatito.

- As águas contaminadas são do tipo cloretadas cálcicas, frias, duras, ácidas a alcalinas, com teores de bário e cloretos elevados (média de 27,3 e 533,0 mg/L).

- Existe um zoneamento vertical de teores de bário no aquífero granular não contaminado, onde horizontes superficiais apresentam os menores teores.

- O deslocamento contínuo da pluma contaminada em direção ao Parque das Águas e sua atual proximidade sugere risco de contaminação da Fonte D. Beja. A maior recarga oriunda da porção sul favorece a diluição e impede o avanço da pluma.
- As águas estão parcialmente comprometidas pelo bário, encontrado naturalmente nas águas profundas do aquífero granular, e cloreto de bário oriundo da contaminação.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEATO, D. A. C., colab. Hidrogeologia. *In: Projeto Araxá: estudo geoambiental das fontes hidrominerais*. Belo Horizonte: MME/CPRM/COMIG, 1999. 65-101p.
- CUSTODIO, E., LLAMAS, M. *Hidrologia Subterrânea*. Barcelona. Omega, 1983. 2350p.
- DAVIS, E. G., colab. Hidrologia e qualidade das águas superficiais. *In: Projeto Araxá: estudo geoambiental das fontes hidrominerais*. Belo Horizonte: MME/CPRM/COMIG, 1999. 29-64p.
- FETTER, C. W. *Applied Hydrogeology*. Englewood Cliffs. Prentice Hall, US. 1994. 691p.
- GROSSI SAAD, J. H., TORRES, N. *Geologia e Recursos Minerais do Distrito do Barreiro, Araxá, MG*. Brasília: DNPM, 1970. 35p.
- ISSA FILHO, A., LIMA, P. R. A. dos S., SOUZA, O. M. de. *Aspectos da geologia do Complexo Carbonatítico do Barreiro, Araxá, MG, Brasil*. São Paulo: CBMM, 1984.44p.
- PRATINI DE MORAES, J. A. *A neutralização da contaminação de BaCl<sub>2</sub> no Barreiro de Araxá*: Relat. final. Belo Horizonte: ECOS Geologia, Consult. e Serviços, 1995. 33p. il. [Projeto Monitoramento Hidrogeológico do Barreiro/CBMM - Relat. interno].
- \_\_\_\_\_. *Avaliação do impacto hidrogeológico da mineração de fosfato no Barreiro de Araxá*. B. Hte: ECOS Geologia, Consult. e Serviços, 1990. 56p. il. [Projeto Monitoramento Hidrogeológico do Barreiro/Arafértil - Relat. interno].
- \_\_\_\_\_. *Monitoramento hidrogeológico do Barreiro de Araxá: Relatório 1º semestre*. B. Horizonte: ECOS Geologia, Consult. e Serviços, 1989. 19p. il. [Projeto Monitoramento Hidrogeológico do Barreiro/Arafértil - Relat. interno].
- \_\_\_\_\_. *Medição de vazão da Fonte Beja*: Inf. Técnico. B. Hte.: ECOS Geologia, Consult. e Serviços, 1984. 16p.il. [Proj. Monit. Hidrogeológico do Barreiro/Arafértil–Relat. Int.].
- PROJETO Araxá: estudo geoambiental das fontes hidrominerais. Belo Horizonte: MME/CPRM/COMIG, 1999. 125p. [Inclui mapas].

MAGALHÃES, M. C. *A estância de Araxá*. Assoc. Médica, 1945. 124p.il

MOURÃO, B. M. *Medicina hidrológica*. Poços de Caldas. Sec. Municipal de Educação.  
[1990]. 731p.

VIANA , H. S., org. Caracterização geológica, uso e ocupação do solo, *In: Projeto Araxá: estudo geoambiental das fontes hidrominerais*. Belo Horizonte: MME/CPRM/COMIG, 1999. 1-28p.