

# HIDROGEOLOGIA DA BACIA DO RIO SÃO MIGUEL, MUNICÍPIOS DE PAINS E ARCOS - MG

Frederico Soares Dias<sup>(1)</sup> & Leila Nunes Menegasse Velásques<sup>(2)</sup>

**RESUMO.** Este estudo foi desenvolvido na Bacia do Rio São Miguel, em Minas Gerais. A área estudada é dominada, em sua maior parte, por calcários e dolomitos neoproterozóicos do Grupo Bambuí, nos quais se instalou um relevo cárstico com feições exuberantes, sendo que apenas em sua porção leste afloram o pelito sotoposto às rochas carbonáticas e o embasamento granito-gnáissico. Os recursos hídricos subterrâneos desta área são muito utilizados, sendo importantes para o abastecimento público e para atividades industriais e comerciais. Foram estudados dois aquíferos importantes, sendo um cárstico e outro fissural, este último instalado no embasamento granito-gnáissico arqueano. Apenas 27,5 % dos poços estão associados a alguma estrutura identificável em fotografias aéreas ou nos reconhecimentos de campo, tendo estes os melhores resultados para os parâmetros hidráulicos. Foram identificadas, através do estudo das feições morfoestruturais, as direções preferenciais para o fluxo subterrâneo atual (N50-60W e E-W), além de direções que representam um fluxo subterrâneo pretérito (N0-30W e N70-80E), alterado provavelmente pela ação do neotectonismo que afetou a região. Quanto à potabilidade, há restrições relacionadas a teores elevados em Fe e Mn em 73,3 % dos poços tubulares analisados, bem como há contaminação bacteriológica em 60 % destes.

**ABSTRACT.** This study was developed in the São Miguel River basin, Minas Gerais. The area in question is dominated in most of it, by limestones and dolomites of the Bambuí Group, in which a karstic relief has been installed with exuberant shapes, being so only the east portion arises pelite and the archean granitoids of the regional basement. The area's groundwater resources are widely used, being very important as public supply and for the industrial and commercial sectors. It has been identified two important aquifer, being one of them karstic and the one fissural, being the last

---

<sup>(1)</sup> COPASA-MG, Divisão de Águas Subterrâneas. Rua Mar de Espanha, nº 453, Belo Horizonte. Tel. (31) 3250 2312. E-mail [dvas2@copasa.com.br](mailto:dvas2@copasa.com.br)

<sup>(2)</sup> UFMG, Instituto de Geociências. Campus da Pampulha, Belo Horizonte. Tel. (31) 3499 5446. E-mail [menegasse@dedalus.lcc.ufmg.br](mailto:menegasse@dedalus.lcc.ufmg.br)

one installed in the arquean basement. Only 27,5% of the wells has been associated with some structure identifiable by aerial photos or field recognitions, having the last one better results for the hydraulic parameters. It has been identified two preferential directions for a past underground flow (N0-30W and N70-80E), which differentiate themselves from the main directions of the actual flow which are N50-60W and E-W. As regard of the potability, there is restrictions regarding the quantity of Fe and Mn in 73,3% of the piped wells, as well as bacteriological contamination in 60% of them.

**Palavras - chave:** Hidrogeologia; Carste.

## INTRODUÇÃO

A bacia do rio São Miguel, com uma área de cerca de 505 km<sup>2</sup>, posiciona-se no extremo meridional da bacia do rio São Francisco, em Minas Gerais (Fig. 1). Ali se desenvolveu, em rochas carbonáticas, um carste com magníficas feições (cavernas, dolinas, sumidouros, surgências, torres, etc.). Apenas na parte leste da área afloram o pelito sotoposto às rochas carbonáticas e o embasamento granito gnáissico. As litologias presentes nesta bacia formam aquíferos que são explorados tanto para abastecimento público quanto para atividades industriais e comerciais.

Este trabalho apresenta os resultados de um estudo hidrogeológico da bacia do rio São Miguel, que teve o objetivo de pesquisar os recursos hídricos subterrâneos da área, no que diz respeito à sua ocorrência, qualidade e principais direções de fluxo, de modo a fornecer subsídios para um planejamento racional de sua utilização.

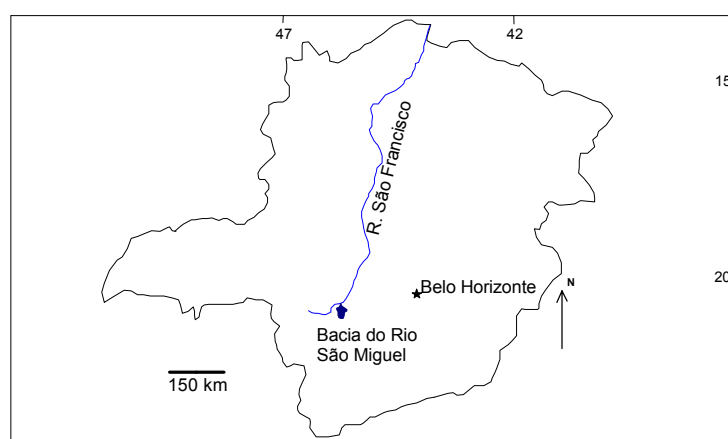


Fig. 1 – Mapa de Localização.

Os estudos envolveram pesquisa bibliográfica, fotointerpretação, mapeamento geológico, coleta e interpretação de dados hidráulicos de poços tubulares, estudo das direções dos canais de dissolução, interpretação de análises físico-químicas e realização de análises bacteriológicas, culminando com a integração destes dados.

## ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

Na maior parte da bacia do rio São Miguel (cerca de 80%), predomina um relevo cárstico, definido pela dissolução de rochas carbonáticas do Grupo bambuí. São comuns lapiás, dolinas, uvalas e cavernas. Apenas o extremo leste da área é dominado pelo embasamento cristalino. As altitudes variam de 630 a 875 metros.

Segundo Saadi *et al* (1998 [1]), a evolução geomorfológica da área se deu sob influência de atividade neotectônica, num contexto que favoreceu a reativação de estruturas antigas. As várias fases de evolução do carste, durante o Terciário e o Quaternário, se relacionam, ou com a simples presença de antigas falhas (controle passivo), ou com a movimentação de outras (controle ativo).

Ao sul da cidade de Pains as feições cársticas são exuberantes, com escarpamentos dominados por torres e inúmeras dolinas, cavernas e sumidouros, sendo que vários cursos d'água não alcançam diretamente o Rio São Miguel, coletor local, de direção geral N-S. Na porção leste-nordeste da bacia, ocorre uma depressão drenada pelo Rio Candongas (afluente do Rio São Miguel), com direção N30W, denominada Graben de Arcos, de idade pleistocênica (Saadi *et al*, op. cit.).

No carste, a drenagem subterrânea predomina sobre a superficial, sendo que, nas partes mais carstificadas quase não se vêem riachos. A Figura 2 mostra o mapa de drenagem superficial da bacia do rio São Miguel, nota-se que na porção sudeste da área, a mais carstificada, a drenagem superficial quase desapareceu, dando lugar ao escoamento subterrâneo.

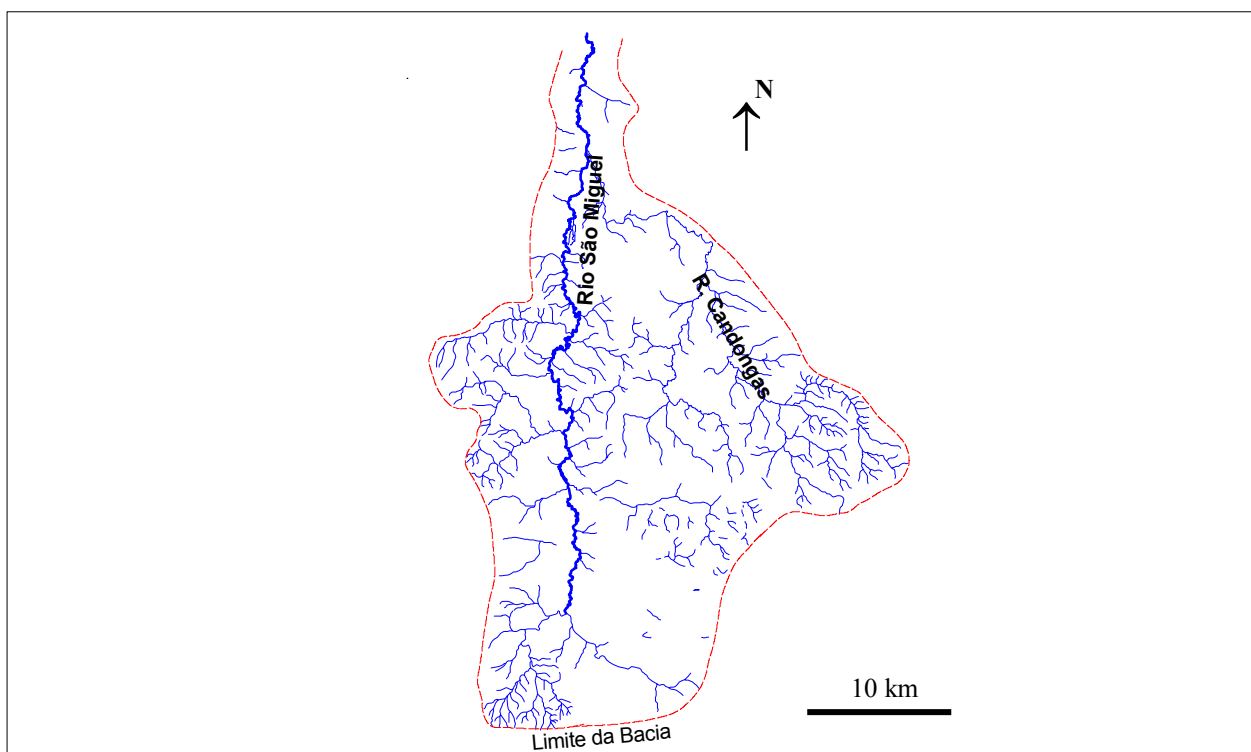
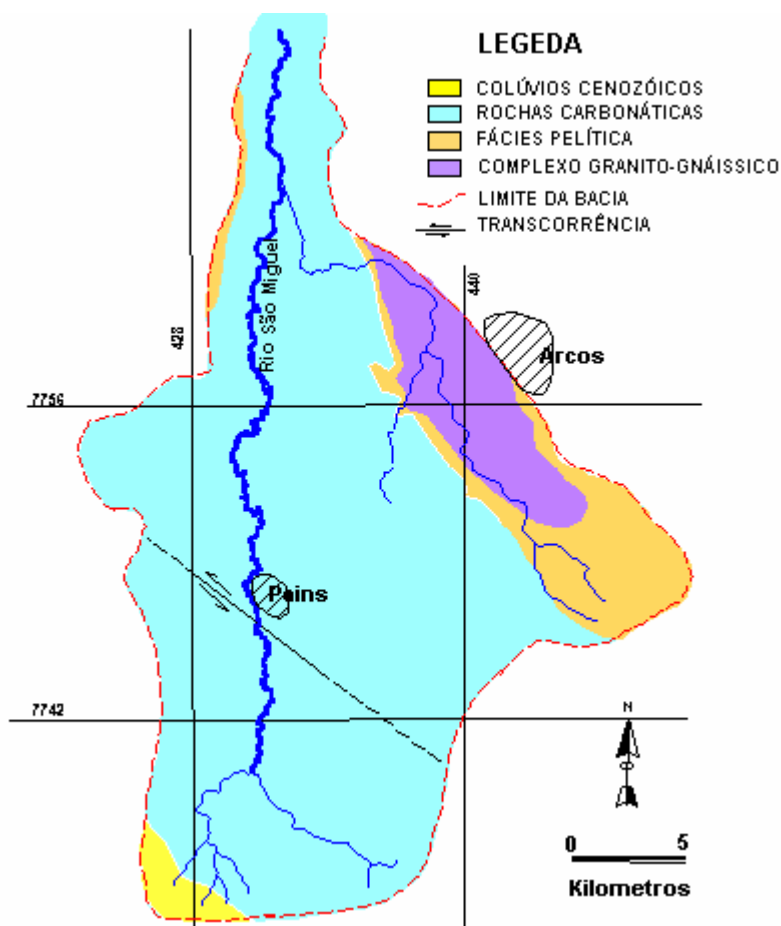


Fig. 2 – Mapa de drenagem superficial.

A vegetação nativa predominante da região é o cerrado (savana), com gradações que vão das gramíneas do “campo limpo” à vegetação densa e de maior porte do “cerradão”. Revestindo afloramentos calcários, encontra-se uma vegetação de floresta estacional decidual, que se caracteriza pela perda de folhas na estação seca, com recuperação na época das chuvas (RADAM Brasil, 1983 [2]). A cobertura vegetal nativa encontra-se, em grande parte, degradada pela atividade agropecuária e pela mineração.

### CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DA ÁREA

Na Bacia do Rio São Miguel ocorrem litologias do Complexo Granito-Gnáissico e do Grupo Bambuí, além de sedimentos cenozóicos. A Figura 3 mostra um esboço geológico da Bacia do Rio São Miguel.



## O Complexo Granito-gnáissico

O Complexo Granito-gnáissico aflora apenas no extremo leste da área estudada e quase sempre se encontra bastante alterado. Apenas no leito de um córrego, tributário do Rio Candongas, ocorrem blocos de rocha sã com dimensões decimétricas a métricas. Trata-se de um granitóide cinza claro, de granulação grossa, foliação incipiente, composto essencialmente por quartzo, feldspatos e biotita. Em alguns locais, onde aflora rocha bastante alterada, é possível observar bandamento gnáissico, veios pegmatíticos de composição quartzo-feldspática e veios de quartzo.

As rochas deste complexo arqueano formam o embasamento da seqüência pelito-carbonatada do Grupo Bambuí na região, tendo com estas um contato erosivo e irregular.

## O Grupo Bambuí

A seqüência sedimentar do Grupo Bambuí repousa sobre o Complexo Granito-gnáissico, na área estudada, de modo descontínuo. A base é constituída por pelitos e margas, sobrepostas por calcários e dolomitos variados que, em conjunto, constituem a unidade de maior espessura e distribuição areal na Bacia do Rio São Miguel. Foram diferenciadas as fácies descritas a seguir, da base para o topo.

A Fácies Pelítica é composta principalmente por argilito sericítico, de coloração castanho-amarelada a castanho-esverdeada, ocasionalmente com tonalidades róseas. Geralmente com laminações plano-paralelas e metamorfismo insipiente. Ocorrem intercalações centimétricas a decimétricas de siltito. Esta fácies foi depositada sobre a superfície erodida e irregular do embasamento cristalino, e aflora principalmente na porção leste da bacia. O contato com as margas que a sobrepõem é gradacional. Sua espessura pode atingir os 15 metros.

A Fácies Marga aflora na porção leste da bacia, sobre os pelitos, com uma espessura de cerca de 25 metros. As margas são finamente laminadas ou com estratificação plano-paralela a levemente ondulada. Ocorrem nas cores cinza, cinza esverdeado, bege e rósea. Os planos interestratais são freqüentemente marcados por lâminas argilosas. Os contatos inferior e superior são gradacionais, marcados pelo aumento crescente do teor de carbonato, sendo que, no topo da unidade, aparecem calcilitos impuros.

A Fácies Calcário Inferior tem na base calcilitos negros, com estratificação centimétrica, plano-paralela, às vezes levemente ondulada, com lentes pelíticas interestratais, geralmente submilimétricas. Tais lentes diminuem à medida que a granulometria e a espessura dos estratos aumentam, da base para o topo, gradativamente, passando a calcarenito cinzento. Este calcarenito está disposto em estratos decimétricos a métricos, às vezes com marca de onda, gradando para calcarenito maciço ou com estratificações cruzadas, de pequeno a médio porte, no topo da unidade. Tal rocha encontra-se freqüentemente em paredões com muitos condutos de dissolução cárstica.

Localmente ocorrem concreções silicosas elipsoidais de dimensões centimétricas. A espessura desta unidade varia entre 40 e 60 metros e seu contato superior é erosivo.

Esta fácies é cortada por lentes de brechas ou calcirrudito de dimensões métricas, com clastos lamelares, centimétricos a decimétricos, de calcilutito. Podem ser suportados pelos clastos ou por matriz, que varia de calcilutito a calcarenito, com predominância do primeiro.

A Fácies Dolomito é composta por rochas carbonáticas de coloração cinza clara a Média, de aspecto superficial característico, com saliências pontiagudas e irregulares, razão pela qual são conhecidas como “pedras cascudas”. Costumam formar feições cársticas do tipo lapiás nos paredões em que afloram. Possuem maior resistência ao choque, consumindo mais explosivos para serem lavradas. Apesar de menos solúveis que as unidades calcíticas apresentam-se, também, carstificadas. A espessura da unidade está entre 20 e 25 metros e seus contatos superior e inferior são erosivos.

Tem na base um dolomito calcífero, maciço, com cristais de calcita branca e negra preenchendo fraturas e cavidades. Segue, separado por contato erosivo, um dolomito com laminações plano-paralelas ou onduladas, com grande quantidade de estromatólitos colunares.

O Calcário Estromatolítico constitui uma fácies formada por Calcário de coloração negra, micrítico, maciço. Contém estromatólitos estratiformes com cerca de 20 cm de altura. Podem ocorrer concreções silicosas e elipsoidais de dimensões centimétricas a decimétricas.

## **Sedimentos Cenozóicos**

Colúvios cenozóicos ocorrem no extremo sudoeste da área e em pequenos pontos isolados nas partes topograficamente mais elevadas. Trata-se principalmente de sedimentos conglomeráticos, suportados por fragmentos de rocha pelítica, podendo ocorrer níveis com seixos carbonáticos e pelíticos. A granulometria dos seixos diminui da base para o topo do pacote coluvionar.

## **Geologia Estrutural**

A região estudada insere-se no contexto geotectônico do extremo sudoeste do Cráton São Francisco, tendo sido afetada pelo tectonismo brasileiro, atuante na Faixa Brasília, durante o Proterozóico Superior. O esforço tectônico teve vergência para leste e gerou o cavalgamento do Grupo Canastra (quartzitos, filitos e xistos do Proterozóico Médio) sobre rochas do Grupo Bambuí, a oeste da área estudada. O grau de deformação no Grupo Bambuí aumenta de leste para oeste (Dardenne, 1978 [3]; Alkimim et al, 1996 [4]).

Magalhães (1988 [5]), fez um estudo sobre a geologia estrutural da região em que se insere a bacia do rio São Miguel. Segundo este estudo, as rochas do G. Bambuí na área foram afetadas por uma tectônica deformacional proterozóica, representada principalmente por falhamentos

inversos/empurrão e transcorrências sinistrais, que podem ser inseridos dentro de uma única deformação progressiva. Segundo este autor, a parte oeste da bacia do rio São Miguel insere-se num domínio estrutural caracterizado pela constante transcorrência de falhas com direção N60W, responsáveis pela rotação de elementos de direção N-S e estruturas associadas. A tectônica de empurrão e transcorrência gera um quadro estrutural complexo e, em Pains, provocou a justaposição, lado a lado, de áreas com calcários horizontais e dobrados. Nas porções central e leste da bacia do rio São Miguel, as rochas do Grupo Bambuí encontram-se horizontalizadas.

Segundo Saadi (1991 [6]), a região foi afetada por eventos tectônicos durante o cenozóico (neotectônica), sendo que o Graben de Arcos, localizado na parte leste da Bacia do Rio São Miguel, estava ativo no Pleistoceno. Tal estrutura tem direção N30W, e nele se instalou a calha do Rio Candongas, afluente da margem direita do Rio São Miguel.

## BALANÇO HÍDRICO E CLIMÁTICO

O balanço hídrico-climático da Bacia do Rio São Miguel foi feito por Menegasse *et al* (2000 [7]), a partir de dados de temperatura e pressão das estações pluviométricas de Iguatama, Arcos e Fazenda Olhos D'água. Os resultados indicam a existência de dois períodos distintos: um com excedente hídrico, de novembro a abril, e outro com deficiência hídrica, de maio a setembro, com reposição no mês de outubro. Ver tabelas 1 e 2.

MÊS	TEMPERATURA (°C)	PRECIPITAÇÃO (mm)	DESCARGA (m <sup>3</sup> /s)
Janeiro	22,5	234,7	11,04
Fevereiro	22,6	151,8	9,14
Março	22,1	132,8	6,10
Abril	20,4	81,9	3,44
Maio	18,3	45,8	2,00
Junho	16,8	18,6	1,72
Julho	16,4	22,6	1,05
Agosto	17,9	20,5	0,81
Setembro	19,9	59,4	0,85
Outubro	21,1	107,9	1,09
Novembro	21,5	173,1	2,27
Dezembro	21,8	271,0	9,70
MÉDIA ANUAL	20,1	1319,0	4,10

Tab. 1 - Valores médios de temperatura, precipitação e descarga para a Bacia do Rio São Miguel, entre 1975 e 1989.

A Bacia do Rio São Miguel, com uma vazão média de 7,6 m<sup>3</sup>/s, conta com uma contribuição subterrânea de 68,5% do escoamento total e 23% da precipitação. A contribuição subterrânea (cerca de 0,166 km<sup>3</sup>/ano) predomina sobre a superficial durante todo o ano, sendo mais preponderante nos meses mais secos, entre abril e outubro, chegando a 95% em julho e 54% em dezembro (parâmetros hidrológicos na Tabela 3). Há um súbito aumento do escoamento subterrâneo entre novembro e dezembro, indicando haver boas condições de recarga.

Precipitação	1325 mm/ano
Evapotranspiração Potencial	937 mm/ano
Evapotranspiração Real	834 mm/ano
Deficiência Hídrica	104 mm/ano
Excedente Hídrico	491 mm/ano

Tab. 2 - Balanço hídrico-climático da Bacia do Rio São Miguel, segundo Menegasse *et al* (2000).

BACIA DO RIO SÃO MIGUEL	MÉDIA	MÍNIMA	MÁXIMA
Escoamento Total (mm)	465	171	1075
Vazão Específica (x10 <sup>-3</sup> ) (m <sup>3</sup> /S/Km <sup>2</sup> )	10,1	4,2	23,6
Excedente Hídrico (mm)	491	165	926
Precipitação Média (mm)	1325	987	1835
Escoamento Subterrâneo (% do Total)	68,5	56,8	79,9
Escoamento Subterrâneo (% da Precipitação)	23,3	13,3	40,6

Tab. 3 - Parâmetros hidrológicos da Bacia do Rio São Miguel.

## HIDROGEOLOGIA

### Usos da água subterrânea na área

A água subterrânea é largamente consumida na bacia do rio São Miguel, para abastecimento público, pelas indústrias (principalmente do setor mineral) e estabelecimentos comerciais.

A cidade de Pains é, em sua maior parte, abastecida pelas águas de uma surgência junto à margem esquerda do rio São Miguel que, depois tratada é distribuída, através de 1671 ligações prediais, num volume de aproximadamente 22300 m<sup>3</sup>/mês (fonte: SAAE de Pains). Um de seus bairros (Alvorada), com 176 ligações prediais, é abastecido com água de um poço tubular profundo (1600 m<sup>3</sup>/mês). O Distrito de Mina, ao sul da Cidade de Pains, é totalmente abastecido por água de poço tubular. O povoado de Calciolândia é abastecido por um grande poço do tipo Amazonas.



Além destes usos para abastecimento público, as águas subterrâneas abastecem as indústrias de mineração e calcinação, amplamente difundidas na região. Empresas do setor de comércio, principalmente postos de gasolina, também se abastecem com água subterrânea, por meio de poços tubulares.

Na maioria das propriedades rurais inseridas na Bacia do Rio São Miguel, as residências são abastecidas por águas provenientes de cisternas ou poços tubulares. O uso de águas subterrâneas na zona rural poderia ser mais intenso se a irrigação fosse uma prática mais difundida nesta região, onde a agricultura de sequeiro e a pecuária extensiva predominam. O setor agrícola poderia ser amplamente beneficiado através de investimentos que permitissem a exploração dos recursos hídricos subterrâneos.

De maneira geral, a água subterrânea constitui um recurso de elevado valor estratégico para o desenvolvimento econômico e social da região.

### **Caracterização dos aquíferos**

Três diferentes aquíferos foram identificados na área abrangida pela bacia do rio São Miguel. Dois em meios anisotrópicos: um aquífero cárstico e um fissural; e um aquífero granular.

Cerca de 80% da Bacia do Rio São Miguel é dominada por um grande aquífero cárstico que, a norte, a oeste e a sul, se estende para bem além dos limites da bacia, abrangendo rochas carbonáticas de textura e composição variadas. Os aquíferos cársticos se caracterizam pelo processo de dissolução das rochas formando condutos de dissolução que transportam a água subterrânea. É notória em tais ambientes a existência de cavidades que captam e conduzem água pluvial para dentro do aquífero. Embora ocorram litotipos distintos, como dolomitos e calcários, que apresentam solubilidades diferenciadas, a carstificação atingiu todas as rochas carbonáticas da área, sendo mais relevante nas rochas calcíferas.

O Carste de Arcos-Pains-Doresópolis foi atingido por intenso tectonismo proterozóico (Alkimin, 1996; Magalhães, 1988), reativado mais recentemente, no cenozóico (Saadi *et al*, 1998). As estruturas geradas nestes eventos têm papel determinante no processo de carstificação, com a dissolução das rochas carbonáticas ocorrendo principalmente ao longo de superfícies de descontinuidade, como fraturas e falhas, podendo ocorrer também ao longo de planos de acamamento.

No aquífero cárstico ocorrem pontos de recarga dispersos por toda a área, na forma de sumidouros e dolinas, que transportam a água da superfície para o aquífero. Dolinas de formação recente podem ser vistas em vários pontos, às vezes inseridas em dolinas maiores, mostrando que o processo de carstificação está em plena atividade. A maior concentração de dolinas e sumidouros está na porção sudeste da área.

As surgências são importantes feições de descarga deste aquífero, alimentando os cursos d'água, ocorrendo inclusive descargas diretas no rio São Miguel, nível de base do aquífero na área em estudo. A importância das surgências pode ser demonstrada pelo fato de que a Cidade de Pains é, em sua maior parte, abastecida por uma captação em uma surgência junto à margem esquerda do referido rio.

No carste, devido à alta velocidade do fluxo subterrâneo e à considerável capacidade de armazenamento, há possibilidade de poços de grande vazão. Em contrapartida, é mais vulnerável à poluição, devido a grande rapidez com que a água superficial penetra no aquífero e a grande interconexão hídrica entre os sistemas superficial e subterrâneo.

Na área da bacia ocorre, também, um aquífero fissural, inserido no Complexo Granito-gnáissico que aflora no extremo leste da área. Neste aquífero, o escoamento subterrâneo se dá em rocha gnáissica, de porosidade primária e solubilidade desprezíveis, de modo que o fluxo segue apenas ao longo das descontinuidades, como planos de fraturas e falhas presentes nesta rocha. Quando existem, níveis de cataclasito também podem transportar água neste tipo de aquífero. A área de ocorrência do aquífero fissural corresponde aproximadamente à sub-bacia do rio Candongas, a leste da área, que tem grande parte de seu curso acompanhando um "graben" de direção N30W (Saadi, 1991).

Na bacia ocorre ainda um aquífero granular, correspondente às camadas inconsolidadas ou extremamente alteradas que recobrem as formações da área. Muitas residências na zona rural são abastecidas por cisternas escavadas neste aquífero. O povoado de Calciolândia, na parte norte da área, é abastecido por este aquífero, através de um grande poço tipo amazonas. Apesar de sua importância, pouco se sabe sobre este aquífero.

### **Características dos poços tubulares**

Os poços tubulares cadastrados na Bacia do Rio São Miguel são em número de quarenta. Tais poços encontram-se muito mal distribuídos pela área, sendo que há uma grande concentração na Cidade de Arcos, enquanto que a oeste e sul da bacia há amplas áreas onde estão ausentes. São revestidos com tubos de aço de 6", exceção feita aos dois poços da Nestlé, no norte da área, ambos desativados, revestidos com tubos de 8".

Dados sobre as características construtivas só foram encontrados para 22 dos 40 poços tubulares cadastrados, sendo 11 no aquífero cárstico e 11 no fissural. No carste a profundidade média dos revestimentos é de 18,4 metros e nenhum dos poços está equipado com filtros. No aquífero fissural a profundidade média dos revestimentos é bem maior, equivalente a 38,9 metros, indicando que sobre o embasamento granito-gnáissico há uma espessura maior de solo e rocha alterada. Neste aquífero, dos 11 poços cujos dados estão disponíveis, 9 são equipados com filtros.

Nestes a média é de quatro metros de filtro por poço, entretanto, a posição dos filtros só é conhecida para 2 dos poços: No poço da Prefeitura de Arcos os filtros foram instalados em material inconsolidado e posicionados a 19,0-21,3 e 27,3-31,9 metros; e no poço da Simencal os filtros foram instalados em rocha alterada e posicionados a 48-50 e 56-58 metros.

A profundidade total dos poços é um parâmetro bem conhecido e seu estudo estatístico, feito para 18 poços do aquífero fissural e 20 poços do aquífero cárstico, é mostrado na Tabela 4. Na mesma tabela está o estudo das profundidades de revestimento.

AQUÍFERO	CÁRSTICO		FISSURAL	
	Prof. Total	Prof. Revest.	Prof. Total	Prof. Revest.
Média	93,49	18,4	92,61	38,9
Mediana	94,50	19,5	88,00	38,0
Máximo	165,00	27,8	130,00	70,0
Mínimo	55,00	4,5	52,00	14,0
Desv. Padrão	27,36	6,5	23,35	19,0

Tab. 4 – Estudo estatístico das profundidades totais e de revestimento dos poços tubulares.

Cerca de 50% dos poços visitados não tem laje de proteção sanitária e provavelmente não são cimentados. Poços com tais problemas construtivos podem contribuir para a contaminação do aquífero

As tabelas 5 e 6 mostram, estatisticamente, os parâmetros hidráulicos nos aquíferos cárstico e fissural, onde: NE e ND são, respectivamente, os níveis estático e dinâmico; s é o rebaixamento; Q é a vazão; e Q/s é a vazão específica. Os dados foram obtidos em Felix e Freitas Jr. (2000 [8]), junto a proprietários de poços, e nos arquivos da Divisão de Águas Subterrâneas da COPASA.

Parâmetro	Prof. (m)	NE(m)	ND(m)	s (m)	Q(m <sup>3</sup> /h)	Q/s(m <sup>3</sup> /h/m)
Total de Poços	20	18	18	18	20	18
Média	93,49	21,32	40,49	19,17	9,84	2,31
Mediana	94,50	15,00	41,50	13,50	8,55	0,72
Máximo	165,00	48,00	92,00	80,00	45,00	17,86
Mínimo	55,00	2,68	5,20	2,00	0,65	0,05
Desvio Padrão	27,36	15,06	23,46	19,14	9,89	4,34

Tab. 5 - Parâmetros hidráulicos dos poços do Aquífero Cárstico.

<b>Parâmetro</b>	<b>Prof. (m)</b>	<b>NE(m)</b>	<b>ND(m)</b>	<b>s (m)</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Q/s(m<sup>3</sup>/h/m)</b>
Total de Poços	18	13	13	13	20	13
Média	92,61	19,87	55,61	35,74	10,70	0,66
Mediana	88,00	19,00	46,00	29,00	6,10	0,11
Máximo	130,00	34,00	115,00	90,00	66,00	5,23
Mínimo	52,00	3,00	26,00	7,00	0,40	0,01
Desvio Padrão	23,35	10,06	25,58	23,22	14,93	1,43

Tab. 6 - Parâmetros hidráulicos dos poços do Aquífero Fissural.

A grande dispersão dos valores, típica de aquíferos instalados em meios anisotrópicos, testemunha a grande heterogeneidade dos aquíferos cárstico e fissural, com elevados desvios padrão e grande diferença entre mínimos e máximos.

Os poços do aquífero fissural têm uma vazão média de 10,7 m<sup>3</sup>/h ligeiramente superior, portanto, a média dos poços do aquífero cárstico (9,84 m<sup>3</sup>/h), ao contrario do seria de se esperar, posto que os aquíferos cársticos têm, no geral, maiores transmissividade e coeficiente de armazenamento. Entretanto o parâmetro mais importante para a produtividade de um aquífero é a capacidade específica, que é muito maior no carste ( $Q/s_{(carst.)}=2,31$  m<sup>3</sup>/h;  $Q/s_{(fiss.)}=0,66$  m<sup>3</sup>/h). A elevada média no aquífero fissural se deve, em grande parte, a um único poço excepcionalmente bom (66 m<sup>3</sup>/h), pertencente à empresa Lafarge. Se excluirmos os valores extremos, muito discrepantes em relação à média em ambos os aquíferos, obtemos os valores médios de vazão e capacidade específica mostrados na Tabela 7, mais representativos em relação ao conjunto de valores. Observa-se que, embora as vazões em ambos os aquíferos sejam bastante próximas, a capacidade específica é mais de 4 vezes superior no aquífero cárstico.

<b>Aquífero</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Q/s(m<sup>3</sup>/h/m)</b>
Cárstico	8,40	1,31
Fissural	8,20	0,31

Tab. 7 – Valores médios de vazão e capacidade específica, excluídos os valores extremos.

Para dez dos poços do aquífero cárstico há dados sobre a profundidade das entradas d'água. Nestes poços as profundidades das entradas d'água mais profundas variam de 14 a 140 metros, sendo a média de 54,2 metros. Não se dispõe de dados suficientes sobre as entradas d'água dos poços do aquífero fissural para um estudo das mesmas.

Sobre aquífero granular, instalado nas coberturas que se sobrepõem aos aquíferos cárstico e fissural, não foram coletados dados suficientes para um estudo das características hidráulicas e hidrodinâmicas.

Apenas 27,5% dos poços tubulares cadastrados associam-se aos lineamentos fotointerpretados. A grande maioria dos poços (72,5 %) cadastrados na Bacia do Rio São Miguel não está associada a nenhuma estrutura visível em fotografias aéreas (escala 1:60.000) ou nos reconhecimentos de campo. É notória a superioridade hidráulica dos poços associados aos lineamentos estruturais, como mostra a Tabela 8, indicando a grande importância de uma locação criteriosa para as perfurações.

Parâmetro	MÉDIA		MEDIANA	
	Q (m <sup>3</sup> /h)	Q/s (m <sup>3</sup> /h/m)	Q (m <sup>3</sup> /h)	Q/s (m <sup>3</sup> /h/m)
Poços associados a lineamentos	19,8	3,58	10,6	1,04
Poços não associados	9,2	1,62	7,6	0,29

Tab. 8 - Parâmetros hidráulicos de poços associados e não associados a lineamentos estruturais

### Dinâmica do fluxo subterrâneo.

Para apenas três dos poços da área, todos no aquífero cárstico, são conhecidos os relatórios de testes de bombeamento, feitos com uso de motocompressores. Em todos os casos as medidas de rebaixamento e recuperação foram feitas no próprio poço bombeado, não há dados conhecidos provenientes de piezômetros de observação. Os dados obtidos nestes relatórios não são compatíveis com a aplicação de qualquer método para interpretação de ensaios de bombeamento. Do mesmo modo não há dados de monitoramento. Devido a estas circunstâncias não foi possível calcular os parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos, como transmissividade, coeficiente de armazenamento ou condutividade hidráulica.

O escoamento subterrâneo é de cerca de 166 milhões de m<sup>3</sup>/ano (318 mm/ano). Este fluxo sofre um súbito aumento entre novembro e dezembro, indicando haver boas condições de recarga (Menegasse et al, 2000).

Felix & Freitas Jr. (2000) fizeram estudos do fluxo subterrâneo com aplicação de traçador (rodamina) nas proximidades da Cidade de Pains, a oeste do rio São Miguel, onde foram identificadas duas direções de fluxo: N50E e N85E. As velocidades de fluxo encontradas foram de 480 m/dia para a primeira direção e 221 m/dia para a segunda.

Através das cotas dos níveis estáticos dos poços cadastrados, obtidas dos relatórios das empresas perfuradoras, foi elaborado um mapa potenciométrico da área, mostrado na Figura 4, onde se nota que o fluxo subterrâneo se direciona para o Rio São Miguel, nível de base local.

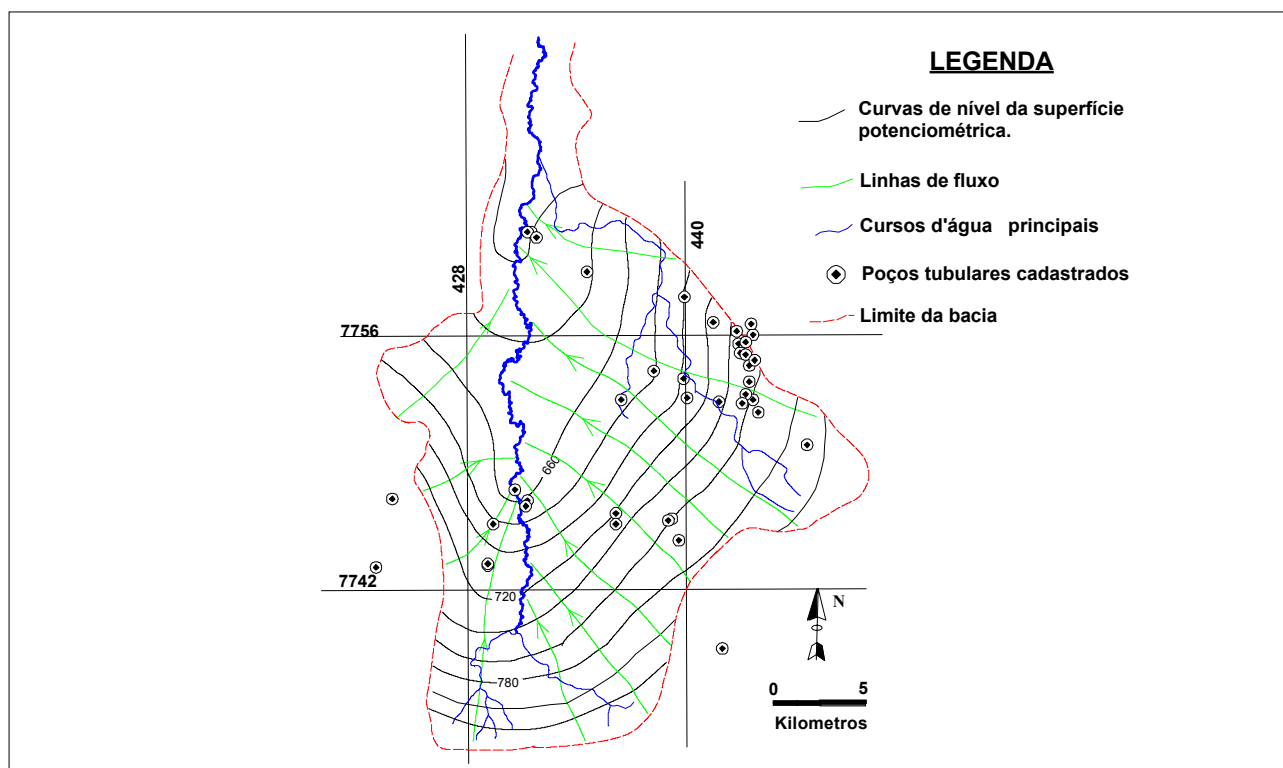


Fig. 4 - Mapa potenciométrico da bacia.

### Aspectos Morfoestruturais

Foi feito um estudo de fotointerpretação, em escala 1: 60.000, com objetivo de demarcar os lineamentos estruturais na área da bacia. Tais lineamentos representam principalmente planos de fratura ou falha e, de maneira localizada, planos de acamamento com forte mergulho. É grande a importância destas estruturas, pois, como a porosidade primária das rochas é desprezível, será através dos planos de descontinuidade que a água circulará, abrindo condutos de dissolução, no caso da circulação em carbonatos. Assim, o estudo das direções de lineamentos nos permite determinar quais as possíveis direções preferenciais do fluxo subterrâneo. Porém, deve-se levar em conta que a frequência de lineamentos é apenas um dos fatores a se considerar para se determinar as principais direções de fluxo, outros elementos, principalmente as relações entre as litologias e a direção do gradiente hidráulico, devem ser considerados.

O estudo das direções de lineamentos estruturais na bacia do rio São Miguel, obtidas por fotointerpretação, indica como tendências principais as direções N0-20W; N40-70W (com maior frequência para N50-60W); e E-W (Figura 5).

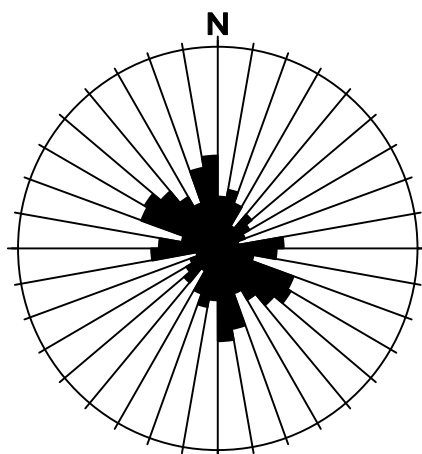


Fig. 5 – Lineamentos fotointerpretados na bacia do rio São Miguel. 271 medidas.

Com objetivo de melhor compreender as características do fluxo subterrâneo na Bacia do Rio São Miguel, foram estudados, também, os seguintes parâmetros morfoestruturais: principais direções de desenvolvimento das cavernas, obtidas através de mapas espeleológicos; direções de condutos de dissolução medidas em afloramentos; e estudos das direções de desenvolvimento e alinhamento de dolinas, a partir de fotografias aéreas.

As direções de desenvolvimento das cavernas foram tomadas a partir de mapas espeleológicos feitos pelo Guano Speleo, e referentes a sete das cavidades da Bacia do Rio São Miguel. As principais direções de desenvolvimento registradas foram: N0-30W, com ênfase em N20-30W, N10-20E e N70-80E (Figura 6).

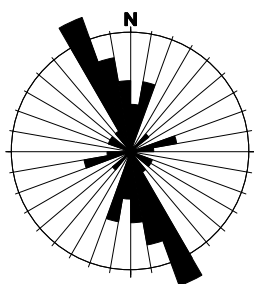


Fig. 6 - Direções de desenvolvimento das cavernas. 25 medidas.

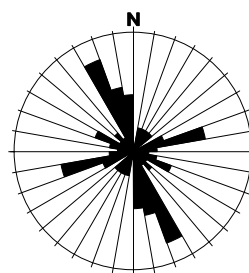


Fig 7 - Direções de condutos de dissolução mediadas em afloramentos. Total: 73 medidas.

As principais direções de condutos de dissolução, medidas em afloramentos, apresentaram nítida associação com as direções tomadas nas cavernas, são elas: N0-30W, com destaque para N20-30W; e N70-80E (Figura 7); a única diferença considerável em relação às direções de

desenvolvimento das cavernas é o menor destaque para a tendência N10-20E. As associações entre as direções das cavernas mapeadas e dos condutos medidos em afloramentos indicam fluxos subterrâneos com tendências direcionais orientadas principalmente para N-NW e E-NE.

Na Bacia do Rio São Miguel ocorrem centenas de dolinas, principalmente de dissolução. Têm forma circular ou elíptica, muitas vezes formando alinhamentos. Tais dolinas são geralmente desprovidas de água durante a estiagem. A maior concentração destas feições ocorre à sudeste da Cidade de Pains, havendo, também, concentrações na porção norte da área. Um estudo das dimensões das dolinas indicou que cerca de 2/3 das mesmas têm menos de 100 metros no eixo maior e 86 % têm menos de 200 metros. Menos de 2 % das concavidades da área têm mais de 1 km de extensão.

Quando se levam em consideração os alinhamentos de dolinas e as direções de alongamento das mesmas, as tendências próximas à direção N-S não se destacam, sendo que as principais direções são: N50-60W, N80-90W, N30-40W e N50-60E (Figura 8). Os alinhamentos e alongamentos das dolinas constituem geralmente um bom indicador de direção de fluxo no carste.

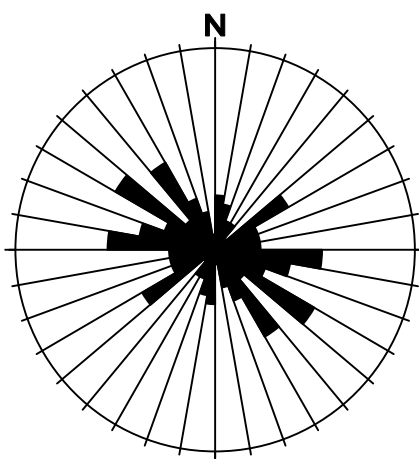


Fig. 8 – Direções de alinhamentos e alongamentos de dolinas. 130 medidas.

Pelos dados disponíveis, as marcantes diferenças entre as direções preferenciais das dolinas (N50-60W e E-W) e aquelas medidas nas cavernas mapeadas e condutos de dissolução (N0-30W e N70-80E), podem ser explicadas com uma mudança de direção do fluxo subterrâneo, que poderia ter ocorrido pela ação do tectonismo cenozóico (neotectonismo) que atingiu esta região.

Para justificar esta hipótese os seguintes argumentos podem ser usados:

1<sup>o</sup>. As cavernas mapeadas pelo Guano Speleo são cavidades grandes, dentro das quais as pessoas podem se deslocar e que atualmente não estão tomadas pelas águas. Algumas destas



cavidades contém amplos salões, decorados por magníficos espeleotemas. Em cavernas desta região ocorrem fósseis de animais extintos (Cartelle, comunicação verbal). Trata-se, portanto, de cavernas de formação antiga.

2º. Os condutos de dissolução cujas direções foram medidas em afloramentos, encontram-se acima do nível do solo e não mais conduzem água, tendo sido gerados por um fluxo antigo.

3º. As dolinas que ocorrem na bacia são, em sua grande maioria, de pequenas dimensões, indicando que são de formação recente, sendo comum pequenas dolinas se formando dentro de outras maiores.

4º. A pequena quantidade de grandes dolinas ou uvalas, com cerca de 1 km ou mais (apenas seis, nas quais foram tomadas oito medidas de direção), se orientam principalmente na direção geral N-NW ou E-NE, coincidindo com a das cavernas e condutos (Figura 9).

5º. As direções das linhas de fluxo (mostradas na Figura 4) são incompatíveis com uma direção geral N-S para o atual fluxo subterrâneo.

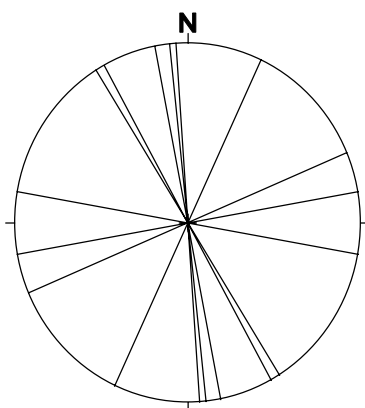


Fig. 9 - Direções tomadas nas grandes dolinas (mais de 1km de extensão).

Estes fatos indicam a existência de duas gerações de cavidades, formadas por distintas direções preferenciais de fluxo subterrâneo. Uma mais antiga, com direções preferenciais N-NW e E-NE; e outra formada pelo fluxo atual, com direções preferenciais N50-60W e E-W. Deste modo, as direções das cavernas, dos condutos de dissolução encontrados nos afloramentos, e das grandes dolinas ou uvalas, são testemunho de um fluxo pretérito, alterado pela ação do neotectonismo, anteriormente citado.

## Qualidade das águas subterrâneas

Os tipos hidroquímicos na área indicam águas bicarbonatadas cálcicas e bicarbonatadas cálcicas e magnesianas no aquífero cárstico. No aquífero fissural ocorrem águas bicarbonatadas sódicas e bicarbonatadas cálcicas. As águas apresentam, no geral, salinidades baixas a médias, variando de 46,6 a 178,1 mg/L no aquífero fissural e de 258,1 a 505,5 no aquífero cárstico (Félix & Freitas Jr., 2000).

A dureza das águas subterrâneas da bacia, como era de se esperar, atinge valores máximos no aquífero cárstico. As águas subterrâneas no carste apresentaram um teor médio de  $\text{CaCO}_3$  de 249,9 mg/L e as do aquífero cristalino 50,4 mg/L. Pela classificação de Custódio & Llamas (1983 [9]) as primeiras seriam águas muito duras e as demais águas brandas a pouco duras.

De acordo com a Portaria nº 1469 do Ministério da Saúde [10], os únicos parâmetros hidroquímicos fora dos padrões de potabilidade são o ferro e o manganês, cujos valores máximos permitidos (respectivamente 0,3 mg/L e 0,1 mg/L), são superados em cerca de 73 % dos poços analisados.

Foi realizado um estudo da contaminação bacteriológica no qual foram feitas 14 análises utilizando-se método que detecta presença ou ausência de coliformes totais e fecais. Outra análise foi feita pela COPASA em 1996. Dos 15 poços analisados, 11 inserem-se no Aquífero Cárstico e 4 no Aquífero Fissural. Nove poços apresentaram contaminação por coliformes fecais e totais; um poço apresenta contaminação apenas por coliformes totais. Em 5 poços não foi detectada contaminação bacteriológica.

A contaminação bacteriológica de aquíferos pode se dar por vários processos, entre os quais pode-se destacar: rompimento de redes de esgoto, fossas de construção inadequada, depósitos de lixo (aterros ou lixões), interações entre águas superficiais e subterrâneas (contaminações a partir de rios ou lagos poluídos), acúmulo de lixo em depressões (dolinas) que captam água para o aquífero, etc. Na região é comum as pessoas descartarem lixo doméstico e até animais mortos junto a sumidouros.

As estruturas de captação, como os poços tubulares, podem, quando mal construídos, provocar a contaminação dos aquíferos. Entre os poços observados na Bacia do Rio São Miguel, a maioria não tem laje de proteção sanitária e provavelmente não possui cimentação.

Para usos industriais ou agropecuários, as águas subterrâneas da bacia do rio São Miguel são apropriadas para a maioria das aplicações. Deve-se apenas levar em consideração que altos teores em ferro podem provocar corrosão em alguns tipos de máquinas, e que águas duras podem provocar incrustações carbonáticas em caldeiras e tubulações.

## CONCLUSÕES

Na bacia do rio São Miguel, foram caracterizados três aquíferos distintos: um cárstico, instalado em rochas carbonáticas do Grupo Bambuí; um aquífero fissural, nas rochas do complexo granito-gnáissico; e um granular, nas coberturas inconsolidadas que se sobrepõem às litologias da área. Apenas os dois primeiros foram estudados neste trabalho.

Os poços tubulares cadastrados nos aquíferos cárstico e fissural (20 poços em cada aquífero), têm vazões médias muito próximas: 8,4 m<sup>3</sup>/h e 8,2 m<sup>3</sup>/h, respectivamente. Entretanto, o parâmetro hidráulico mais importante para avaliação de um aquífero é a capacidade específica, que é muito maior nos poços do carste ( $Q/s_{(carste)}=1,31$  m<sup>3</sup>/h/m;  $Q/s_{(fissural)}=0,31$  m<sup>3</sup>/h/m). A profundidade média dos poços, em ambos os aquíferos, é da ordem de 90 metros, sendo que a profundidade média de revestimento é bem maior no aquífero fissural que no cárstico (38,9 m e 18,4 m, respectivamente), indicando que há uma maior espessura de material inconsolidado ou rocha muito alterada sobre o embasamento cristalino. Apenas 27,5 % dos poços estão associados a alguma estrutura identificável em fotografias aéreas ou nos reconhecimentos de campo, tendo estes os melhores resultados para os parâmetros hidráulicos. Um melhor posicionamento dos poços implicaria em resultados bem melhores de vazão e capacidade específica.

O fluxo subterrâneo é de cerca de 166 milhões de m<sup>3</sup>/ano (menegasse *et al*, 2000), e sofre um súbito aumento entre novembro e dezembro, indicando boas condições de recarga. O estudo das feições morfoestruturais indica que houve uma mudança nas principais direções do fluxo subterrâneo, que passaram de N-NW e E-NE num passado geológico recente, para N 50-60 W, E-W, N 30-40 W e N 50-60 E, no presente. Tal mudança, indicada pelas diferenças direcionais entre os dutos de dissolução e os alinhamentos e alongamentos de pequenas dolinas, ocorreu provavelmente pela ação do neotectonismo que atuou na área.

Quanto a sua qualidade, as águas subterrâneas da bacia do rio São Miguel refletem as diferenças litológicas entre os aquíferos, sendo duras a muito duras no carste e brandas a pouco duras no cristalino. Sua potabilidade hidroquímica como água bruta é comprometida apenas pelos teores em ferro e manganês, que superam os valores máximos permitidos (0,3 ml/L e 0,1 ml/L, respectivamente) em cerca de 73 % dos poços analisados. Porém um tratamento convencional, por oxidação, pode corrigir facilmente os teores destes elementos. Cerca de 60 % dos poços analisados apresentaram algum tipo de contaminação bacteriológica.

As águas subterrâneas da bacia do rio São Miguel não apresentam, no geral, restrições para a maioria dos usos industriais ou agrícolas, deve-se observar apenas que elevados teores em ferro ou carbonatos podem provocar problemas em alguns tipos de máquinas e águas duras a muito duras podem provocar incrustações em tubulações.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- SAADI, A.; MORAIS, M. S.; CARDOSO, G. G. C. 1998. Evolução Morfotectônica e Carstogênese na região de Arcos-Pains-Doresópolis. 2o Simpósio Nacional de Geomorfologia. Florianópolis.
- 2- RADAMBRASIL. 1982. Folhas SF 23/24. Rio de Janeiro/Vitória. Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Vegetação e Uso Potencial da Terra - Projeto RADAMBRASIL. Rio de Janeiro.
- 3- DARDENE, M. A., 1978. Zonação Tectônica da Borda Ocidental do Cráton São Francisco. Anais, 30-º Congres. Bras. Geologia, Soc. Bras. Geol., Vol.12, Recife, 597-610p.
- 4- ALKIMIM et al, 1996. A Deformação das Estruturas Proterozóicas do Cráton São Francisco e seu Significado Tectônico. Revista da Escola de Minas, v. 49, n.1, p.22-37. UFOP. Ouro Preto.
- 5- MAGALHÃES, P. M. 1988. Análise Estrutural das Rochas do Grupo Bambuí na Porção Sudeste da Bacia do São Francisco. Dissertação de Mestrado. UFOP. Ouro Preto.
- 6- SAADI, A. 1991. Ensaio sobre a morfotectônica de Minas Gerais: tesões intraplaca, descontinuidades crustais e morfogênese. Tese de professor titular. Instituto de Geociências/UFMG. Belo Horizonte.
- 7- MENEGASSE et al. 2000. Avaliação das Disponibilidades Hídricas da Província Cárstica de Arcos-Pains-Doresópolis, Alto São Francisco, Minas Gerais, Brasil. Inédito.
- 8- FÉLIX & FREITAS JÚNIOR (2000). Geologia e Hidrogeologia da Bacia do Rio São Miguel. Trabalho de Graduação. UFMG. Belo Horizonte.
- 9- CUSTÓDIO & LLAMAS. 1983. In: CPRM. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. Laboratório de Hidrogeologia da UFPE, 1997. Recife.
- 10- BRASIL. Ministério da Saúde. 2000. Portaria no 1469. Brasília.