

CONTROLE ESTRUTURAL NA CIRCULAÇÃO E COMPOSIÇÃO DAS ÁGUAS NO SISTEMA AQUÍFERO CÁRSTICO-FISSURAL DO GRUPO BAMBUÍ, NORTE DE MINAS GERAIS

CONTROLE ESTRUTURAL NA CIRCULAÇÃO E COMPOSIÇÃO DAS ÁGUAS NO SISTEMA AQUÍFERO CÁRSTICO-FISSURAL DO GRUPO BAMBUÍ, NORTE DE MINAS GERAIS

Dora Atman¹, Leila Nunes Menegasse Velásquez², Lúcia Maria Fantinel³

RESUMO As rochas carbonáticas e pelíticas neoproterozóicas do Grupo Bambuí formam um sistema aquífero importante em Jaíba, Verdelândia e Varzelândia, região semiárida de Minas Gerais. Os autores têm realizado estudos geológicos e hidrogeológicos naqueles municípios para consolidar um modelo de funcionamento do aquífero que ofereça subsídios à implantação de uma rede de monitoramento eficiente da qualidade das águas subterrâneas e que contribua para o entendimento das ocorrências de altas concentrações naturais de fluoreto registradas na região. Os objetivos deste trabalho são identificar e caracterizar as unidades hidrogeológicas, por meio da pesquisa de campo e análise das características das captações por poços tubulares, e propor um modelo conceitual de circulação das águas subterrâneas com base no estudo de lineamentos, fraturas, feições cársticas, potenciometria e de isótopos de trítio natural nas águas subterrâneas. Os resultados evidenciam o controle estrutural nos fluxos subterrâneos raso e profundo, este de caráter regional, e a influência das formas de recarga e circulação das águas na produtividade dos poços, na salinização e nas ocorrências de concentrações elevadas de fluoreto.

Palavras chave: aquífero cárstico-fissural, Grupo Bambuí, fluoreto na água subterrânea

ABSTRACT The neoproterozoic limestones and siltstones of Bambuí Group constitutes an important aquifer system in Jaíba, Verdelândia e Varzelândia, in the semi-arid region of Minas Gerais. The authors have realized geological and hydrogeological studies in those municipalities in order to consolidate an aquifer model that supports the construction of an efficient network to monitor the groundwater quality and helps to understand the occurrence of high concentrations of natural fluoride in groundwater in the region. This article aims to identify and characterize the hydrogeological units, with field research and analyses of boreholes characteristics, and propose a conceptual model of groundwater circulation, using the lineaments, fractures and karstification studies, potentiometric map, isotopic analysis (natural tritium) in groundwater samples. The results shows structural control on shallow and deep regional flows, and the influence of recharge types and water circulation on production of boreholes, salinity and the occurrence of high fluoride concentrations.

Keywords: fissure-karstic aquifer, Bambuí Group, fluoride in groundwater

INTRODUÇÃO

Varzelândia, Verdelândia e Jaíba (5000 km²) localizam-se a 600 km a norte de Belo Horizonte (FIG. 1), e assim como nos demais municípios do semiárido mineiro, os recursos hídricos subterrâneos são essenciais para suprir as demandas de água para consumo humano, irrigação e dessedentação de animais. Calcários e pelitos do Grupo Bambuí constituem o sistema aquífero explorado por mais de 300 poços tubulares na região.

A pesquisa das características hidrogeológicas do Grupo Bambuí na referida área foi motivada por estudos em escala regional no norte de Minas Gerais que identificaram ocorrências de águas subterrâneas com concentrações anômalas de fluoreto e estabeleceram relação causal do consumo dessas águas com a incidência da fluorose dentária nas comunidades de Amargoso, em Verdelândia, e de Mocaminho, em Jaíba (VELÁSQUEZ *et al.*, 2007, 2009). Os estudos

mostraram que os calcários são portadores de fluorita, entretanto os fatores hidrogeológicos favoráveis à concentração do flúor nas águas ainda estavam por ser analisados.

O tema de pesquisa despertou o interesse do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), que trabalhava na implantação de uma rede de monitoramento das águas na região e que havia firmado em 2005, parceria com Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (IGC-UFMG), por meio da qual, obteve-se apoio para as atividades de campo e análise química das águas.

Nesse contexto, o modelo hidrogeológico e de circulação das águas no Sistema Aquífero Cárstico-Fissural do Grupo Bambuí foi construído visando contribuir para o entendimento dos reservatórios e de suas características hidroestratigráficas e estruturais que poderiam influenciar na quantidade e na qualidade das águas subterrâneas.

¹ UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais, (doraabh@gmail.com).

² UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais, (menegase@yahoo.com.br).

³ UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais, (luciafantinel@gmail.com).

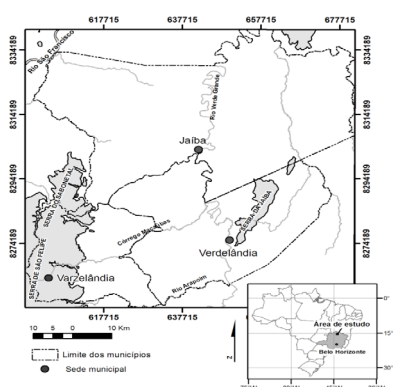


Figura 1 – Mapa de localização dos municípios de Jaíba, Verdelândia e Varzelândia, norte de Minas Gerais.
Figure 1 – Location map of Jaíba, Verdelândia and Varzelândia municipalities, north of Minas Gerais.

Os objetivos do trabalho são **identificar e caracterizar** as unidades hidrogeológicas do Sistema Aquífero Cárstico-Fissural Bambuí na região de Jaíba, Verdelândia e Varzelândia, testar a existência de um controle estrutural do fluxo e propor um modelo conceitual de circulação das águas que contribua com o entendimento das ocorrências de altas concentrações de fluoreto.

MATERIAS E MÉTODOS

As unidades hidrogeológicas foram caracterizadas com base em dados primários, obtidos pelas atividades de campo e laboratório, e em dados secundários, obtidos da consulta a banco de dados e a bibliografia. O mapeamento geológico (1:250.000) com levantamento de perfis e seções colunares nas serras do Sabonetal, São Felipe e Jaíba, aliado ao estudo das características hidráulicas e construtivas de 292 poços tubulares cadastrados, resultou na construção do mapa hidrogeológico. Documentos de outorga do IGAM e banco de dados da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA-MG) foram as principais fontes de consulta sobre os poços. Dentre os poços cadastrados, foram selecionados 82 para estudos hidroquímicos.

As feições lineares de relevo (lineamentos), prováveis condicionantes de fluxo subterrâneo, identificáveis na imagem de satélite Geocover (NASA 2000) na escala 1:50.000, correspondem a vales secos, drenagens encaixadas, eixos de dolinas elípticas ou conjunto de dolinas/ovalas alinhadas. O padrão das direções dos lineamentos foi comparado com o de fraturas, condutos e cavernas medidos em campo, onde cerca de 85% das fraturas possuem mergulho igual ou maior do que 70°.

Foi investigada a relação entre produtividade e composição química das águas dos grupos de poços associados e não associados a lineamentos. Para a análise da relação entre a localização do poço e lineamento foi determinada, empiricamente, uma área de influência, em torno do lineamento

(*buffer*), testando-se as distâncias de 125, 250, 500 e 1000 m. Buscando trabalhar com um *buffer* mais restritivo e, tendo em vista a representatividade dos lineamentos na escala utilizada, assumiu-se a distância de referência igual a 250 m.

Investigou-se o comportamento da vazão e parâmetros hidroquímicos dos poços associados a lineamentos com diferentes direções. Para essa análise, os 3.825 lineamentos identificados na imagem de satélite foram agrupados em seis classes de 30° segundo as direções *NS* (N15W a N15E), *NNE* (N15-45E), *ENE* (N45-75E), *EW* (N75-90E a N75-90W), *WNW* (N45-75W), *NNW* (N15-45W). Esse agrupamento reúne todos os lineamentos interpretados em um número de classes de mais fácil operacionalidade.

Os parâmetros analisados e o número de dados (*n*) são: vazão (dado obtido nos documentos de outorga, *n*=254), condutividade elétrica (C.E, *n*=76), cloreto (*n*=76), fluoreto (*n*=75) e isótopos de trítio natural (*n*=25). Os dados hidroquímicos, com balanço iônico das análises com erro inferior a 11%, reúnem valores medidos por Velásquez *et al.* (2007, 2009), dados de monitoramento dos poços do IGAM e amostras coletadas e analisadas neste trabalho.

Os mapas de isoconcentração de trítio natural e potenciométrico, construídos no *software* ArcGIS 9.3 com interpoladores *kriging* e *natural neighbors*, respectivamente, definidos em função da distribuição espacial dos dados, foram utilizados na interpretação da espacialização da recarga e dos fluxos subterrâneos regionais.

ESTUDOS ANTERIORES

Estudos hidrogeológicos importantes foram realizados nas décadas de 1970 e 1980 pelo Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC). Silva (1984) apresenta parte dos dados obtidos naqueles estudos, em especial, as análises morfoestrutural, hidrogeológica e hidroquímica do aquífero cárstico de Jaíba, além de dados sobre a potencialidade hidrogeológica da região. Silva (1995) propõe um modelo hidrogeológico

de funcionamento hidráulico do aquífero cárstico de toda a bacia do rio Verde Grande, com base em mapeamento hidrogeológico e processamento de dados de mais de 1200 poços.

Recentemente, vários trabalhos na região têm sido direcionados à pesquisa geológica e hidroquímica em razão da identificação de altas concentrações de fluoreto na água subterrânea e fluorose dentária associada (VELÁSQUEZ *et al.*, 2007 e 2009; SILVA *et al.*, 2008). Freitas *et al.* (2008), Iglesias e Uhlein (2009) destacam-se dentre os estudos regionais que incluem mapeamento geológico e análise estratigráfica.

CONTEXTO GEOLÓGICO

A área de estudo localiza-se na bacia do São Francisco, próximo da borda leste do cráton homônimo. Ocorrem rochas neoproterozóicas do Grupo Bambuí com cerca de 350 m de espessura aflorante, localmente recobertas por arenitos cretáceos ou, mais amplamente, por sedimentos cenozóicos. Calcarenitos, calcirruditos, calcilitos e microbialitos de cor cinza a preto, do Grupo Bambuí, aflorantes abaixo da cota 550 m, são correlacionáveis à Fm. Lagoa do Jacaré e as unidades predominantemente pelíticas que gradam para calcários aloquímicos no topo, à Fm. Serra da Saudade. A Fm. Três Marias, no topo da serra da Jaíba, é representada por arcósios e arenitos. E, nas serras do Sabonetal e São Felipe, por pelitos, subarcóseos, intercalações de calcários, arenitos finos e siltitos ferruginosos. Em ambos os casos, as rochas siliciclásticas têm baixa porosidade primária devido a textura, cimentação ferruginosa e/ou recristalização.

A correlação estratigráfica entre as unidades aflorantes nas serras da Jaíba e do Sabonetal ainda constitui tema de debate. Assim, no mapeamento hidrogeológico optou-se por agrupar essas rochas de acordo com suas propriedades hidrogeológicas, em lugar de utilizar sua divisão litoestratigráfica.

As rochas são pouco metamorfisadas e formam camadas subhorizontais pouco deformadas, exceto a leste do rio Verde Grande. Nessa região são reconhecidas estruturas resultantes dos esforços compressivos atuantes durante o ciclo orogênico brasileiro tais como falha de empurrão, dobras em escala métrica em calcário e foliação incipiente em siltitos e ritmitos.

Foram mapeados dois sistemas de falhas normais NS e NW resultantes da tectônica cretácea ou cenozóica. Inferiu-se um abatimento do bloco a leste do rio Verde Grande refletido no contato lateral entre as formações Lagoa do Jacaré e Serra da Saudade. As falhas NW, bem marcadas nos lineamentos, truncam as NS, são mais frequentes e têm menor movimentação vertical do que estas.

RESULTADOS

Sistemas e unidades hidrogeológicas

Em Varzelândia, Verdelandia e Jaíba são identificados dois sistemas hidrogeológicos: o *sistema cárstico-fissural*, composto de intercalações de calcários e pelitos do Grupo Bambuí, e o *sistema granular*, constituído de aluviões e coberturas colúvio-eluvionares. Todos os

poços são abastecidos pelo sistema cárstico-fissural, especialmente onde predominam calcários, que, apesar de recristalizados e com microporosidade reduzida, armazenam água em fraturas, falhas e feições cársticas.

O *Sistema Aquífero Cárstico-Fissural do Grupo Bambuí* pode ser dividido em quatro unidades hidrogeológicas (FIG. 2): Aquífero Cárstico Inferior, Aquitarde, Aquífero Cárstico Superior e Zona não Aquífera (TAB.1). A Zona não Aquífera não é visualizada em mapa devido a seu recobrimento pela cobertura granular.

Aquífero Cárstico Inferior (ACI) – Ocorre a leste e noroeste da serra do Sabonetal e a sudeste da serra da Jaíba, e aflora entre as cotas 480 m e 550 m, com espessura máxima de 200 m. É composto por calcários aloquímicos e microbialitos correlacionáveis à Fm. Lagoa do Jacaré. Os afloramentos típicos ocorrem em forma de lajedo no fundo de dolinas ou vales cársticos. Condutos, fendas de espessura centimétrica a métrica, sumidouros e surgências ao longo das drenagens são indícios de um carste desenvolvido em profundidade (FIG. 3 a, b e c).

Na maior parte da área, o ACI tem característica de aquífero livre, sendo recoberto apenas pelas coberturas granulares elúvio-coluvionares, exceto na base das serras. No ACI aflorante, a primeira entrada d'água, partindo da superfície, situa-se entre as cotas 423 m e 519 m e a profundidade do nível d'água máxima é 50 m. Valores de vazão variam de 1 m³/h até 320 m³/h (TAB. 1). O pH das águas situa-se entre 6,32 e 8,23, com mediana de 7,02 e a C.E, entre 427 µS/cm e 1.417 µS/cm, com média de 780 µS/cm.

Destacam-se duas regiões com maior frequência de vazão acima de 60 m³/h (FIG. 4), a porção central da área e a porção sudeste da serra da Jaíba, ambas com elevada carstificação no ACI e com boas condições de recarga.

A leste do rio Verde Grande e na base das serras do Sabonetal e de São Felipe, o ACI acha-se sotoposto a pelitos e ritmitos do Aquitarde. Nesse contexto, as águas do ACI são mais salinas (média de 1.125 µS/cm) e alcalinas (mediana de pH em 7,23) do que as águas do ACI com calcário aflorante (ou com cobertura granular). Os poços que captam essas águas do ACI sob pelitos apresentam vazões menores do que as dos poços perfurados no ACI não recoberto (médias de 22 m³/h e 64 m³/h, respectivamente - TAB. 1). A primeira entrada de água dos poços locados sobre o Aquitarde, que captam águas do ACI, está entre 345 m e 569 m. As entradas acima de 550 m ocorrem nas serras a oeste e, provavelmente, em uma zona de transição entre calcários do ACI e pelitos do Aquitarde.

Na porção central, a recarga por infiltração direta em zonas de absorção cárstica é facilitada pela existência de dolinas, solos rasos, relevo plano e maior exposição dos calcários. Além desses processos, ocorre recarga do ACI por infiltração indireta de córregos através dos aluviões e das camadas aquíferas superiores, através de drenança pelo Aquitarde. A sudeste da serra da Jaíba, a infiltração e a permeabilidade são favorecidas pelas estru-

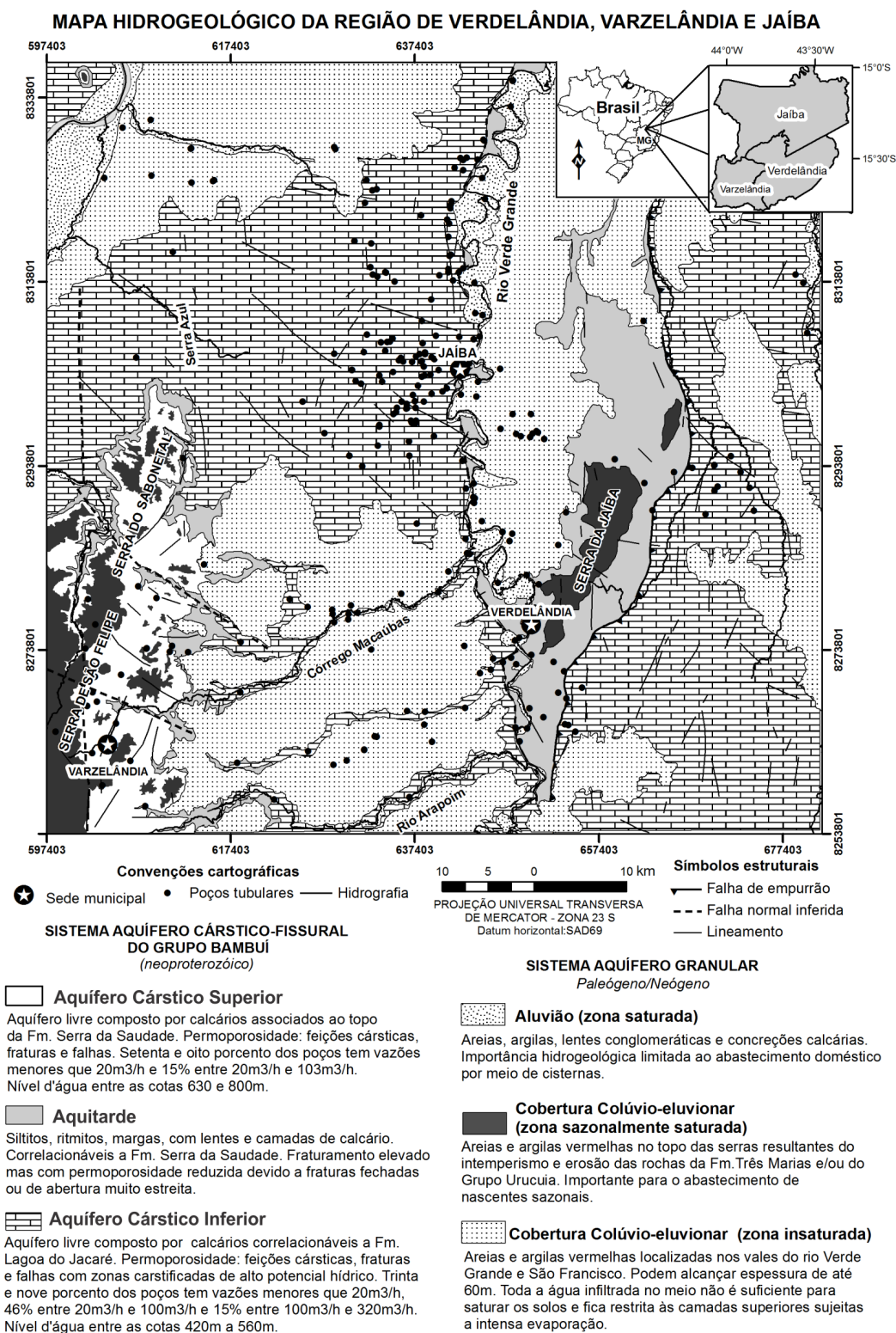


Figura 2 – Mapa Hidrogeológico da região de Verdelândia, Varzelândia e Jaiba, norte de Minas Gerais
Figure 2 – Hydrogeological map of Verdelândia, Varzelândia e Jaíba, north of Minas Gerais.

turas de deformação relacionadas com a falha de empurrão.

Aquitarde – Reúne siltitos arenosos, siltitos argilosos e ritmitos silto-areno-argilosos, com calcário e marga subordinados, associados à Fm. Serra da Saudade. As rochas apresentam elevada frequência de fraturas com mergulho acima de 70°, além de fraturas paralelas a S₀ (FIG. 3d). Trata-se de fraturas com aberturas muito estreitas, que dificultam o armazenamento e o fluxo de água subterrânea.

As rochas do Aquitarde afloram na base da serra da Jaíba, nas escarpas das serras do Sabonetal e de São Felipe e ao longo do rio Verde Grande (FIG. 3e).

A percolação predominante nessas rochas tem o caráter de drenança. Exceção ocorre a sul da serra da Jaíba, onde três poços exploram água exclusivamente dessa unidade na zona mais deformada próximo da falha de empurrão. Os dados de vazão disponíveis (8,4 m³/h e 30 m³/h) indicam que, localmente, esse aquitarde pode funcionar como um aquífero de baixo potencial hídrico.

Aquífero Cárstico Superior (ACS) – Localiza-se nas serras do Sabonetal e de São Felipe, no domínio das rochas calcárias do topo da Fm. Serra da Saudade, aflorante entre as cotas 636 m e 822 m, e entradas de água entre as 683 m e 744 m.

Trata-se de aquífero livre, composto, principalmente, por calcários aloquímicos com estromatólitos subordinados. Na base e no topo ocorrem intercalações pelíticas.

O ACS exhibe condutos e cavernas de dimensões métricas a decamétricas, em especial no calcarenito/calcirrudito oolítico intraclástico, orientadas segundo as direções de fraturamento. É comum o aumento local da permeabilidade horizontal dada a carstificação paralela ao acamamento, que ocorre principalmente no contato calcarenito/calculutito.

Cerca de 75% dos valores de vazão são menores do que 20 m³/h, e 25% entre 20 m³/h e 103 m³/h. É a unidade do Sistema Cárstico-Fissural que apresenta águas menos salinizadas, com C.E. entre 504 µS/cm e 790 µS/cm, e pH entre 6,84 e 7,96.

No ACS, a recarga direta da água meteórica é significativa nas exposições de rochas fraturadas e carstificadas e sobre os topos planos das serras do Sabonetal e de São Felipe (FIG. 3f, g e h). A descarga ocorre em nascentes permanentes e córregos localizados próximo ao contato com o Aquitarde.

Zona não aquífera – Localiza-se na serra do Sabonetal, acima do ACS, e na serra da Jaíba, acima do Aquitarde. Em ambas, reúne as rochas pouco permeáveis, com baixa porosidade primária e fraturas fechadas, da Fm Três Marias sob a cobertura colúvio-eluvionar. Na serra da Jaíba inclui, também, camada carbonática da Fm. Serra da Saudade. Não existem poços profundos cadastrados, o que, aliado à ausência de nascentes e drenagens perenes, denota a reduzida importância hídrica dessa unidade.

O **Sistema Aquífero Granular** pode ser dividido em três unidades (FIG. 2): Aluviões, Coberturas Colúvio-eluvionares sazonalmente saturadas e Coberturas Colúvio-eluvionares insaturadas.

Aluviões (zona saturada) – Distribuem-se ao longo dos

rios São Francisco, Verde Grande e de seus principais tributários. São constituídos por areias brancas a amarelas, cascalhos e argilas, localmente concrecionados por precipitação de carbonatos. Os aluviões têm importância hidrogeológica limitada ao abastecimento doméstico por meio de cisternas.

Coberturas colúvio-eluvionares sazonalmente saturadas – Ocorrem nos topos planos e nas altas encostas das serras do Sabonetal, São Felipe e da Jaíba. São formadas pelo manto de intemperismo e por depósitos sedimentares provenientes da erosão das rochas da Fm. Três Marias e do Grupo Urucua (estas aflorantes a sul da área). São coberturas arenosas, porosas e permeáveis, saturadas nos períodos chuvosos. Nascentes localizadas no contato com as unidades de topo do Grupo Bambuí constituem suas áreas de descarga.

Coberturas colúvio-eluvionares insaturadas – São compostas por sedimentos resultantes da erosão das rochas em terrenos elevados e pelo intemperismo dos calcários e pelitos presentes no vale dos rios Verde Grande e São Francisco. São areias e argilas vermelhas que podem alcançar espessura de até 60 m, mas que têm reduzida importância hidrogeológica para armazenamento e recarga. Grande parte da água de chuva nessas áreas escoou ou é evaporada, e apenas uma pequena parcela é infiltrada nas camadas superiores do solo. A porção infiltrada não é suficiente para saturar o aquífero granular ou recarregar o sistema aquífero subjacente (Velásquez et al., 2009).

A FIG. 5 apresenta em perfil o modelo simplificado de circulação e recarga proposto para o Sistema Aquífero Cárstico-Fissural do Grupo Bambuí e Sistema Aquífero Granular, contendo as principais unidades hidrogeológicas, estruturas e a interpretação dos fluxos interaquíferos.

Análise de fraturas, carstificação e lineamentos e a influência das estruturas na produtividade e composição das águas

As rochas das unidades aquíferas apresentam-se fraturadas e carstificadas. Verifica-se uma similaridade na dispersão das direções de fratura no Aquífero Cárstico Inferior e no Aquífero Cárstico Superior. Entretanto, no ACI, as direções de maior frequência são N60-70W e N10-20E, enquanto no ACS destacam-se as direções N20-30E e N0-10W (FIG. 6). A carstificação, representada por direção de condutos e eixo longitudinal de cavernas, destaca-se no ACI segundo as direções N0-10W, N50-60W, N10-30E e N60-70E e, no ACS, segundo N30-40E e N60-70W.

A FIG. 6 evidencia a concordância do padrão de carstificação com o de fraturamento em cada aquífero, com exceção para a baixa frequência de feições cársticas na direção N0-10W no ACS. Assim, embora exista similaridade das direções de fratura entre os dois aquíferos, o mesmo não ocorre com relação às direções mais frequentes de carstificação entre o ACS e o ACI, indicando distintas condições hidrodinâmicas na evolução do carste.

Os lineamentos, mesmo exibindo elevada dispersão, marcam satisfatoriamente duas faixas de direções comuns nos dois aquíferos, N30-70W e N20-50E (FIG. 6).



Figura 3 – Fraturas e feições cársticas nas unidades hidrogeológicas que compõem o Sistema Aquífero Cárstico-Fissural Bambuí. a) Dolina de fundo rochoso com fratura N10W no centro, ACI. b) Sumidouro no vale cárstico no ACI. c) Surgência cárstica controlada por fratura de direção N10W no ACI. d) Família de fraturas no Aquitarde. e) Trecho do rio Verde Grande controlado por fraturas N10W nos pelitos. f) Lâpias e fendas cársticas abertas no ACS. g) Paredão calcáreo com feições cárstica no ACS (setas: fenda com colapso de blocos, condutos arredondados e elípticos; linha pontilhada: dissolução paralela ao acamamento. h) Fratura e condutos com espeleotemas e indícios de percolação de água.

Figure 3 – Fractures and karstic features on hydrogeological units of Bambuí Group Karstic-fissured Aquifer System. a) Hole with a N10W fracture into the rock, ACI. b) Sinkhole in a karstic valley in the Under karstic Aquifer (ACI). c) Upwelling karst spring controlled by a N10W fracture in ACI. d) Fractures families in Aquitarde. e) Part of the Verde Grande River controlled by fractures in pelitic rocks. f) Lapies and open karstic fissures in ACS. g) Limestone outcrop with karstic features (open fissure with collapsed blocks, rounded and elliptical conduits and bedding parallel dissolution) in Upper Karstic Aquifer (ACS). h) Fractures and conduits with speleothems and water percolation evidences.

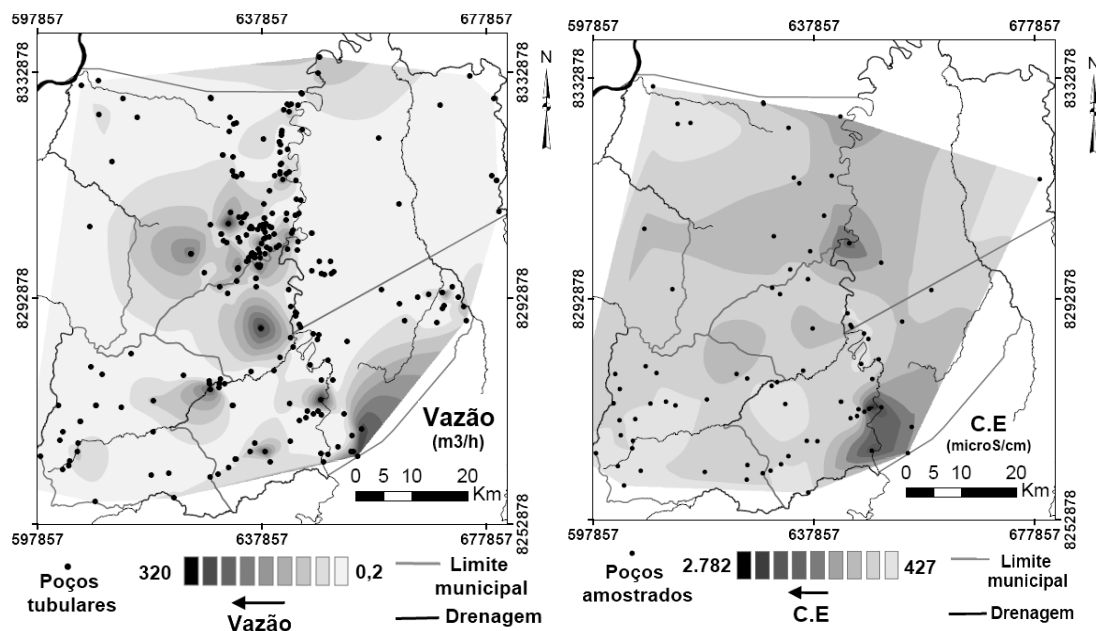


Figura 4 – Mapas de isovalores de vazão dos poços tubulares e condutividade elétrica das águas do Sistema Aquífero Cárstico-Fissural Bambuí.

Figure 4 – Isovalue maps of Flow of the boreholes and electrical conductivity of waters from Bambuí Karstic-fissure Aquifer System.

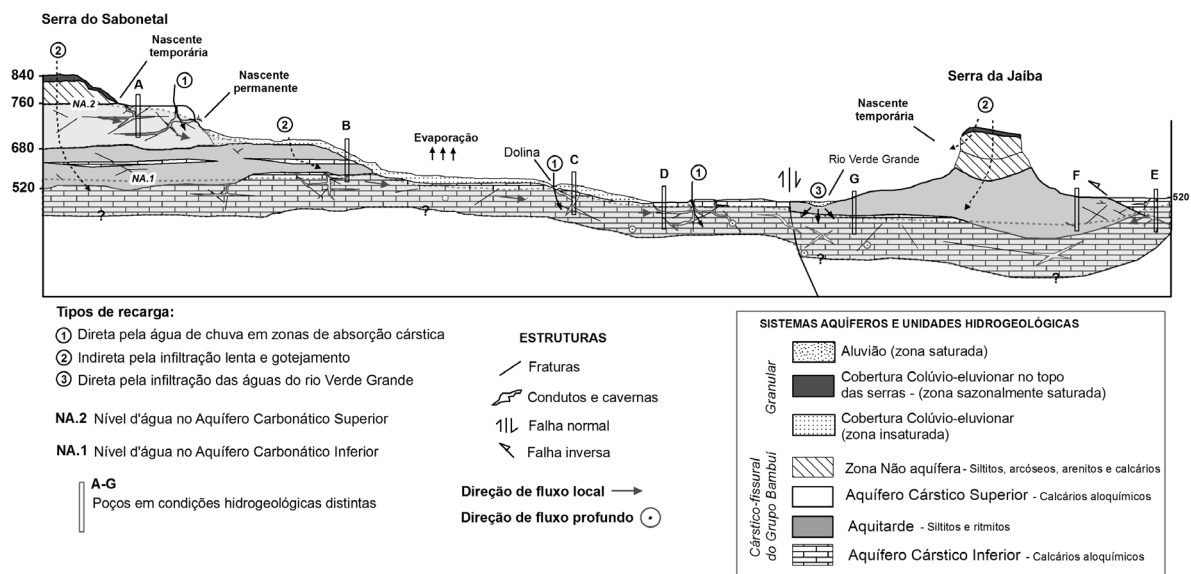


Figura 5 – Modelo hidrogeológico simplificado dos Sistemas Aquíferos Cárstico-Fissural do Grupo Bambuí e Granular.

Figure 5 – Simplified hydrogeological model of Karstic-Fissured Aquifer System of Bambuí Group and Granular Aquifer.

Tabela 1 – Características do Aquífero Cárstico Superior (ACS) e Aquífero Cárstico Inferior (ACI).
Table 1 – Characteristics of Upper Karstic Aquifer (ACS) and Under Karstic Aquifer.

UNIDADE	ACS		ACI		
		Total	Aflorante	Sob pelitos	
Espessura máx. (m)	90	200	200	200	
Cota Superfície	mediana.	718	485	486	484
	média	723	491	490	496
	mínimo.	636	454	454	459
	máximo.	769	609	539	609
	Desvio padrão	32	23	17	35
	n	18	186	140	46
Entrada d'água (Cota m)	mediana.	702	463	464	445
	média	707	461	468	447
	mínimo.	683	345	423	345
	máximo.	744	569	519	569
	Desvio padrão	22	33	21	49
	n	5	63	44	19
Cota N.A. (m)	mediana.	716	471	472	469
	média	716	472	473	470
	mínimo.	659	421	424	421
	máximo.	764	550	523	550
	Desvio padrão	30	19	19	20
	n	16	178	137	41
Q (m ³ /h)	mediana.	13	25	32	14
	média	20	56	64	22
	mínimo.	5	0,2	1	0,2
	máximo.	103	320	320	112
	Desvio padrão	23	69	73	26
	n	16	238	191	47
	<20	75%	39%	34%	64%
	20-60	19%	29%	30%	26%
	60-100	6%	17%	19%	9%
100-200	-	8%	9%	2%	
>200	-	7%	9%	-	
C.E (µS/m)	mediana.	660	754	740	893
	média	649	872	780	1125
	mínimo.	504	427	427	507
	máximo.	790	2569	1417	2569
	Desvio padrão	83	395	231	607
	n	16	60	44	16
pH	mediana.	7,26	7,07	7,02	7,23
	média	7,38	7,20	7,17	7,29
	mínimo.	6,84	6,32	6,32	6,60
	máximo.	7,96	8,40	8,23	8,40
	Desvio padrão	0,36	0,48	0,47	0,52
	n	15	60	44	16
F ⁻ (mg/L)	mediana.	0,42	0,37	0,37	0,26
	média	0,45	0,90*	0,74	1,24**
	mínimo.	0,16	0,12	0,12	0,12
	máximo.	0,79	11,00	3,64	11,00
	Desvio padrão	0,22	1,67	0,75	2,74
	n	9	52	35	17

Desconsiderando o valor anômalo de 11,00 mg/L: * média = 0,70 mg/L ** média = 0,63 mg/L

As direções N10W a N10E são mais evidentes no ACI. As direções N60W e N30E são comuns às duas unidades aquíferas nos três parâmetros analisados (TAB. 2).

A semelhança entre as direções de lineamento interpretadas e as direções de fraturas e feições cársticas medidas em campo sugere que as feições lineares de relevo mapeadas têm relação com fraturas e feições cársticas em profundidade. Assim, poços associados a lineamentos (AL) estariam também relacionados às zonas de fraturas e feições cársticas refletidas em superfície.

No aquífero em questão, todos os poços são abastecidos por fluxos em fraturas e feições cársticas. No caso dos

poços não associados a lineamentos (NAL), infere-se que essas estruturas não se refletem em superfície na forma de lineamentos e que esses poços podem atravessar: a) zonas de cobertura granular espessa, mascarando o lineamento que denota a zona fraturada subjacente; b) zonas com predominância de fraturas/dutos subhorizontais relacionados, principalmente, à carstificação paralela ao acamamento, que, por isso, não se manifestam na superfície; c) zonas de fraturamento/carstificação profunda; d) zonas de fraturas e dutos relacionados com lineamentos só identificáveis em escala de maior detalhe do que a escala aqui adotada.

Dessa forma, na escala adotada, interpreta-se que a sep-

Tabela 2 – Correspondência entre direções de fraturas, feições cársticas e lineamentos frequentes no Aquífero Cárstico Inferior (ACI) e Aquífero Cárstico Superior (ACS). Em negrito os valores modais.

Table 2 – Comparison between frequent directions of fractures, karstic features and lineaments in the Under Karstic Aquifer (ACI) and Upper Karstic Aquifer (ACS). In bold the modal values.

Aquífero	FRATURAS	CARSTE	LINEAMENTOS
ACI	N60-70W	N50-60W	N50-60W
	N10-20E	N10-20E	N0-10E
	N30-40E	N20-30E	N20-40E
	N0-10W	N0-10W	N0-10W
ACS	N20-30E	N30-40E	N20-30E
	N40-70W	N60-70W	N50-60W
	N40-70E	N40-60E	N30-40E
	N0-10W		

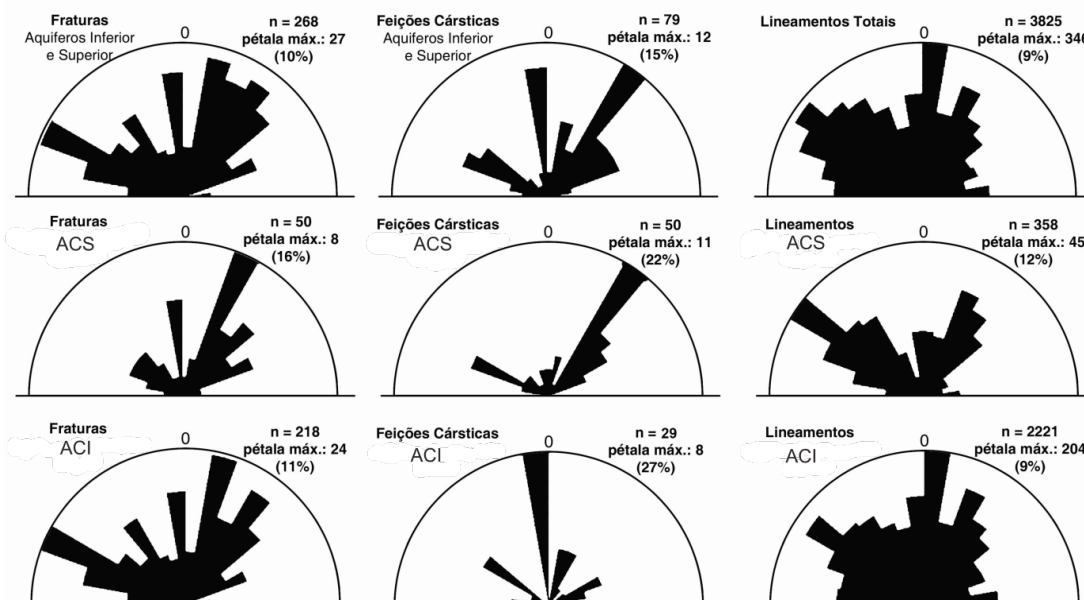


Figura 6 – Comparação entre as frequências das direções de fraturas, carstificação e lineamentos para os aquíferos cársticos Inferior (ACI) e Superior (ACS). O diagrama de lineamentos totais resume a estatística de todos os lineamentos traçados na área de estudo.

Figure 6 – Comparison among the frequent directions of fractures, karstic features and lineaments in the Under karstic Aquifer (ACI) and Upper Karstic Aquifer (ACS). The diagram of total lineaments summarizes the statistics of all lineaments outlined in the study area.

aração entre poços AL e NAL distingue poços que atravessam *zonas de fraturas e carstificação com influência no relevo* daqueles poços cuja *presença de fraturas e feições cársticas* não tem expressão em superfície (FIG. 7). Fraturas e feições cársticas com influência no relevo são aquelas que têm conexão com dolinas/uvalas, vales secos e drenagens e, portanto, denotam zonas de boa permeabilidade vertical. Assim, a presença ou ausência dessas *zonas de boa permeabilidade vertical* constitui hipótese explicativa (a ser testada) sobre a diferença entre poços AL e NAL na região.

O grupo de poços AL (44% dos poços com dados de vazão) apresenta todos os valores estatísticos de vazão superiores aos dos poços NAL (FIG. 8) e contém mais poços com vazões muito altas a excepcionais – entre 100 e 330 m³/h (TAB. 3).

Importante ressaltar que, mesmo que com baixa frequência, no grupo NAL também existem poços com vazões altas a excepcionais (60 m³/h a 320 m³/h) típicas de fluxos em dutos, aqui interpretados como subhorizontais, desenvolvidos ao longo do acamamento e, sem reflexo nas formas de relevo.

Os poços NAL tendem a ser um pouco mais salinizados, com valores mais elevados para a média e mediana (TAB. 3). Poços com valores de C.E. maiores que 900 µS/cm são mais frequentes nesse grupo do que nos AL.

O cloreto possui correlação de Pearson de 0,891 (p<0,001) com a C.E., o que explica as maiores concentrações desse íon no grupo de poços NAL (TAB. 4 e FIG. 8). Nesse grupo, concentrações de Cl⁻ superiores a 80 mg/L são mais comuns.

As maiores concentrações de F⁻ também se encontram nas águas dos poços NAL, com maior porcentagem de poços com concentrações acima de 0,8 mg/L e de 1,5 mg/L (limite de potabilidade pela Portaria nº MS.518/2004, BRASIL 2004), alcançando os valores máximos de 4,8 mg/L e 11,0 mg/L (TAB. 4).

Os dados de isótopos de trítio natural demonstram que as águas dos poços NAL são mais empobrecidas em trítio e, portanto, mais antigas que as águas nos poços AL (FIG. 9). As águas dos poços AL são mais enriquecidas em trítio e, portanto, apresentam menor tempo de renovação do que as primeiras.

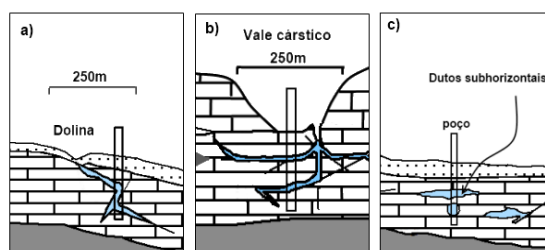


Figura 7 – Exemplos das condições hidrogeológicas interpretadas para poços associados e não associados a lineamentos. a) Poço associado a lineamento – locado a menos de 250 m de uma dolina elíptica. b) Poço associado a lineamento locado em um vale cárstico com sumidouro. c) Poço não associado a lineamento que atrevesa zona de cobertura espessa e dutos sub-horizontais.

Figure 7 – Examples of the hydrogeological conditions interpreted for wells associated and not associated with lineaments. a) Well connected to lineament – located within 250 meters of a doline elliptical. b) Well connected to lineament located in a valley with karst sinkhole. c) Well not associated with lineament, which cross thick granular cover and subhorizontal conduits.

Tabela 3 – Vazão e Condutividade Elétrica (C.E.) dos poços associados e não associados a lineamentos. Table 3 – Flow and Electrical Conductivity (C.E.) of boreholes associated and not associated with lineaments.

VAZÃO (m ³ /h)	ASSOCIA- DOS		NÃO ASSOCIADOS (µS/m)		C.E.	ASSOCIADOS		NÃO ASSOCIA- DOS	
	n	%	n	%		n	%	n	%
n	112		142		n	38		38	
média	60		48		média	783		868	
mediana	22		25		mediana	707		746	
mín.	1		0,2		mín.	427		456	
máx.	320		270		máx.	1970		2569	
d.p	78		57		d.p	273		428	
Classes	n	%	n	%	Classes	n	%	n	%
Baixa (0-20)	49	44	60	42	300-500	1	3	4	11
Média (20-60)	28	25	41	29	500-700	17	45	12	32
Alta (60-100)	14	13	28	20	700-900	12	32	10	26
Muito alta (100-200)	11	10	7	5	900-1100	4	11	5	13
Excepcionais (200-330)	10	9	6	4	1100-1300	1	3	3	8
					>1300	3	8	4	11

Portanto, os poços AL têm vazões mais altas, águas com menor C.E, cloreto e fluoreto, e menor tempo de renovação do que os poços NAL. Esse resultado é coerente com a hipótese de os poços AL atravessarem zonas de alta per-

meabilidade horizontal e vertical, com entrada de águas de chuva nos locais de absorção cárstica e em fraturas abertas na superfície. As águas mais salinizadas (em poços NAL) refletem zonas de recarga reduzida ou inexistente de

Tabela 4 – Concentrações de Cl⁻ e F⁻ nos poços associados e não associados a lineamentos.
Table 4 – Chloride and fluoride concentrations in water samples of boreholes associated and not associated with lineaments.

Cl (mg/L)	ASSOCIA- DOS	NÃO ASSOCIA- DOS	F ⁻ (mg/L)	ASSOCIA- DOS	NÃO ASSOCIA- DOS*	NÃO ASSOCIA- DOS
n	38	38	n	34	39	40
média	43,72	85,15	média	0,44	0,80	1,0
mediana	35,70	37,70	mediana	0,36	0,36	0,37
mín.	8,83	3,04	mín.	0,12	0,10	0,10
máx.	208,00	749,00	máx.	1,77	4,80	11,0
d.p	40,69	135,92	d.p	0,32	1,00	1,88
Classes			Classes			
0 a 40	20(53)	20(53)	0 a 0,4	18 (53)	23(59)	23 (58)
40 a 80	15(39)	8(21)	0,4 a 0,8	14 (41)	4(10)	4(10)
80 a 120	0	5(13)	0,8 a 1,2	1 (3)	4(10)	4(10)
120 a 160	1(3)	0	1,2 a 1,6	0	4(10)	4(10)
160 a 200	1(3)	1(3)	1,6 a 2,0	1(3)	1(3)	1(3)
≥200	1(3)	4(11)	≥2,0		3(8)	4(10)

*Estatísticas sem o valor anômalo de 11,00mg/L

águas meteóricas com significativa contribuição de fluxos mais profundos, de lenta renovação. Essas condições são favoráveis às maiores concentrações de cloreto e fluoreto.

Para identificar as direções de estruturas mais favoráveis e menos favoráveis ao fluxo subterrâneo, bem como as diferenças na composição das águas nessas estruturas, foram comparadas as características das águas dos poços associados com as seis classes de lineamentos.

As classes que reúnem o maior número de lineamentos e poços AL são: WNW e NS (TAB. 5). Um poço pode estar associado a mais de um lineamento, por isso a soma dos poços por direção na TAB. 5 não reflete o total de poços estudados.

As médias mais altas das vazões estão nas direções WNW e NNE (TAB. 6 e FIG. 10a). O maior máximo, a mediana mais elevada e a maior porcentagem de vazões muito altas a excepcionais também ocorrem no conjunto de poços associados a lineamentos WNW. Dentre as seis classes de lineamentos, destacam-se as direções WNW, NNE e NS pela existência de vazões excepcionais. Essas direções são concordantes com as frequentes feições cársticas medidas em campo (TAB. 2 e FIG. 6) e, portanto, refletem zonas onde o carste está mais desenvolvido.

Os poços associados a lineamentos ENE e NNW apresentam mais de 80% das vazões médias ou baixas (TAB. 6 e FIG. 10a). A direção NNW não representa uma direção frequente de fraturas ou feições cársticas em quaisquer das unidades aquíferas. A direção ENE, no entanto, aparece no diagrama de fraturas e feições cársticas do Aquífero Cárstico Superior, mas não se destaca

no Aquífero Cárstico Inferior, de maior peso estatístico.

A classe WNW apresenta águas mais salinizadas, com mais de 30% dos seus poços com C.E. maior do que 900 $\mu\text{S}/\text{m}$ (a classe EW, que também parece reunir águas mais salinas, apresenta apenas dois poços associados, sendo tal amostragem pouco representativa). As águas dos poços associados aos lineamentos ENE e NNW tendem a ser as menos salinizadas (FIG. 10b).

Os valores extremos mais altos de cloreto ocorrem nas direções WNW e NNE, também de maiores vazões. A direção ENE, de vazão mais baixa, apresenta, também, as concentrações mais baixas de cloreto (FIG. 10c).

Nos poços associados a lineamentos existe pouca diferença entre os parâmetros estatísticos das concentrações de fluoreto por direção. Entretanto, nota-se que as classes NNE e WNW apresentam valores extremos maiores que 0,8 mg/L de fluoreto (FIG. 10d).

As estruturas mais favoráveis ao fluxo subterrâneo ocorrem segundo as direções WNW, NNE e NS (FIG. 11, QUADRO 1). Paradoxalmente, duas dessas direções apresentam maior salinidade e ocorrências de concentração de fluoreto superiores a 0,8 mg/L, o que será discutido adiante.

Espacialmente, observa-se uma faixa NE-SW que demarca as áreas de águas de curto período de renovação, na serra do Sabonetal e trecho médio dos córregos Escuro e Macaúbas (FIG. 12), relacionadas com a presença de estruturas aflorantes que propiciam a maior conexão de águas superficiais e subterrâneas.

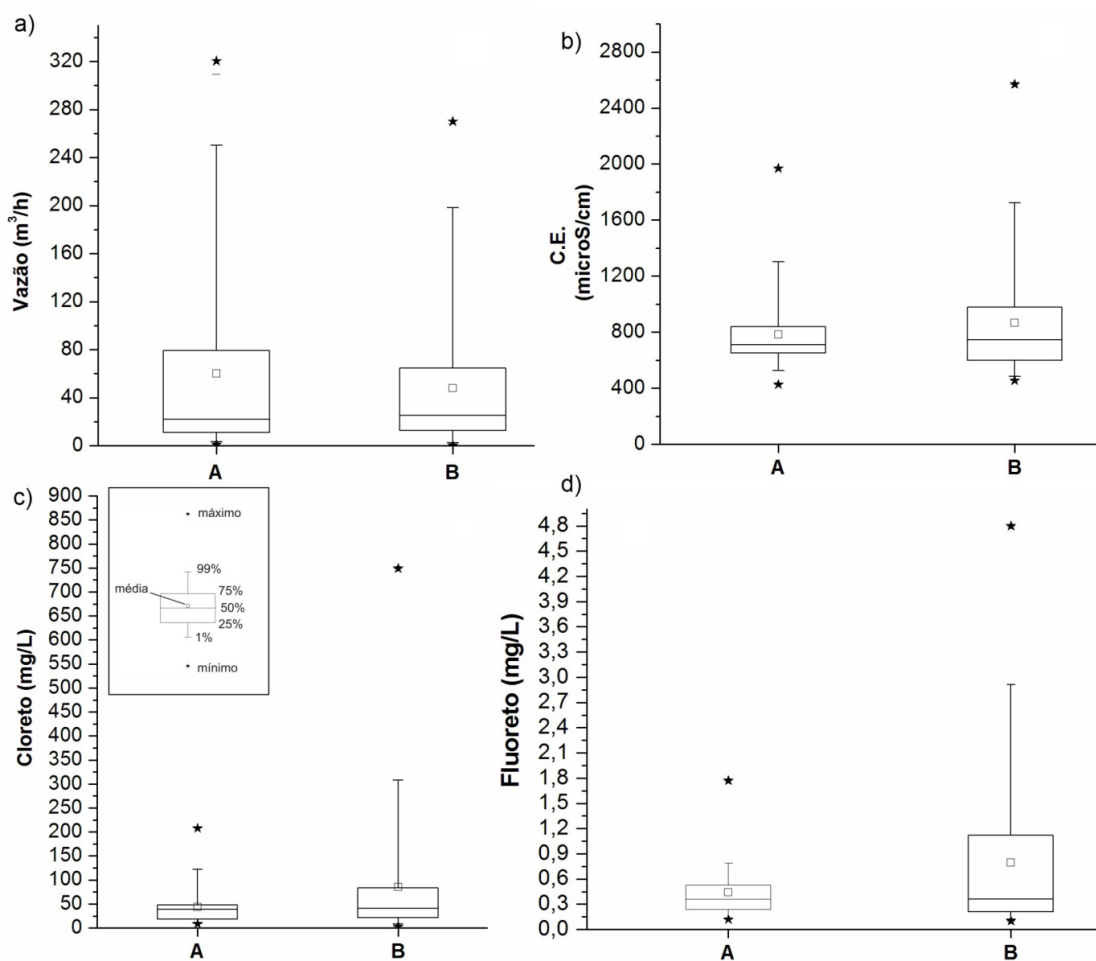


Figura 8 – Vazão e Condutividade Elétrica (C.E.) nos poços associados (A) e não associados (B) a lineamentos.
 Figure 8 – Flow and Electrical Conductivity (C.E.) of boreholes associated (A) and not associated (B) with lineaments.

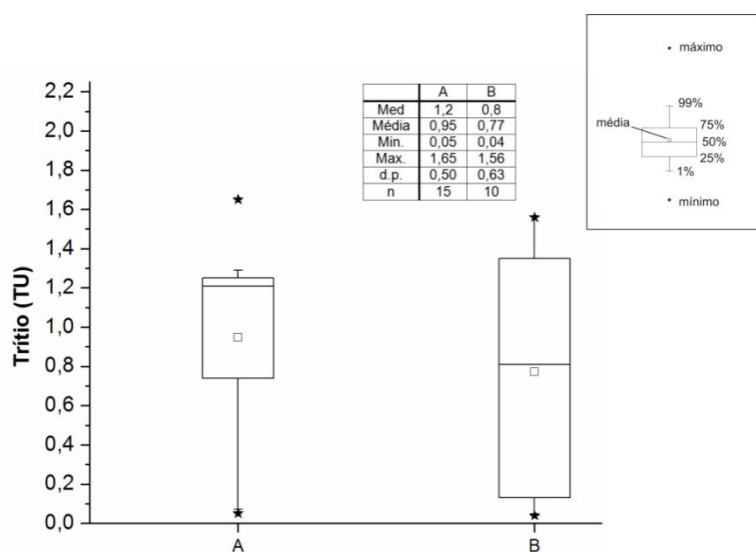


Figura 9 – Unidades de trítio natural nas águas subterrâneas em poços associadas (A) e não associadas a lineamentos (B).
 Figure 9 – Natural tritium in groundwater of boreholes associated (A) and not associated with lineaments (B).

DISCUSSÃO

Na área de estudo, o fluxo regional, que ocorre no ACI, é de direção NS, com importantes componentes nas direções WNW e NNE (FIG. 11), todas as direções concordantes com o desenvolvimento do carste ao longo de fraturas a elas relacionadas. Esses resultados são coerentes com o estudo de Silva (1995), que identifica a área próxima da confluência dos rios Verde Grande e São Francisco como zona de descarga regional do sistema hidrogeológico da bacia do Verde Grande, com fluxo subterrâneo de direção aproximada NS.

O rio Verde Grande passa de efluente a S da área para influente a N, na margem direita (FIG. 11). Silva (2011), estudando os deflúvios desse rio, estações a S de Verdelandia e a N de Jaíba, verificou uma surpreendente similaridade das vazões para as duas estações, tanto na época úmida como na de estiagem nos três anos hidrológicos analisados (2003-2005), reforçando a hipótese de um caráter influente do rio em sua porção N. Além disso, a extensa presença do aquitardo pelítico recobrendo o ACI, contribui para uma renovação lenta do aquífero nessa porção da área (FIG. 2)

O Sistema Aquífero Cárstico-Fissural é compartimentado por duas unidades aquíferas, ACS e ACI, separadas pelo Aquitarde. Embora existam direções comuns

de fraturas, ao longo das quais teria ocorrido uma carstificação mais intensa, há diferenças entre o padrão de carstificação no ACS e no ACI que denotam diferenças nas condições hidrodinâmicas de evolução cárstica. Interpreta-se como causas a presença do Aquitarde impedindo a conexão direta entre as duas unidades aquíferas e a influência da posição topográfica distinta de ambas.

As áreas de águas mais antigas remetem a fluxos longos, baixas taxas de recarga e cotas mais baixas. Tais características ocorrem a E do rio Verde Grande, onde o ACI está sotoposto ao Aquitarde, e a NW da área onde o ACI ocorre sob uma espessa cobertura, que, aliada ao elevado déficit hídrico, dificulta a recarga do aquífero cárstico (Velásquez *et al.*, 2009). Assim, denota-se a existência de dois fluxos principais: um profundo, regional, restrito ao ACI, proveniente de regiões a montante da área de estudo relacionado a estruturas de direção geral NS e WNW, e um fluxo mais raso cujo escoamento ocorre em estruturas de direção NNE em cotas mais elevadas e comuns ao ACS e ACI, a oeste do rio Verde Grande, sendo também influenciado pela topografia.

Os poços mais produtivos se associam aos lineamentos WNW, NS e NNE. Os lineamentos WNW e NS refletem as direções de um sistema de falhas normais inferidas nas serras

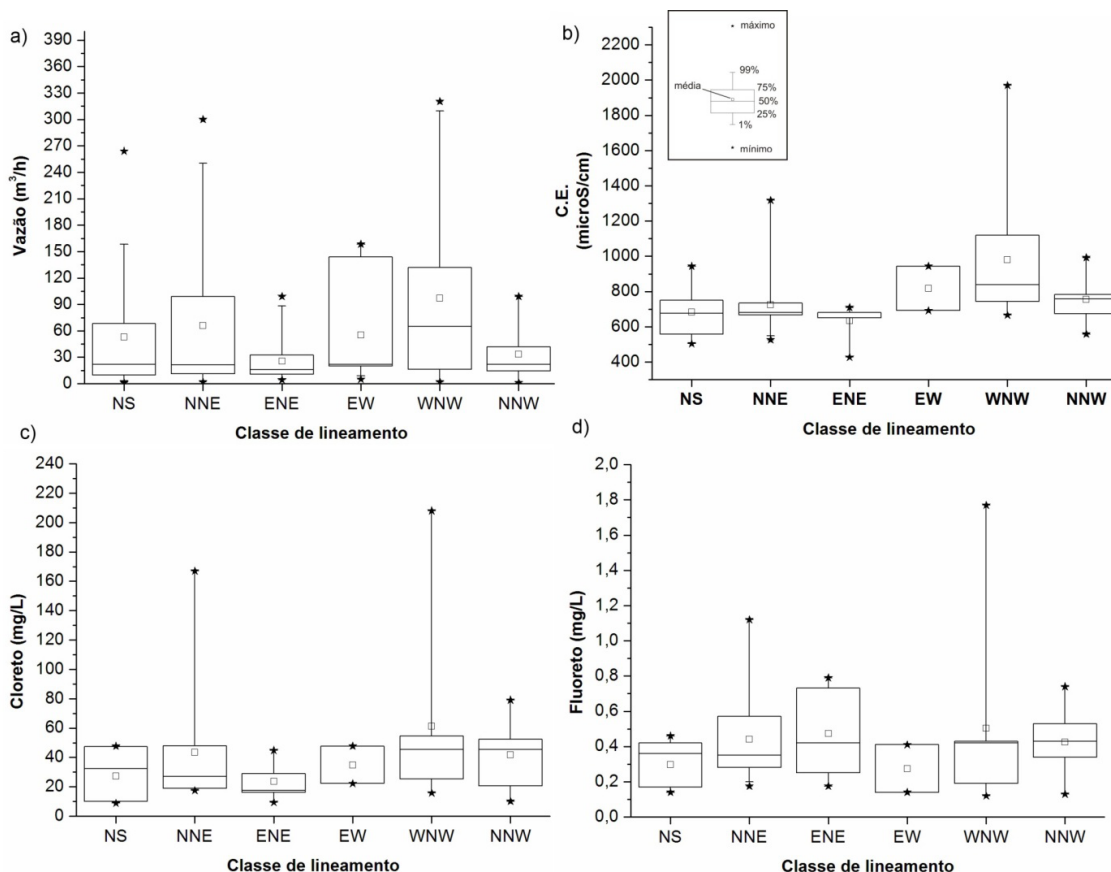


Figura 10 – Parâmetros hidrogeológicos por classe de lineamento. a) Vazão, b) Condutividade elétrica (C.E.), c) Cloreto e d) Fluoreto.

Figure 10 – Hydrogeological parameters for lineaments classes. a) Flow, b) Electrical Conductivity, c) Chloride and d) Fluoride

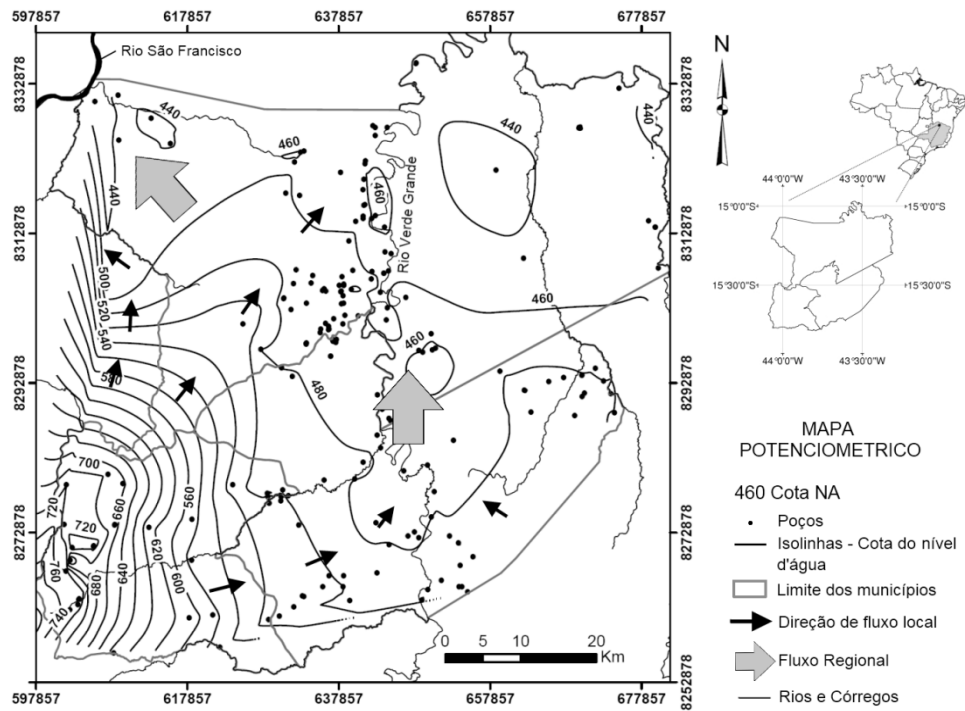


Figura 11 – Mapa potenciométrico.
Figure 11 – Potenciometric map.

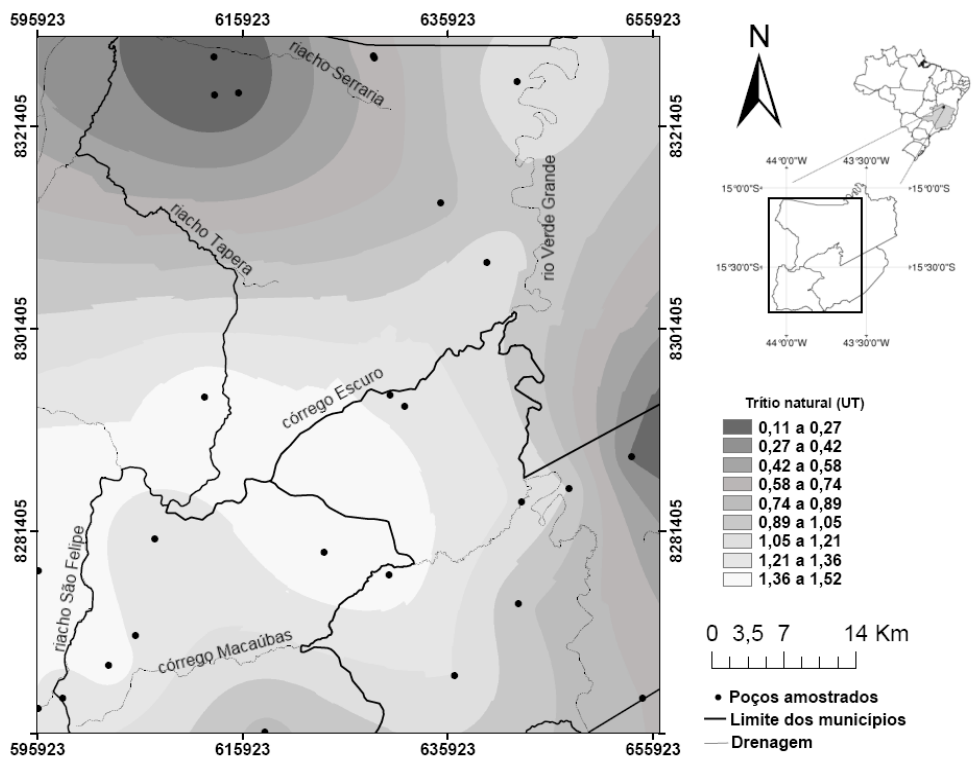


Figura 12 – Mapa de isoconcentrações de trítio natural nas águas subterrâneas.
Figure 12 – Natural Tritium Isoconcentration map in groundwaters.

do Sabonetal e de São Felipe que atravessa o ACI e ACS (FIG. 2). Assim, poços de maiores vazões, localmente associadas às elevadas salinidade, concentrações de Cl⁻ e F⁻, podem ser associados a fluxos nessas descontinuidades mais abertas, relativamente profundas e importantes para a descarga regional.

Os poços associados às direções de lineamentos ENE e NNW são pouco produtivos, indicando menor permeabilidade nessas direções, dada a baixa frequência ou a natureza fechada das fraturas. De fato, tais direções não representam fraturas e feições cársticas frequentes no ACI (QUADRO 1).

A frequência de lineamentos ENE é a menor dentre as classes (TAB. 5), com representatividade nas fraturas e feições cársticas no ACS. É notório que os poços associados a lineamentos na direção ENE apresentem águas menos salinizadas do que os poços associados a outras classes. Provavelmente, as fraturas ENE apresentam abertura importante na superfície e se fecham em profundidade, sendo responsáveis pelo escoamento do fluxo local, especialmente no ACS, com concentrações de Cl⁻ mais baixas, e menor tempo de residência.

Os resultados obtidos são semelhantes aos de Sil-

va (1984) sobre a existência de uma carstificação mais rasa ao longo das fraturas N30-40E e de uma carstificação mais profunda nas direções N60-70W e N30-40W.

As maiores vazões estão relacionadas, principalmente, a estruturas importantes para fluxos regionais, com águas mais salinizadas de maior tempo de renovação, e as vazões menores, relacionadas a fluxos locais em áreas de recarga.

Concentrações mais elevadas de F⁻ ocorrem em águas de poços NAL (média: 0,8 mg/L), com maior tempo de renovação, em contraste com os poços AL (média: 0,44 mg/L) (TAB. 4). Entretanto, entre estes, verifica-se que a direção WNW, que exibe as maiores vazões, apresenta, por vezes, concentrações elevadas de F⁻, com média de 0,50 mg/L e máximo de 1,77 mg/L (TAB. 7), o que pode ser devido à sua associação com estruturas controladoras de fluxos profundos, de maior tempo de residência. As direções NS e NNE são as que apresentam as condições mais favoráveis, concomitantemente, aos aspectos quantitativo e qualitativo das águas. (TAB. 7 e QUADRO 1).

Tabela 5 – Número de poços (n) com valores de Vazão (Q), Condutividade Elétrica (C.E.), concentração de cloreto (Cl⁻) e fluoreto (F⁻) por classe de lineamento.

Table 5 – Number of boreholes (n) with flow (Q) value and electrical conductivity (C.E) per class of lineament.

Classe	Direções	Azimute	Lin. (n)	Poços (n)	Q (n)	CE (n)	Cl ⁻ (n)	F ⁻ (n)
NS	N15W a N15E	165 -15	722	30	24	6	6	6
NNE	N15-45E	15-45	666	26	23	11	11	11
ENE	N45-75E	45-75	375	22	18	8	8	5
EW	N75-90E a N75-90W	75-105	516	12	11	2	2	2
WNW	N45-75W	105-135	872	32	28	10	10	8
NNW	N15-45W	135-165	674	25	23	8	8	8

Tabela 6 – Vazão e condutividade elétrica em poços associados a lineamentos nas classes de lineamentos.

Table 6 – Flow and C.E. in boreholes associated to lineaments in each lineament class.

VAZÃO (m ³ /h)	NS	NNE	ENE	EW	WNW	NNW	C.E. (µS/m)	NS	NNE	ENE	EW	WNW	NNW
n	24	23	18	11	28	23	n	6	11	8	2	10	8
média	53	66	26	55	97	33	média	683	726	635	818	979	755
mediana	22	22	15	22	58	22	mediana	671	680	666	-	815	732
mín.	1	2	4	5	2	1	mín.	504	526	427	692	666	558
máx.	264	300	99	158	320	99	máx.	944	1318	709	944	1970	992
d.p	63	88	27	58	101	29	d.p	142	210	86	126	382	137
Classes	n (%)	n (%)	n (%)	n (%)	n (%)	n (%)	Classes	n (%)	n (%)	n (%)	n (%)	n (%)	n (%)
Baixa (0 - 20)	11(45)	11(48)	13(72)	4(36)	9(32)	8(35)	300 a 500	0	0	1(12)	0	0	0
Média 20-60	4(17)	5(22)	3(17)	4(36)	5(18)	11(48)	500 a 700	4(67)	7(64)	6(75)	1(50)	2(20)	3(38)
Alta (60-100)	4(17)	2(9)	2(11)	0	3(11)	4(17)	700 a 900	1(17)	3(27)	1(12)	0	4(40)	3(38)
Muito alta (100-200)	4(17)	2(9)	0	3(27)	5(18)	0	900 a 1100	1(17)	0	0	1(50)	1(10)	2(25)
Excepcionais (200-330)	1(4)	3(13)	0	0	6(21)	0	1100 a 1300	0	0	0	0	1(10)	0
							>1300	0	1(9)	0	0	2(20)	0

Tabela 7 – Concentrações de cloreto e fluoreto em poços associados a lineamentos nas classes de lineamentos.
Table 7 – Chloride and fluoride concentrations in boreholes associated to lineaments in each lineament class.

Cloreto (mg/L)	NS	NNE	ENE	EW	WNW	NNW	F ⁻ (mg/L)	NS	NNE	ENE	EW	WNW	
	n	6	11	8	2	10		8	n	6	11	5	2
média	27,38	43,42	23,81	34,95	61,38	41,78	média	0,30	0,44	0,47	0,27	0,50	0,43
mediana	25,20	27,00	17,65	-	42,20	44,75	mediana	0,30	0,35	0,42	-	0,35	0,39
mín.	8,83	17,50	9,38	22,20	15,80	10,10	mín.	0,14	0,18	0,18	0,14	0,12	0,13
máx.	47,70	167,00	44,80	47,70	208,00	79,10	máx.	0,46	1,12	0,79	0,41	1,77	0,74
d.p	16,14	41,33	12,89	12,75	56,69	22,30	d.p	0,12	0,27	0,25	0,13	0,51	0,17
Classes	n(%)	n(%)	n(%)	n(%)	n(%)	n(%)	Classes	n(%)	n(%)	n(%)	n(%)	n(%)	n(%)
0 a 20	3 (50)	5(46)	5(62)	0	2(20)	2(25)	0 a 0,4	4 (67)	6 (55)	2(40)	1(50)	4(50)	4(50)
20 a 40	1(17)	1(9)	1(13)	1(50)	3(30)	1(12)	0,4 a 0,8	2(33)	4 (36)	3(60)	1(50)	3(38)	4(50)
40 a 60	2(33)	4(36)	2(25)	1(50)	3(30)	3(38)	0,8 a 1,2	0	1(9)	0	0	0	0
60 a 80	0	0	0	0	0	2(25)	1,2 a 1,6	0	0	0	0	0	0
>80	0	1(9)	0	0	2(20)	0	1,6 a 2,0	0	0	0	0	1(13)	0

Quadro 1 – Principais resultados obtidos para as classes de lineamentos.
Chart 1 – Major results for lineament classes

CLASSE DE LINE- MENTOS	Representa fraturas frequentes?	Representa direção de feição cárstica frequente ?	
Mais frequente	WNW e NS	Sim	Sim
Maior número de poços associa- dos AL	WNW e NS	Sim	Sim
Melhores vazões	WNW e NNE	Sim	Sim
Piores vazões	ENE	Sim (restrito ao ACS)	Sim (restrito ao ACS)
	NNW	Não	Não
Águas mais salinas (maior C.E. e Cl)	WNW e NNE	Sim	Sim
Águas menos salinas (menor C.E. e Cl)	ENE	Sim (restrito ao ACS)	Sim (restrito ao ACS)
Maior concentração de fluoreto	WNW	Sim	Sim

CONCLUSÕES

A sucessão rítmica de pelitos e carbonatos de espessuras variáveis e os dois tipos de porosidade secundária, fraturas e aberturas de dissolução cárstica, conferem à área um elevado grau de heterogeneidade e anisotropia. Apesar da complexidade hidrogeológica, os métodos de estudos geológicos, destacando-se os mapeamentos e perfis geológicos realizados, e hidrogeológicos empregados propiciaram a proposta de um modelo físico do sistema aquífero principal (cárstico-fissural) e distribuição espacial da recarga. Tal modelo pode ser atestado por meio da análise indireta da salinidade (Condutividade), Cl⁻, Trítio, F⁻, e elevação do nível de água, tendo-se identificado dois

níveis de fluxos, sendo um regional, profundo, e outro local.

As características, quantitativa e qualitativa da água subterrânea, são controladas pelas estruturas permeáveis das rochas, o que permitiu identificar as direções de fluxos que são favoráveis à obtenção de melhores vazões e qualidade adequada ao consumo humano.

Acredita-se que os resultados obtidos podem embasar a implantação de redes de monitoramento, planejamento do uso da água subterrânea e da ocupação das áreas dos municípios estudados, contribuindo para a exploração sustentável dos recursos hídricos e preservação das áreas de recarga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRASIL. Diário Oficial da União. Portaria Nº 518 de 25 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. 26 mar. 2004.
- FREITAS, A. M.; PEREIRA, C.; ATMAN, D. C. Geologia e hidrogeologia de Jaíba, Verdelândia e Varzelândia, norte de Minas Gerais. 2008. 140 p. Trabalho de conclusão de curso em geologia. Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS (CETEC). Pesquisa e avaliação de recursos hídricos subterrâneos em Karst, por sensores remotos. Belo Horizonte: Secretaria de Estado de Ciência e Tecnologia. 1981. 465 p.
- IGLESIAS, M.; UHLEIN, A. Estratigrafia do Grupo Bambuí e coberturas fanerozóicas no vale do rio São Francisco, norte de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 39, n. 2, p. 256-266, 2009.
- NASA. Imagem Landsat Geocover. 2000. Disponível em: <https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/bin/show.pl>. Acesso em: 20 nov. 2009.
- SILVA, A. B. Água subterrânea na bacia do Carste do rio Verde Grande, norte de Minas Gerais. 1995. 97 f. Tese (Concurso público para provimento de vaga de professor titular, área de ciências geológicas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1995.
- SILVA, A. B. Análise morfoestrutural, hidrogeológica e hidroquímica no estudo do aquífero cárstico do Jaíba, norte de Minas Gerais. 1984. 190p. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.
- SILVA, S. M. Os condicionantes geoquímicos dos solos e da recarga sobre as concentrações de flúor dos aquíferos freáticos na região de Varzelândia e Verdelândia, semi-árido mineiro. 2011. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- SILVA, S. M. et al. Hidroquímica das águas subterrâneas e anomalias de fluoreto em região do semi-árido mineiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 15, Natal, Anais..., Natal, Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2008.
- VELÁSQUEZ, L. N. M. et al. Processos geradores de concentração anômala de fluoreto na água subterrânea em região semi-árida: estudo de caso em aquífero cárstico-fissural do Grupo Bambuí nos municípios de Verdelândia, Varzelândia e Jaíba, Minas Gerais. 2009. Belo Horizonte: Fapemig (EDT 83032/06). Relatório, 236 p.
- VELÁSQUEZ, L. N. M. et al. Investigação hidrogeológica do flúor em aquíferos carbonáticos do Médio São Francisco, MG, e epidemiologia da fluorose dentária associada. Relatório CNPq. 2007. 130 p.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG/APQ02216-08), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Instituto de Geociências (IGC) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), e ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM).