

HIDROQUÍMICA E CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS AQUÍFEROS CÁRSTICO-FISSURAL E GRANULAR NO NORTE DE MINAS GERAIS

Dora Atman Costa¹; Leila Nunes Menegasse Velásquez¹; Lúcia Maria Fantinel¹; Adriana Miranda Freitas¹; Cristiany Pereira¹; Paulo César Horta Rodrigues² e Sérgio Melo da Silva¹

Resumo - Os recursos hídricos subterrâneos assumem elevada importância em Verdelândia, Varzelândia e Jaíba, municípios localizados na bacia do médio São Francisco, no semi-árido mineiro. As rochas sedimentares neoproterozóicas do Grupo Bambuí e as coberturas cenozóicas configuram os sistemas aquíferos cárstico-fissural e granular, os quais foram caracterizados com base no mapeamento geológico, análise estatística das características das captações, e análises hidroquímicas de 57 poços profundos e 9 cisternas. Destaca-se o aquífero cárstico-fissural da Formação Lagoa do Jacaré, constituído de calcários com camadas e lentes pelíticas subordinadas, e o aquífero aluvionar. As águas subterrâneas são predominantemente bicarbonatadas cálcicas e bicarbonatadas-cloretadas cálcicas, o que reflete a composição dos solos e rochas dos aquíferos. A influência do clima e da mistura das águas provenientes da drenança do aquitarde Serra da Saudade é identificada através dos altos valores de C.E., Cl⁻, SO₄²⁻ e Na⁺. Em alguns casos as águas subterrâneas apresentam restrições para potabilidade e irrigação.

Abstract - Groundwater resources are very important in Verdelândia, Varzelândia e Jaíba, in semi-arid area of middle São Francisco basin. Two aquifers systems can be recognized: karstic-fractured and porous, represented by neoproterozoic pelitic and carbonate rocks of Bambuí Group and cenozoic sediments. This investigation started with geological mapping and statistical analysis of deep boreholes characteristics with hydrochemical analyses of 66 samples (57 boreholes and 9 dug wells). Lagoa do Jacaré Formation is the main aquifer in the karstic-fractured system and the alluvial deposits constitutes the major granular aquifer. The groundwater in general is Ca-HCO₃ or Ca-HCO₃-Cl, coherent with rocks and soils composition. High values of E.C., Cl⁻, SO₄²⁻ and Na⁺ are indicatives of climatic influence and also leakage from Serra da Saudade aquitard. In some cases groundwater shows restrictions to potability and irrigation.

Palavras chave: hidroquímica; Grupo Bambuí; semi-árido

¹ Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia - UFMG, Av. Antônio Carlos, 6627. Pampulha, Belo Horizonte, MG. CEP: 31270- 901. Tel.: (31) 3409-5446. e-mail: doraabh@gmail.com, menegase@yahoo.com.br

² Comissão Nacional de Energia Nuclear – CDTN\CNEN, Rua Prof. Mário Werneck, s/no., CP 941, Pampulha, Belo Horizonte, MG, CEP:30123-970. Tel.: (31) 3069-3240.

1 - INTRODUÇÃO

Os municípios de Jaíba, Verdelândia e Varzelândia localizam-se na bacia do Médio São Francisco, no semi-árido mineiro (Figura 1). Afloram rochas sedimentares neoproterozóicas (Grupo Bambuí), cretáceas (Grupo Urucuaia) e coberturas cenozóicas que configuram dois sistemas aquíferos: cárstico-fissural e granular. No sistema granular apenas as coberturas cenozóicas serão consideradas por terem maior importância hidrogeológica.

A temperatura e pluviosidade média anual são, respectivamente, 25°C e 789,8 mm, e o *deficit* hídrico calculado é de 594,9 mm ao ano com pequeno excedente apenas nos meses de novembro, dezembro e janeiro (Velásquez et al., 2009). Os dados foram fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET e obtidos na estação meteorológica de Janaúba, situada a 40km da área de pesquisa, no período de 1996 a 2006. A baixa disponibilidade de água superficial, relacionada ao clima e ao sistema de circulação cárstico, e a predominância da atividade agropecuária, facilitada pelo relevo arrasado e áreas de solos agricultáveis, leva ao uso das águas subterrâneas nesses municípios.

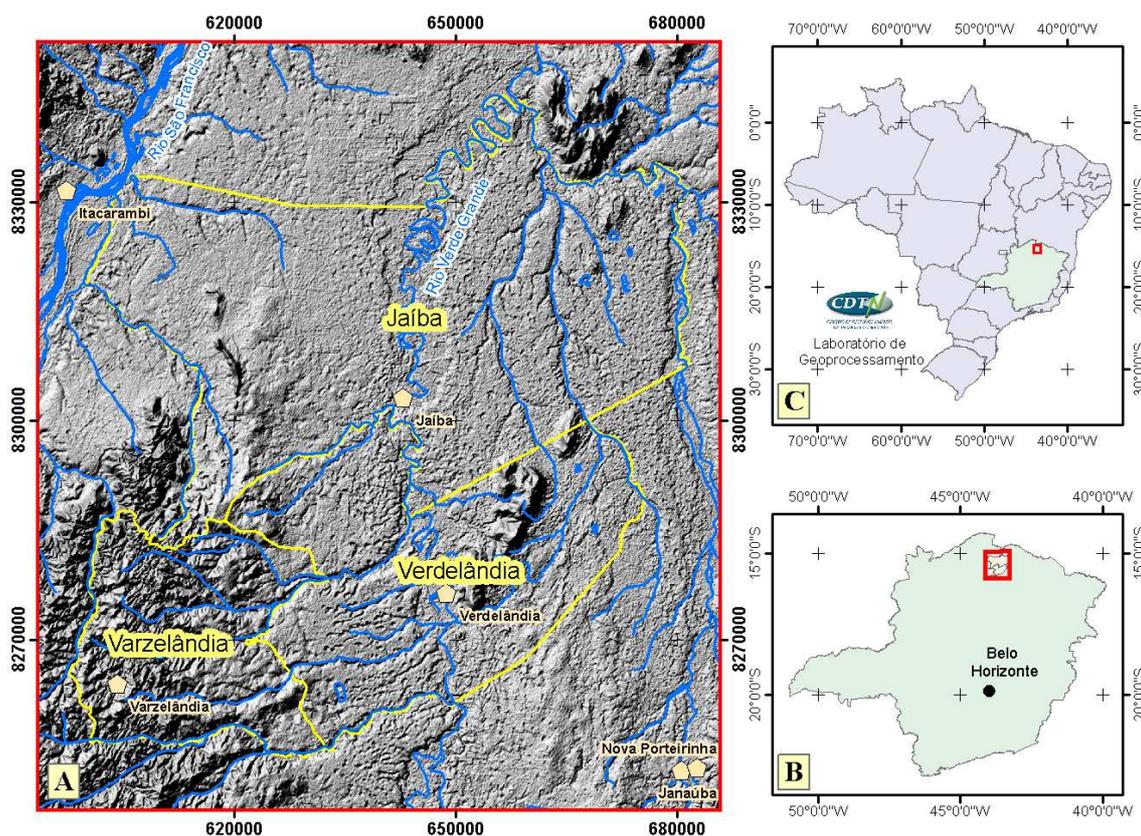


Figura 1. Localização dos municípios de Verdelândia, Jaíba e Varzelândia (limites dos municípios em amarelo) sobre Modelo Digital de Elevação (MDE). Fonte: Freitas et al. (2008)

Quarenta por cento dos poços profundos perfurados são para abastecimento humano, 38% para irrigação de culturas e pastagens e 22% para dessedentação de animais. Em geral, os poços para abastecimento das comunidades rurais e urbanas foram perfurados pelas prefeituras, COPASA

MG (Companhia de Saneamento de Minas Gerais) e INCRA (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária). Em Varzelândia a COPASA utiliza água subterrânea para o abastecimento público da sede municipal e das localidades Campo Redondo e Brejo do Mutambal. O abastecimento das sedes municipais de Verdelândia e Jaíba provém do tratamento da água do rio Verde Grande pela COPASA.

Os sistemas aquíferos abordados, especialmente o cárstico-fissural, são relevantes para os diversos usos na região em estudo e, devido a vasta ocorrência em Minas Gerais são considerados um importante recurso hídrico. Os estudos hidrogeológicos e hidroquímicos desses sistemas aquíferos foram realizados em parceria com o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) e Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (CDTN) nos anos de 2007 e 2008.

2 - OBJETIVO

Caracterizar os sistemas aquíferos cárstico-fissural e granular e avaliar a qualidade das águas subterrâneas que abastecem os municípios de Verdelândia, Jaíba e Varzelândia.

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

As unidades aquíferas foram descritas com base nos dados bibliográficos, nas características hidráulicas e construtivas dos poços e em dados obtidos durante os trabalhos geológicos de campo durante o ano de 2008. Os estudos hidrogeológicos abrangeram a área total dos três municípios (4.996km²), enquanto o mapeamento geológico (1:100.000) foi realizado em uma área equivalente a 1.592km² delimitada pelas coordenadas 15°19' 05'' e 15°44'04'' de latitude S e 43°50'35'' e 43°29'22'' longitude W.

Realizou-se um cadastro com as características dos poços e cisternas perfurados na região de Verdelândia, Varzelândia e Jaíba, cujas principais fontes de consulta foram os documentos de outorga do IGAM e dados da COPASA. Foram selecionados para os estudos hidroquímicos 25 poços, amostrados por Velásquez et al. (2007) nos anos de 2005 e 2006, mais 32 poços e 9 cisternas que fazem parte da rede de monitoramento de águas subterrâneas do IGAM, cuja coleta de água foi realizada em abril/maio de 2008, perfazendo um total de 66 pontos de amostragem.

Os parâmetros medidos “in locu” são: condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), Eh (mV), pH, STD (mg/L) e temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$). As amostras foram devidamente coletadas, armazenadas e refrigeradas e entregues ao laboratório dentro do prazo de 24 horas. Os parâmetros medidos em laboratório estão listados na Tabela 1.

As fácies hidroquímicas foram obtidas utilizando o diagrama de Piper, o risco de sódio e salinidade foi obtido pelo diagrama SAR (*Sodium Absorption Ratio*) e os parâmetros foram

comparados com os valores do padrão de potabilidade da Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde (Brasil 2004).

Tabela 1. Parâmetros medidos em laboratório para análise das águas subterrâneas

Parâmetros		
Condutividade elétrica, $\mu\text{S/cm}$	Cobre total / mg/L	Mercúrio total / mg/L
EH/ mV	Coliformes termotolerantes NMP/100 ml	Níquel total / mg/L
pH	Coliformes totais NMP/100 ml	Nitrato / mg N/L
STD/ mg/L	Cor real / Upt	Nitrito / mg N/L
Temperatura da água / oC	Cromo total / mg/L	Nitrogênio amoniacal / mg/L
Alcal.bicarbonato / mg/L CaCO ₃	DBO / mg/L	Nitrogênio orgânico / mg/L
Alumínio solúvel / mg/L	DQO/ mg/L	Potássio solúvel / mg/L
Alumínio total/ mg/L	Fenóis totais / mg/L	Potássio total / mg/L
Arsênio total / mg/L	Ferro solúvel / mg/L	Silício solúvel / mg/L
Bário total / mg/L	Ferro total / mg/L	Sódio solúvel / mg/L
Bicarbonato mg/L	Fluoreto ionizado / mg/L	Sódio total / mg/L
Cádmio total / mg/L	Fosfato total / mg/L P	Sólidos dissolvidos totais, 103-105°C / mg/L
Cálcio solúvel / mg/L	Magnésio solúvel / mg/L	Sulfatos / mg/L
Cálcio total / mg/L	Magnésio total / mg/L	Sulfetos / mg/L
Chumbo total / mg/L	Manganês solúvel / mg/L	Turbidez / NTU
Cloretos / mg/L	Manganês total / mg/L	Zinco total / mg/L

4 - ESTUDOS ANTERIORES

Estudos hidrogeológicos importantes que abrangem os municípios em estudo, ou parte desses, são apresentados por CETEC (1981), Silva (1984), e Silva (1995). Recentemente vários trabalhos tem sido direcionados a pesquisa geológica e hidroquímica em Verdelândia, Jaíba e Varzelândia devido à identificação de anomalias de fluoreto na água subterrânea e fluorose dentária associada (Velásquez et al., 2007 e 2009, Silva et al., 2008). Entre os trabalhos de mapeamento geológico e levantamento estratigráfico podem ser citados Freitas et al. (2008), Iglesias e Uhlein (2008) e Iglesias e Uhlein (2009).

5 – RESULTADOS

5.1 Geologia

As principais unidades estratigráficas aflorantes nos municípios de Verdelândia, Jaíba e Varzelândia são as formações Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade, Jaíba e Três Marias pertencentes ao Grupo Bambuí, bem como o Grupo Urucuia nas serras do Sabonetal e São Felipe, em Varzelândia. Recobrem essas rochas sedimentos cenozóicos.

A Formação Lagoa do Jacaré reúne calcarenitos e calcirruditos normalmente oolíticos/psolíticos e intraclásticos, intercalados com biolitos e calcilitos. Seguem a Formação

Serra da Saudade, formada por siltitos e ritmitos, e a Formação Jaíba (Chiavegatto et al., 2003), composta por calcilitos, laminitos algálicos e raros corpos de estromatólitos. A unidade de topo do Grupo Bambuí é a Formação Três Marias, composta por arcóseos finos à médios e arenitos calcíferos feldspáticos. Na serra da Jaíba essa unidade é limitada na base por uma discordância erosiva. O Grupo Urucuaia, restrito às serras de São Felipe e Sabonetel em Varzelândia, é representado por arenitos de granulometria média, geralmente silicificados e laterizados. As unidades terció-quadernárias são coberturas areno-argilosas eluvionares, depósitos coluvionares e aluvionares arenosos, e mais raramente coberturas lateríticas.

As unidades estão estruturadas em camadas subhorizontais e pouco deformadas. Exceções são encontradas a leste, onde se identifica uma falha de empurrão (Figura 2) que coloca os calcários da Formação Lagoa do Jacaré sobre os pelitos da Formação Serra da Saudade, e no Sinclinal da Serra da Jaíba de eixo NE-SW, com dobramentos em escala métrica que vergem para NW nos calcários da Formação Jaíba. As direções principais de fraturamento são N60-80W, N30-50E e N10-30E, sendo que as direções N60-80W e N30-50E são coincidentes com as direções frequentes de lineamentos de relevo traçados sobre o Modelo Digital de Elevação (MDE).

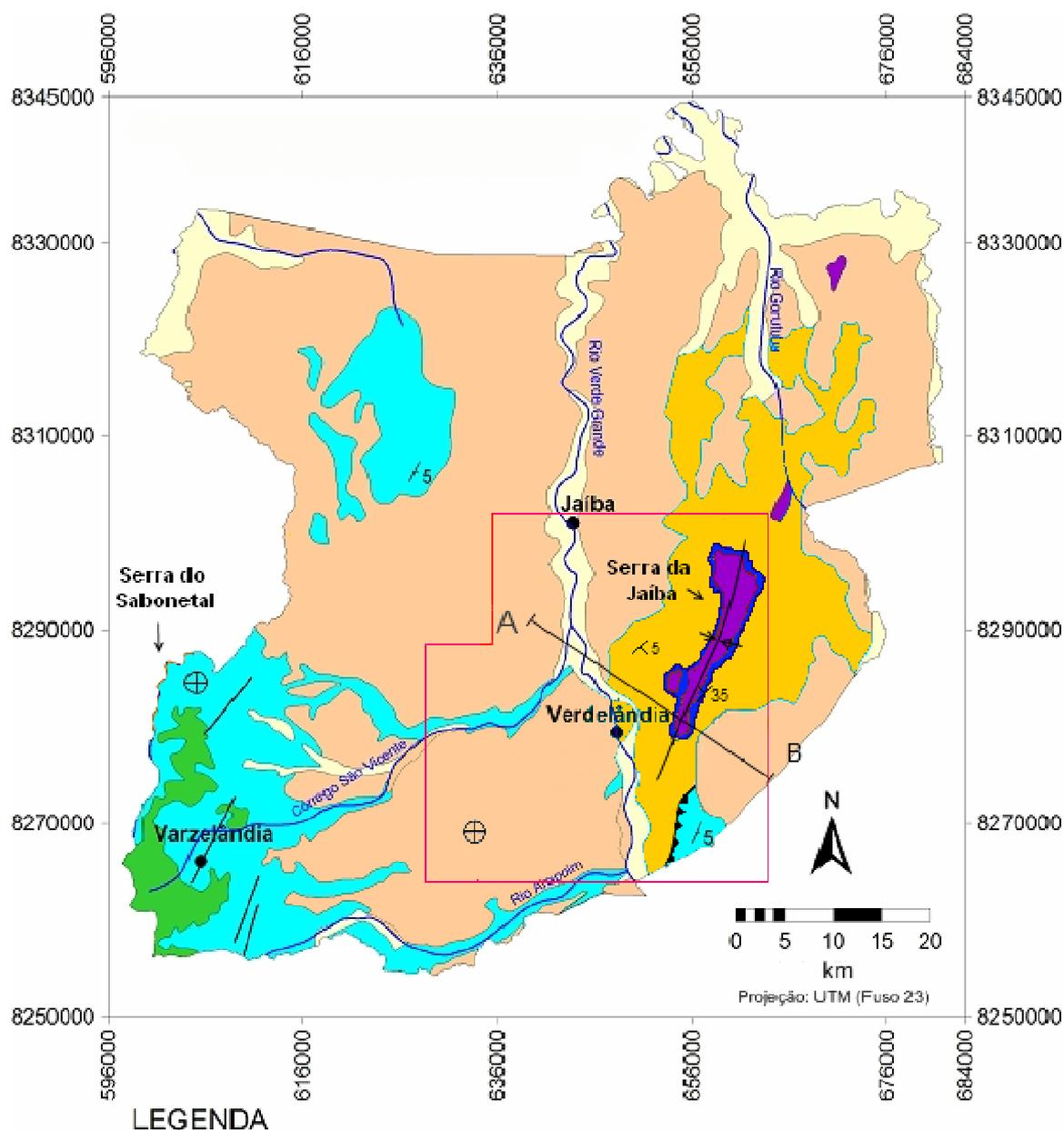
5.2 – Sistemas Aquíferos

Ocorrem na área de estudos dois sistemas aquíferos: granular e cárstico-fissural (Figura 2). O sistema aquífero granular engloba as coberturas cenozóicas (alúvios, colúvios e elúvios) e os arenitos do Grupo Urucuaia. Essas rochas e sedimentos recobrem as rochas pelito-carbonáticas que configuram o sistema aquífero cárstico-fissural do Grupo Bambuí, principal fonte de abastecimento de água subterrânea da região.

O fluxo geral da água subterrânea no aquífero cárstico-fissural tende para NE e NW (Figura 3) tendo como exutórios naturais o rio Verde Grande (exceto a norte da área onde ele é influente) e o rio São Francisco a oeste, respectivamente. As principais áreas de surgência da água subterrânea são: rio Verde Grande a sul de Verdelândia, sudoeste da serra da Jaíba e nas bordas da serra do Sabonetel.

5.2.1 Sistema aquífero cárstico-fissural

O sistema aquífero cárstico-fissural reúne principalmente as rochas pelito-carbonáticas das formações Lagoa do Jacaré e Serra da Saudade. Os calcários da Formação Jaíba e os arcóseos e



LEGENDA

- Contato geológico
- Lineamento
- ⊕ Atitude do acamamento
- ⊕ Acamamento sub-horizontal
- ▲ Falha inversa
- ↕ Sinclinal
- Drenagem
- Cidade

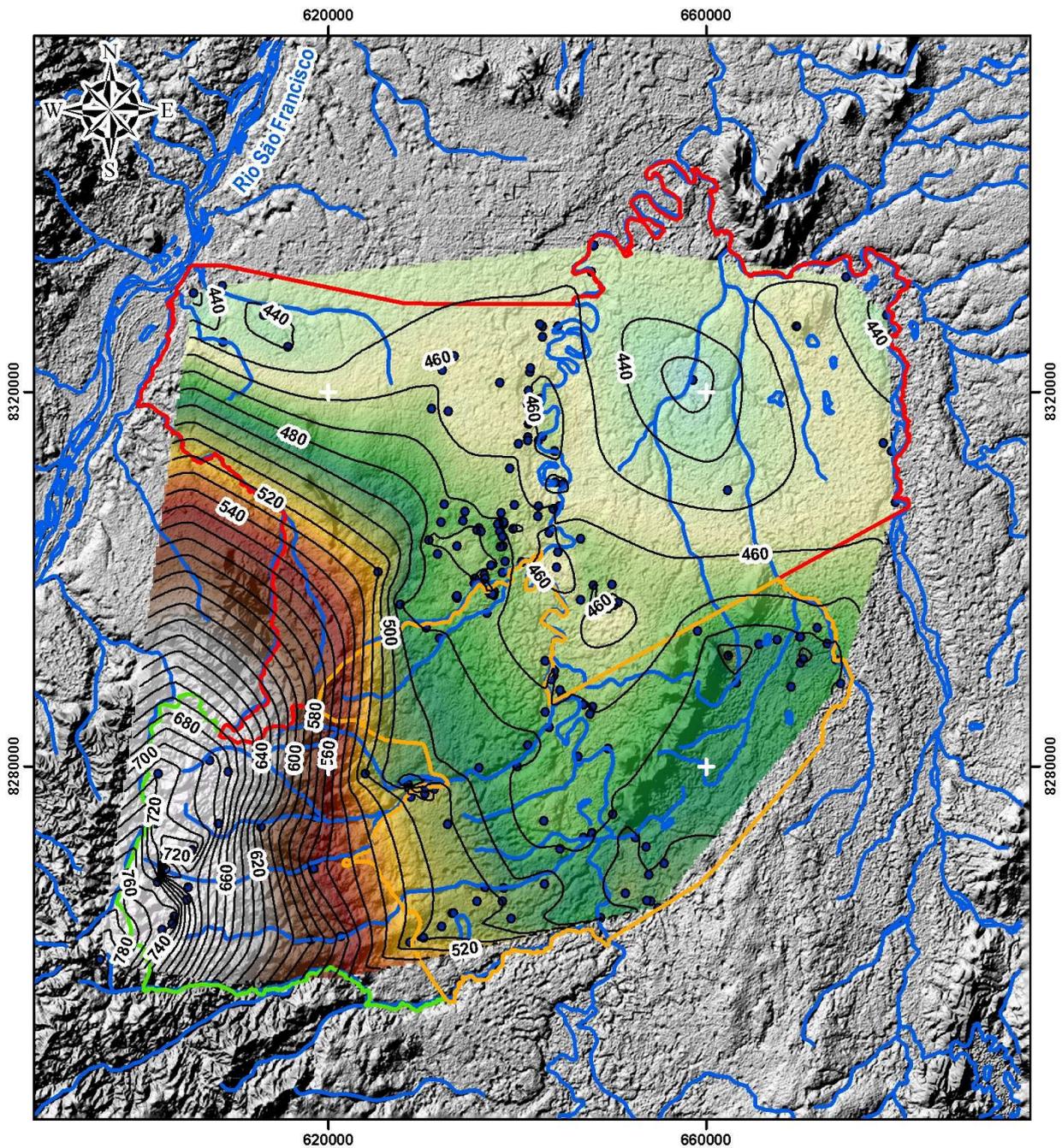
Sistema aquífero granular

- Aquífero aluvionar
 - Aquífero colúvio-eluvionar
 - Aquífero Urucuia
- Sistema aquífero cárstico-fissural**
- Aquíclude - Fm. Três Marias
 - Aquíclude - Fm. Jaíba
 - Aquíclarde - Fm. Serra da Saudade
 - Aquífero - Fm. Lagoa do Jcaré

Perfil ilustrativo AB



Figura 2. Mapa hidrogeológico simplificado da região de estudo. O polígono vermelho indica a área do mapeamento geológico.



Legenda

Limites Municipais:

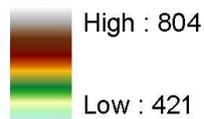
- Jaíba
- Varzelândia
- Verdelândia

— Curvas isopotenciométricas (m)

— Hidrografia

- Poços

Superfície Potenciométrica (m)



Projeção UTM: Fuso 23

Datum horizontal: SAD69

31.out.2008



CENTRO DE DESENVOLVIMENTO
DA TECNOLOGIA NUCLEAR

Laboratório de
Geoprocessamento

Geoprocessamento e
Cartografia Digital:
Geól. Paulo CH Rodrigues

Figura 3. Mapa potenciométrico para o sistema aquífero cárstico-fissural nos municípios de Jaíba, Verdelândia e Varzelândia. Base cartográfica: Modelo Digital de Elevação. Fonte: Freitas et al. (2008)

subarcóseos da Formação Três Marias (Figura 4E), aflorantes na serra da Jaíba, foram considerados aquícludes. A ausência de córregos e rios perenes associados a essa serra e a ausência de poços nessas litologias denotam a pouca importância hidrogeológica direta e mesmo indireta (meio de recarga, por exemplo) dessas formações.

O aquífero cárstico-fissural da Formação Lagoa do Jacaré é constituído de calcários fraturados e carstificados com camadas e lentes pelíticas subordinadas. Grande parte dos calcários está sob coberturas elúvio-coluvionares, entretanto há afloramentos em dolinas e uvalas onde se observa sumidouros, condutos e fendas relacionadas à dissolução, caracterizando uma rede de circulação subterrânea importante (Figura 4Ae B). Os condutos, fendas e cavernas estão principalmente segundo a direção NS-N10W (Figura 4F), sendo freqüentes os condutos desenvolvidos ao longo dos planos de acamamento e segundo a direção N60-80E. Na porção centro-leste da região mapeada os calcários ocorrem sotopostos à Formação Serra da Saudade. Mesmo nos locais onde as rochas carbonáticas estão cobertas, aparecem vales secos, dolinas e uvalas arredondadas e alongadas, com dimensões métricas a quilométricas.

O sistema poroso não constitui um meio importante de recarga do aquífero da Fm. Lagoa do Jacaré, considerando o clima semi-árido que condiciona altas taxas de evaporação e forte ação da capilaridade. Acredita-se, então, que a recarga do aquífero é mais efetiva nas áreas de afloramento, nas zonas de absorção cárstica, condicionadas pelas estruturas resultantes da dissolução (grande quantidade de dolinas e sumidouros) e nas áreas de maior deformação rúptil. Ainda é provável a recarga indireta em trechos onde há aporte de água superficial, mesmo que temporariamente. Na porção leste, onde o aquífero da Fm. Lagoa do Jacaré está sob o aquítarde da Fm. Serra da Saudade a drenança também constitui uma forma de recarga, e os valores altos de condutividade elétrica das águas nesse local refletem esse lento aporte (Figura 5).

O aquítarde da Formação Serra da Saudade reúne rochas metapelíticas que contém laminações carbonáticas e porções margosas. As rochas apresentam um fraturamento elevado e exibem descontinuidades paralelas ao S_0 devido à variação granulométrica e composicional, como laminações carbonáticas (Figura 4C e D).

As rochas pelíticas, em geral, exibem planos de descontinuidades com aberturas muito estreitas e incipiente conexão entre as estruturas rúpteis, que dificultam o armazenamento e o fluxo de água subterrânea. Constituem a base da serra da Jaíba e estendem-se para norte na porção leste de Verdelândia e Jaíba. No domínio de sua ocorrência estão perfurados cerca de 20% dos poços cadastrados. Entretanto apenas dois poços registrados exploram água exclusivamente dessa unidade, denotando que, somente em zonas restritas a Formação Serra da Saudade pode comportar-se como um aquífero.

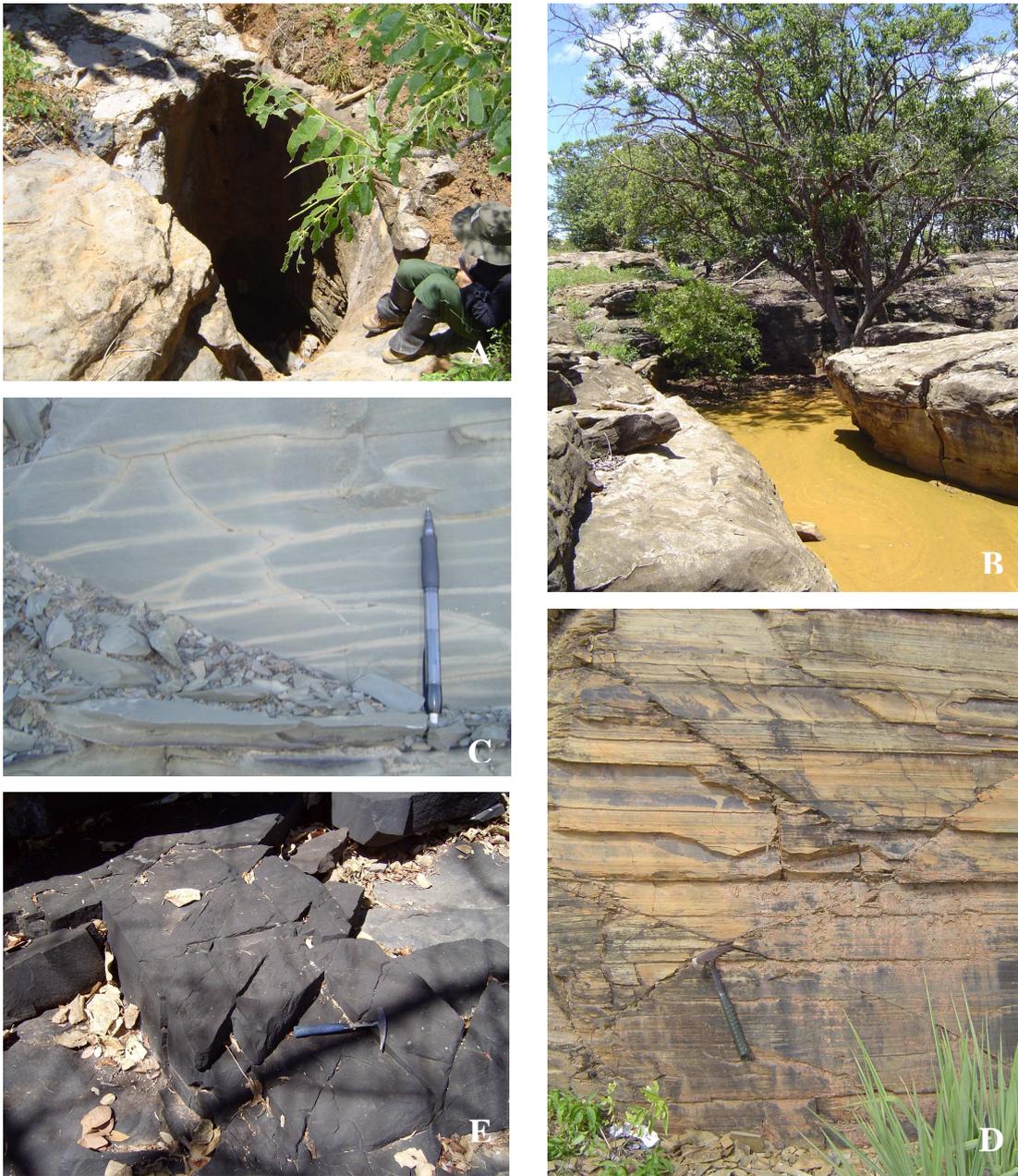


Figura 4. Sistema aquífero cárstico-fissural: Zonas de absorção cárstica em dolinas na Formação Lagoa do Jacaré em Verdelândia: A) sumidouro, fazenda Cachoeira do Salto e B) Fendas e condutos cársticos, fazenda Itapoã; C) Fraturas oblíquas e paralelas ao S_0 no siltito laminado da Formação Serra da Saudade; D) Sistema de fraturas de abertura estreita desenvolvido no ritmito da Formação Serra da Saudade; E) Sistema de fraturas fechadas nos arcóseos da Formação Três Marias, riacho do Zabelê na serra da Jaíba. F) Diagrama de roseta das direções dos condutos, fendas e cavernas na Fm. Lagoa do Jacaré. Fonte: Freitas et al. (2008)

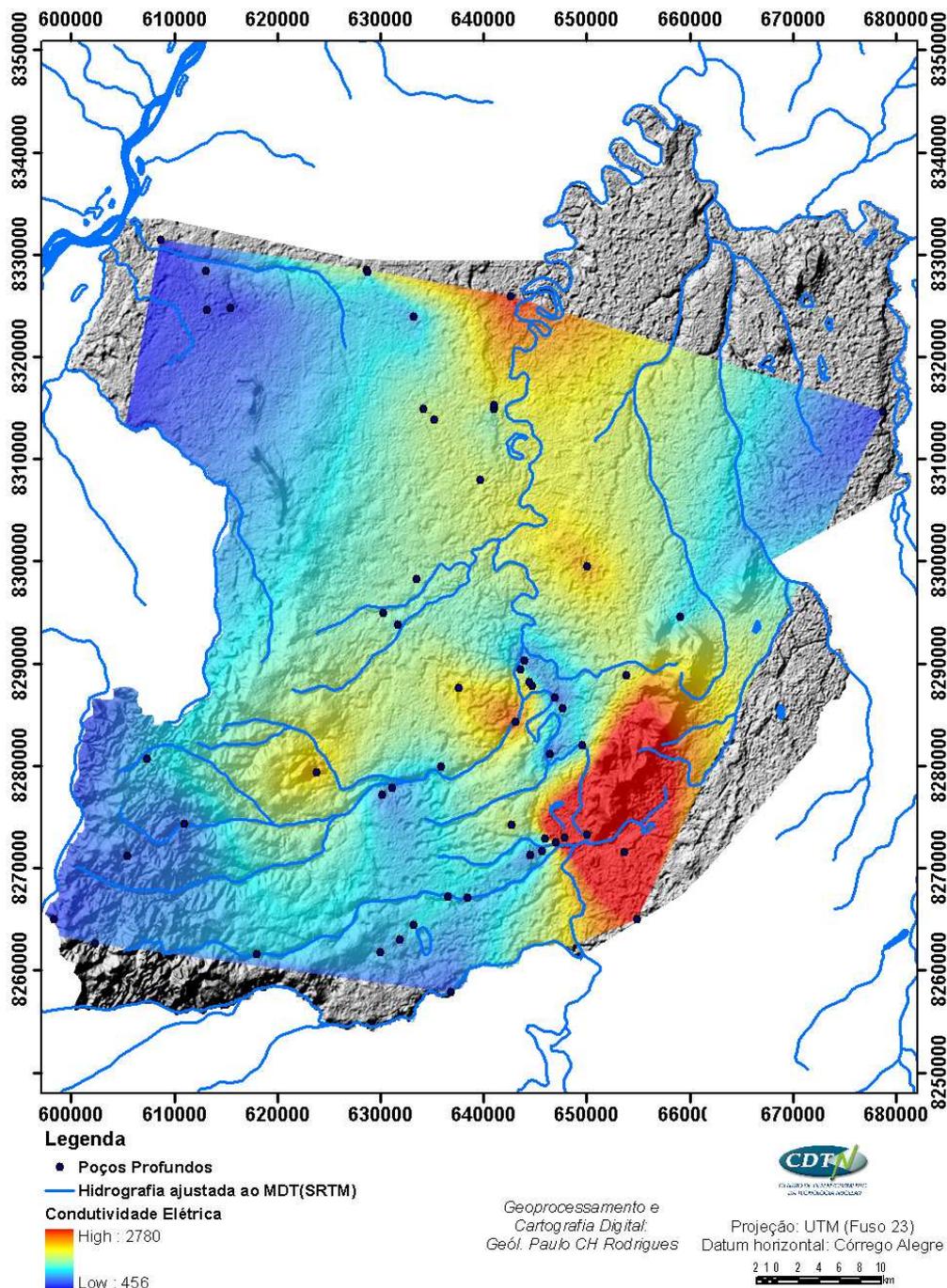


Figura 5. Mapa de isovalores de condutividade elétrica

As características construtivas e os parâmetros hidráulicos dos poços são bastante variados o que reflete a heterogeneidade do sistema aquífero cárstico-fissural (Tabela 2). Os dados de entrada d'água indicam uma maior produtividade entre as cotas 420 e 480m, assim distribuídas: a primeira entrada d'água (37%) entre 460 e 480m e última entrada d'água (27%) entre as cotas 420 e 440m.

As vazões dos poços na região em estudo são bastante variáveis e foram agrupadas em classes para comparação (Tabela 3). São mais frequentes poços com vazões menores que $20\text{m}^3/\text{h}$, entretanto existem registros de poços com vazões excepcionais, de até $300\text{m}^3/\text{h}$, perfazendo 7% dos dados. As maiores vazões são oriundas das zonas mais carstificadas das proximidades de Jaíba e nas

zonas mais deformadas a sul da serra da Jaíba (Figura 6). No primeiro caso, a recarga direta é facilitada pela existência de solos rasos e terreno plano, com maior exposição das rochas carbonáticas, já no segundo caso a infiltração e permeabilidade são favorecidas pelas estruturas, como falhas e fraturas resultantes da maior deformação nas rochas nesse local (Figura 2).

Tabela 2. Características dos poços cadastrados. Fonte: Freitas et al. (2008)

	Nº de Poços	Média	Mediana	Intervalo de maior frequência	% de poços no intervalo de maior frequência	Min.	Max.	Desvio Padrão
Profundidade (m)	227	89.7	90.0	80 a 100	33%	8.0	198.0	30.4
Prof. Revest (m)	144	24.0	19.5	0 a 20	51%	3.0	69.0	15.7
Nível Estático - Teste (m)	207	15.63	14.00	0 a 20	75 %	0.00	52.80	9.81
Nível Dinâmico (m)	198	34.18	26.10	20 a 40	38%	1.50	145.30	22.66
Vazão de teste (m³/h)	265	54.15 (38.2*)	23.00	10 a 20	22%	0.16	320.40	68.87
Rebaixamento (m)	199	18.55	10.85	0 a 10	41%	0.00	112.80	20.49

* Média das vazões desconsiderando os valores anômalos (maiores que 100 m³/h)

Tabela 3. Distribuição das vazões nos municípios em estudo. Fonte: Freitas et al. (2008)

Classe	Vazão m ³ /h	Número de poços	%
Baixa	<20	111	42
Média	20 a 60	74	28
Alta	60 a 100	40	15
Muito alta	100 a 200	22	8
Excepcional	>200	18	7
TOTAL		265	100

A variação litológica e sua influência no sistema aquífero cárstico-fissural é bem marcada no mapa de vazões (Figura 6). Observa-se a predominância das maiores vazões no domínio do aquífero da Formação Lagoa do Jacaré (rochas de maior porosidade e permeabilidade), especialmente na porção central da área. A faixa de vazões intermediárias a altas alonga-se na direção N-S, a qual é concordante com a direção principal dos condutos e fendas medidos em campo e com o fluxo superficial regional. As vazões menores estão a leste da área, no domínio dos pelitos da Formação Serra da Saudade. As baixas vazões e o nível d'água profundo são provavelmente a razão do reduzido número de poços perfurados nessa área.

5.2.2- Sistema Aquífero Granular

As coberturas colúvio-eluvionares recobrem a maior parte da área, enquanto os depósitos aluvionares localizam-se principalmente no vale do rio Verde Grande e em alguns trechos do

córrego Macaúbas e do rio Arapoim, os quais são intermitentes. As coberturas aluvionares constituem os aquíferos rasos mais utilizados através da captação por cisternas para abastecimento doméstico. A recarga desses aquíferos é do tipo indireta a partir das concentrações superficiais ao longo dos vales, principalmente ao longo do rio Verde Grande (perene), podendo alcançar os aquíferos carbonáticos mais profundos.

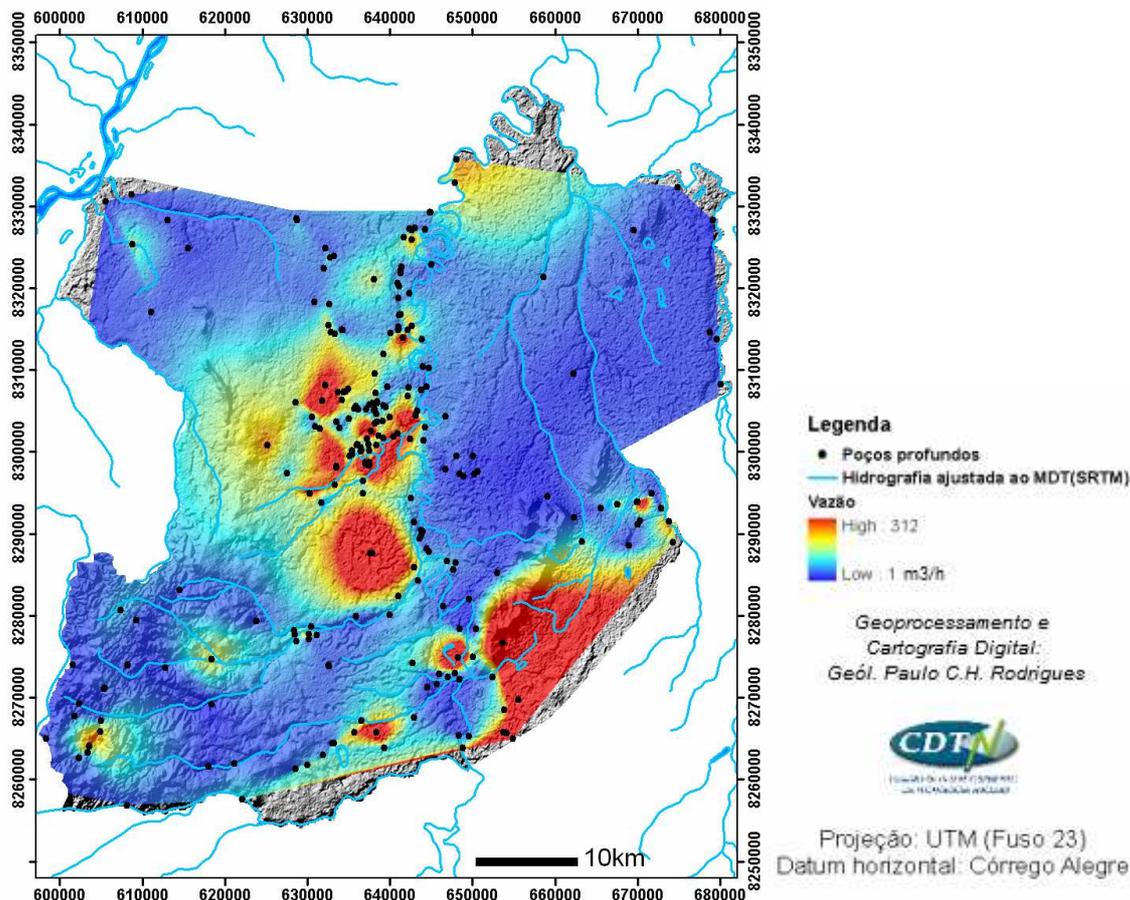


Figura 6. Mapa de vazões dos poços tubulares. Fonte: Freitas et al. (2008)

A profundidade do revestimento dos poços foi utilizada para estimar a espessura das coberturas. Os valores apresentam grande variação, com espessura máxima de 68 metros. A cobertura é mais espessa em Jaíba (noroeste e nordeste do município), no assentamento Boa Esperança (oeste de Verdelândia) e a oeste da serra da Jaíba. Além das coberturas, compõem o sistema aquífero granular, os arenitos cretáceos do Grupo Urucuaia, que afloram na serra do Sabonetal no município de Varzelândia. Embora não apresente registros de poços perfurados, essa unidade localiza-se em uma área de recarga e provavelmente exerce papel importante para o fluxo de base dos afluentes intermitentes da margem oeste do rio Verde Grande, visto que esses afluentes apresentam água por mais tempo próximo às cabeceiras.

5.2 - CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA

O balanço iônico das análises hidroquímicas apresentou erro máximo de 11,4% e média dos erros de 2,7% (erro prático definido por Logan 1965).

No **aquífero cárstico-fissural** predominam águas bicarbonatadas cálcicas (82,4%), raramente cloretadas cálcicas com concentrações variadas de sódio e magnésio (Tabela 4; Figura 7A; e Figura 8). As concentrações de cloreto e sulfato apresentam grande variação. Em alguns casos a quantidade de sódio pode ultrapassar a de cálcio, resultando em águas bicarbonatadas sódicas (8,8%) e o cloreto pode preponderar sobre o bicarbonato, resultando em águas cloretadas cálcicas (8,8%).

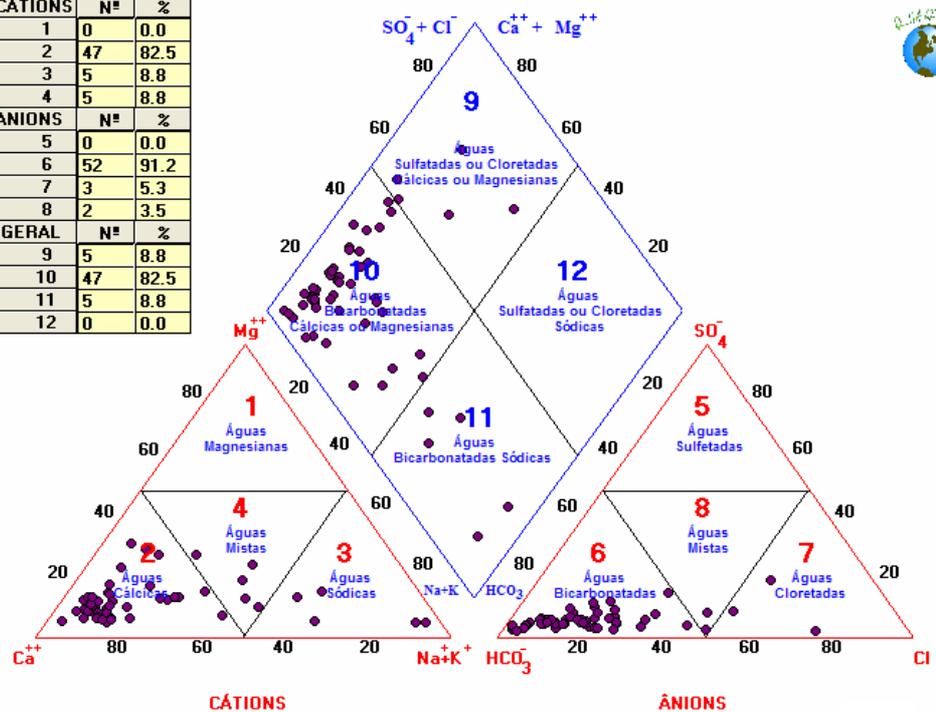
De acordo com o Diagrama de Piper, 77,8% das águas do **aquífero granular** são do tipo bicarbonatadas cálcicas, enquanto 22,2% pertencem a classe das águas cloretadas cálcicas (Figura 7B). As características físico-químicas (Figura 8; Tabela 4) indicam: águas com elevada salinização natural com predominância de bicarbonato e grande variação das concentrações de cloreto e sulfato. As concentrações de magnésio e potássio são em geral baixas, predominando o íon cálcio seguido do sódio. Os solos carbonáticos da região de estudo, relacionados ao manto de intemperismo dos calcários da Formação Lagoa do Jacaré e a precipitação por evaporação, resultam em águas predominantemente bicarbonatadas cálcicas, com pH predominantemente alcalino (média de 7,14).

As características hidroquímicas dos aquíferos aluvionar, colúvio-eluvionar, carbonáticos e pelito-carbonáticos de toda a porção mineira da bacia do São Francisco, apresentados em Mourão et al. (2001), foram comparadas com as águas dos sistemas aquíferos granular e cárstico-fissural da região de estudo. Os resultados indicam que as águas subterrâneas em Verdelândia, Jaíba e Varzelândia são muito mais salinizadas, com valores altos de condutividade elétrica, cloreto e sulfato, enquanto os valores de pH e Fe total são semelhantes aos do contexto regional e local (Tabela 5).

Na área em estudo, apenas pouco mais da metade das amostras do aquífero cárstico-fissural são doces (54,4%), enquanto 45,6% são salobras, segundo Resolução CONAMA N° 357/2005 (CONAMA, 2005).

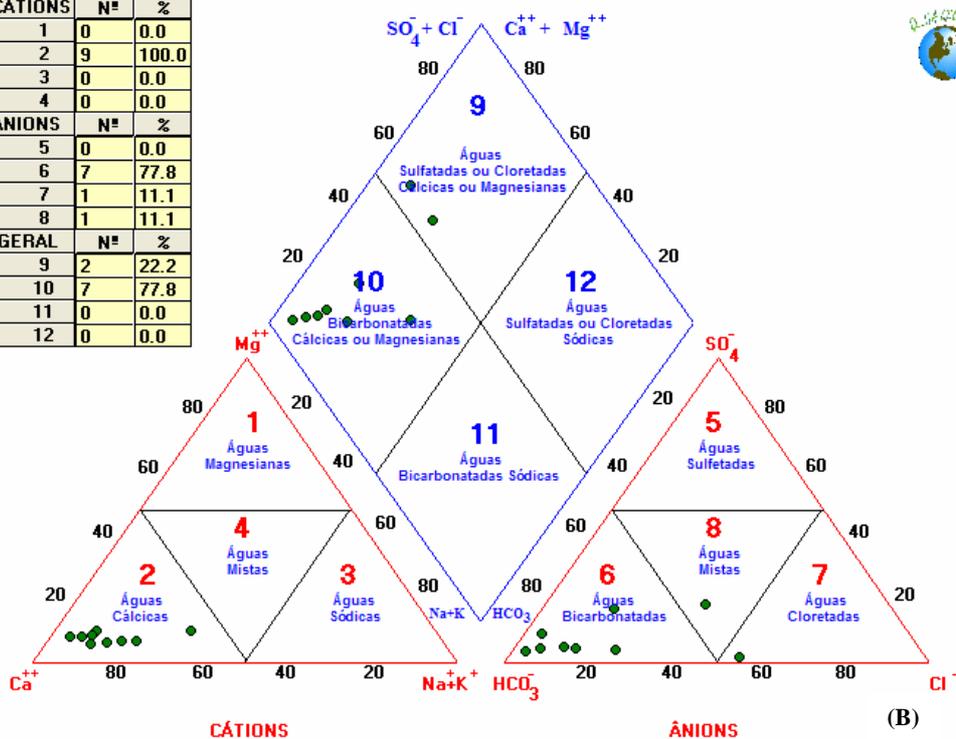
As concentrações em geral elevadas de cloreto, sulfato, e eventualmente sódio, nos poços e cisternas, podem estar relacionadas aos processos de concentração de elementos nos solos devido à alta taxa de evaporação, típicos do clima semi-árido. As chuvas concentradas em um curto período provocam a lixiviação e transporte desses íons, até as zonas inferiores do aquífero, aumentando, por consequência os sólidos totais dissolvidos e a condutividade elétrica.

CATIONS	Nº	%
1	0	0.0
2	47	82.5
3	5	8.8
4	5	8.8
ANIONS	Nº	%
5	0	0.0
6	52	91.2
7	3	5.3
8	2	3.5
GERAL	Nº	%
9	5	8.8
10	47	82.5
11	5	8.8
12	0	0.0



(A)

CATIONS	Nº	%
1	0	0.0
2	9	100.0
3	0	0.0
4	0	0.0
ANIONS	Nº	%
5	0	0.0
6	7	77.8
7	1	11.1
8	1	11.1
GERAL	Nº	%
9	2	22.2
10	7	77.8
11	0	0.0
12	0	0.0



(B)

Figura 7. Diagrama de Piper para classificação das fácies hidroquímica das águas dos aquíferos cárstico-fissural (A), n=57 dados, e granular (B), n=9 dados. Fonte: Freitas et al. (2008)

Tabela 4. Valores estatísticos para os parâmetros físico-químicos e concentrações dos íons maiores nas águas subterrâneas (valores em mg/L). Fonte: Freitas et al. (2008)

Parâmetro	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
Cisternas						
STD	9	574	508	307	1022	233
Cond	9	802	720	441	1384	313
pH	9	7.1	7.1	6.6	7.6	0.3
Eh	9	81.5	126.0	-153.0	176.0	106.1
K ⁺	9	2.9	2.3	0.8	8.2	2.4
Na ⁺	9	28.5	15.0	4.6	76.9	26.5
Ca ²⁺	9	129.9	120.4	73.3	202.9	38.4
Mg ²⁺	9	6.6	6.3	3.6	11.5	2.5
SO ₄ ²⁻	9	25.9	12.8	1.0	104.0	33.8
HCO ₃ ⁻	9	357.2	366.5	179.6	534.5	107.4
Cl ⁻	9	68.3	41.4	5.6	269.0	82.9
Poços profundos						
STD	56	539	416	247	2080	345
C.E	57	854	735	456	2782	442
pH	57	7.2	7.0	6.3	8.4	0.5
Eh	53	67.7	66.0	-123.0	649.0	109.4
K ⁺	57	2.1	1.9	1.2	4.8	0.7
Na ⁺	57	37.1	21.4	3.9	213.4	41.2
Ca ²⁺	57	121.2	119.4	4.8	339.7	62.6
Mg ²⁺	57	11.6	9.2	2.3	52.0	9.4
SO ₄ ²⁻	57	21.8	12.7	1.2	259.0	36.1
HCO ₃ ⁻	57	365.0	362.8	224.6	510.9	60.8
Cl ⁻	57	79.3	45.0	1.2	749.0	131.3

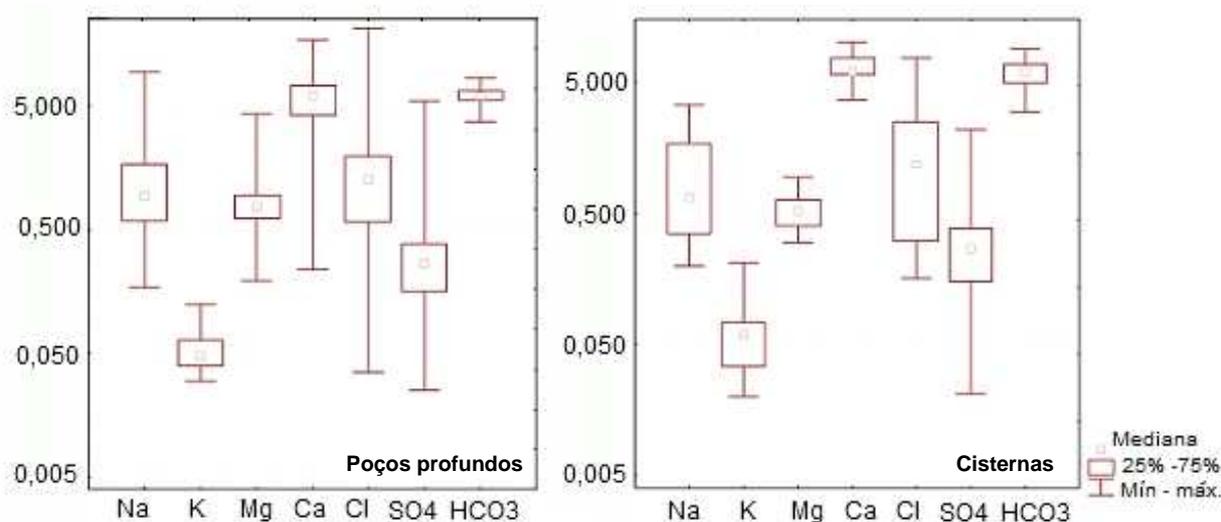


Figura 8. Concentrações dos íons maiores das águas em poços profundos e cisternas. Fonte: Freitas et al. (2008)

Tabela 5. Comparação entre as características das águas subterrâneas na área de estudo e os valores médios dos parâmetros para os aquíferos na porção mineira da bacia do São Francisco descritos em Mourão et al. (2001). Fonte: Freitas et al. (2008)

Tipo de captação amostrada	Aquíferos de referência	Condutividade Elétrica (µS/cm)		pH		Cl ⁻ (mg/L)		SO ⁻⁴ (mg/L)		Fe Total (mg/L)	
Cisternas	Aluvionar e colúvio-eluvionar	802.6	159,5	7.1	7,04	68.3	6,8	25.9	4,1	0.27	0,2
Poços	Rochas carbonáticas	854	436	7.2	7,3	79	19	22	15	0.4	0,5
	Rochas Pelito-carbonáticas		427		8		30		8		0,4

Para todos os poços profundos analisados observa-se que os sólidos totais dissolvidos têm correlação positiva forte com o cloreto (coeficiente de correlação linear de Pearson igual a 0,94) e também com o cálcio, sulfato, magnésio, sódio e bicarbonato, em ordem decrescente dos coeficientes de correlação mostrando a ordem de importância desses íons na salinização.

O diagrama SAR (*Sodium Absorption Ratio*) indica que as águas do aquífero cárstico-fissural possuem risco de sódio baixo a forte e risco de salinidade de médio a muito alto (Figura 9). As águas do aquífero granular apresentam risco de sódio baixo e risco de salinidade médio a alto (Figura 10).

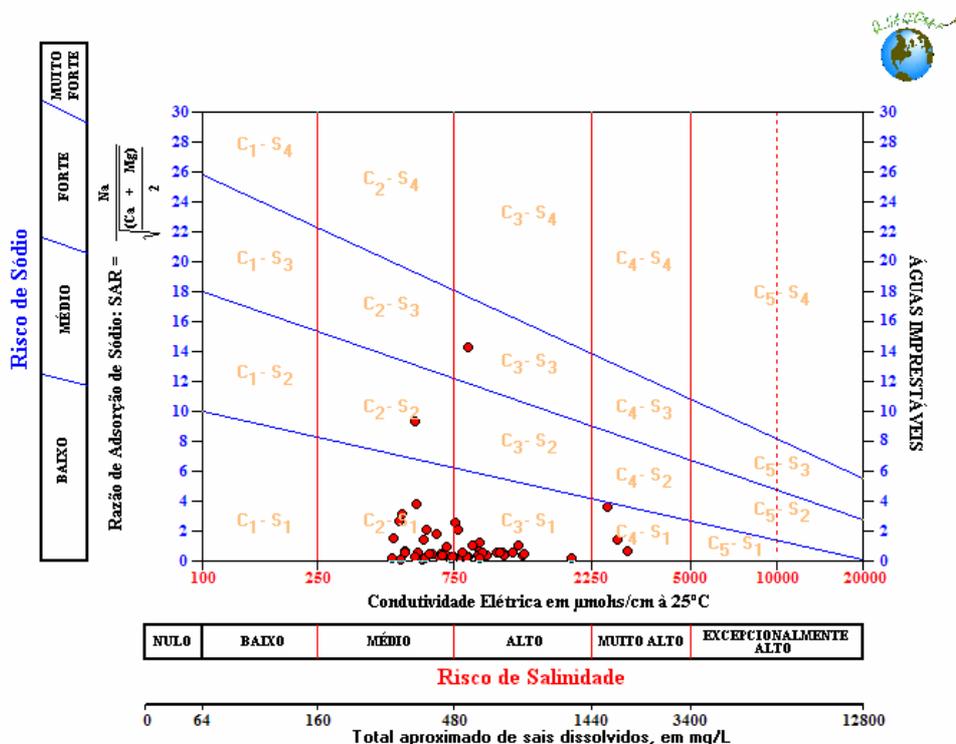


Figura 9. Risco de sódio e risco de salinidade para as águas do aquífero cárstico-fissural. Fonte: Freitas et al. (2008)

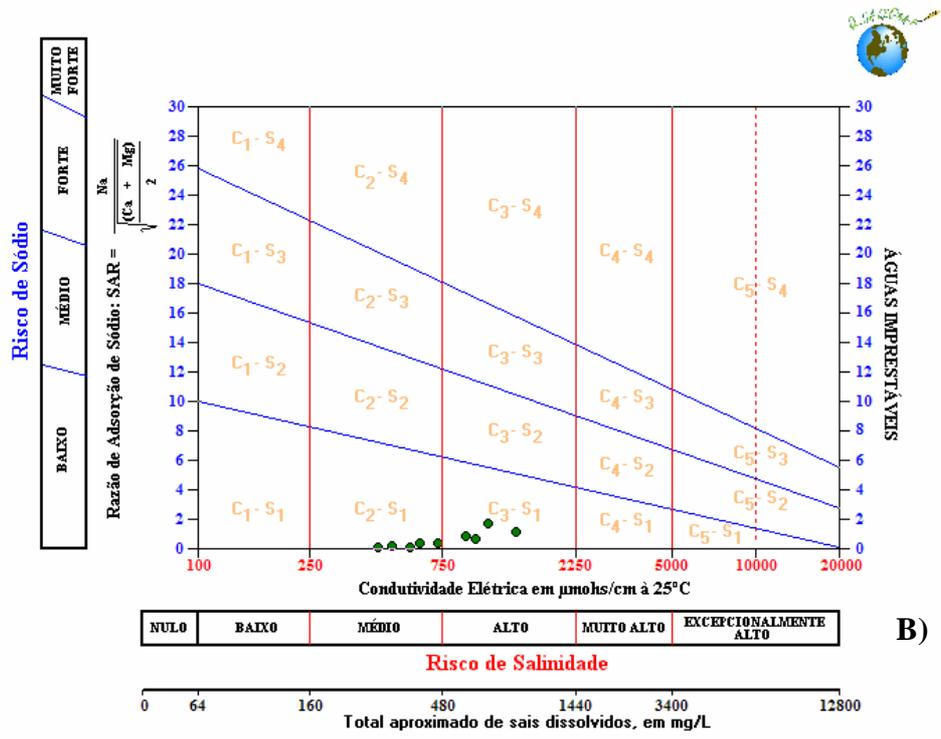


Figura 10. Risco de sódio e risco de salinidade para as águas do aquífero granular. Fonte: Freitas et al. (2008)

Segundo à Portaria M.S. 518/2004 (Brasil, 2004) os parâmetros que apresentam riscos a saúde, ou cujos valores estão acima do padrão de aceitação para consumo humano, são: coliformes totais, coliformes termotolerantes, cor real, ferro total, manganês total, alumínio total, fluoreto, dureza, cloreto, chumbo, turbidez, nitrato, nitrogênio amoniacal, sólidos totais dissolvidos, arsênio e sódio (Figura 11).

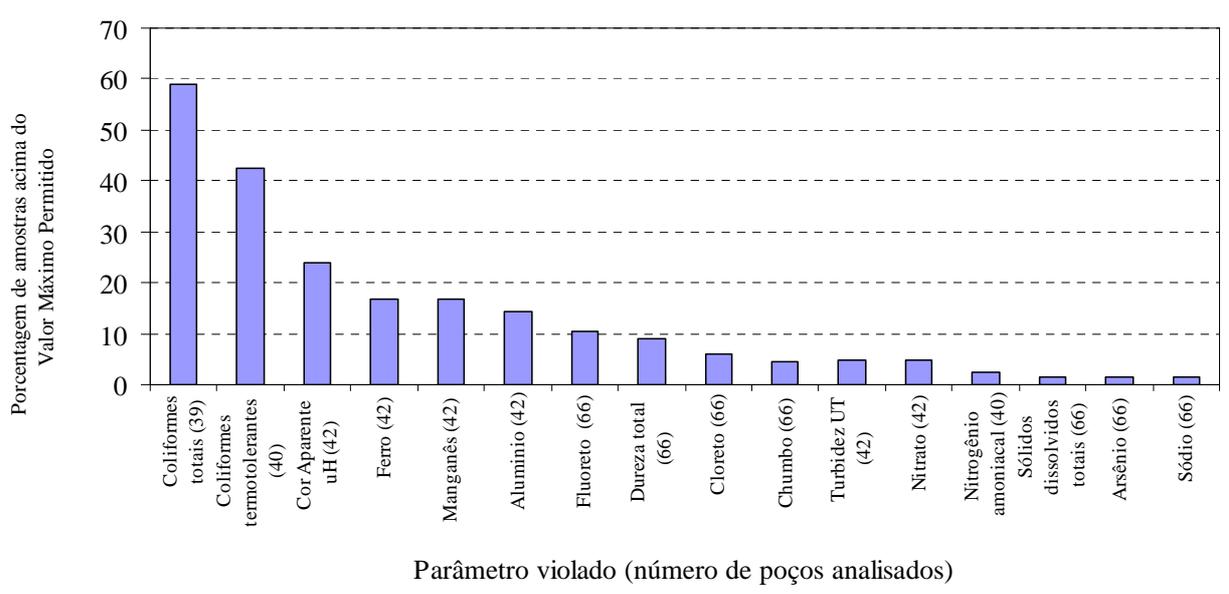


Figura 11. Porcentagem de amostras por parâmetro acima do valor máximo permitido (VMP) para consumo humano (Portaria MS 518/2004).

As principais restrições ao consumo das águas subterrâneas nos municípios em estudo são a presença de coliformes e as concentrações elevadas de fluoreto. O fluoreto tem sido relacionado à dissolução de fluorita presente nos calcários da Formação Lagoa do Jacaré, com ocorrência de concentrações elevadas em águas bicarbonatadas sódicas de pH levemente alcalino (Silva 2008 e Velásquez et al., 2007 e 2009). Os coliformes são indicadores de poluição orgânica. A alta permeabilidade vertical e a dinâmica do fluxo das águas no sistema aquífero cárstico-fissural o torna vulnerável a contaminação, especialmente nas zonas de absorção cárstica. Negligências na construção e manutenção dos poços, como ausência de laje de proteção sanitária e não vedação dos poços abandonados, e existência de fossas negras aumentam os riscos de contaminação desse sistema aquífero.

6 - CONCLUSÕES

Em Verdelândia, Jaíba e Varzelândia ocorrem os sistemas aquíferos cárstico-fissural e granular, onde se destaca para abastecimento dos poços tubulares o aquífero cárstico-fissural da Formação Lagoa do Jacaré e para abastecimento das cisternas os depósitos aluvionares. O sistema cárstico-fissural tem altas vazões em regiões mais carstificadas e deformadas, onde o calcário é aflorante, e baixas vazões a leste da área, onde aflora o aquitarde da Fm. Serra da Saudade. Apesar da complexidade do sistema cárstico, a direção geral da circulação das águas subterrâneas é NE e NW, sendo o rio Verde Grande o nível de base local. Os condutos, fendas e cavernas da Formação Lagoa do Jacaré apresentam como direção mais freqüente NS-N10W. A alta permeabilidade vertical e a dinâmica do fluxo subterrâneo torna esse aquífero vulnerável a contaminação, sendo importante a preservação das zonas de recarga, como a serra do Sabonetal em Varzelândia, as áreas de afloramento e as zonas de absorção cárstica. As águas subterrâneas são predominantemente bicarbonatadas cálcicas e bicarbonatadas-cloretadas cálcicas, o que reflete a composição dos solos e rochas dos aquíferos. O aumento das concentrações de cloreto e a alta condutividade elétrica na região leste da área parecem estar associados à presença do aquitarde da Fm. Serra da Saudade. O clima semi-árido também é responsável pela salinização das águas, com eventual aumento dos valores de sulfato, cloreto e sódio. Em alguns casos as águas subterrâneas oferecem riscos de salinidade, e mais raramente risco de sódio, para irrigação, e podem também apresentar restrições quanto a potabilidade, especialmente devido à contaminação por orgânicos e fluoreto.

7 – AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG/APQ02216-08), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e o Instituto de Geociências (IGC) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRASIL. 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. Portaria Nº 518, de 25 de março de 2004. **Diário Oficial da União**, 26 mar. 2004.
- CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. **Pesquisa e Avaliação dos Recursos Hídricos Subterrâneos em “Karst”, por meio de sensores remotos: relatório final**. Belo Horizonte, 1981. CETEC/PARS, Relatório Técnico. 2v (inclui mapas, inédito).
- CHIAVEGATTO, J. R. S.; Gomes, N. S.; Dardenne, M. A.; Delgado, C. E. R. Estratigrafia do Grupo Bambuí nas regiões do Norte de Minas Gerais: uma nova unidade estratigráfica em um contexto de inversão de bacia. In: SBG, SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 12, 2003, Ouro Preto. **Anais...** SBG, 2003. p. 24.
- CONAMA - Conselho Nacional do Meio-Ambiente. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Resolução Nº 357, de 17 de Março de 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>. Data do acesso: 31 de março de 2010.
- FREITAS A.M., Pereira C., Costa, D.A. **Geologia e Hidrogeologia de Jaíba, Verdelândia e Varzelândia, Norte de Minas Gerais**. 2008. 140p. Trabalho de conclusão de curso em geologia. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- IGLESIAS M. ; Uhlein A. 2008. Estratigrafia do Grupo Bambuí na serra do Jaíba, norte de Minas Gerais. *Geonomos*, 16(1):21-27.
- IGLESIAS M.; Uhlein A. 2009. Estratigrafia do Grupo Bambuí e coberturas fanerozóicas no vale do rio São Francisco, norte de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, 39(2): 256-266.
- LOGAN J. (ed.) Interpretações de análises químicas de água. Recife: U.S. Agency for International Development, 1965. 67p.
- MOURÃO M.A.A., Cruz W.B., Gonçalves R.L.F. Caracterização hidrogeológica da porção mineira da Bacia Hidrográfica do São Francisco. In: PINTO C.P.; Martins-Neto M.A. (eds.) *Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais*. Belo Horizonte: SBG-MG, 2001. p.327-350.
- SILVA A.B. **Análise morfoestrutural, hidrogeológica e hidroquímica no estudo do aquífero cárstico do Jaíba, norte de Minas Gerais**. 1984. 190p. Tese - Universidade de São Paulo. São Paulo, 1984.

- SILVA, A. B. da. **Água Subterrânea no Carste da Bacia do Rio Verde Grande, Norte de Minas Gerais**. Tese para provimento de professor titular. 1995. Belo Horizonte: UFMG.97 p.
- SILVA S.M. da. Hidroquímica das águas subterrâneas e anomalias de fluoreto em região do semi-árido mineiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, CABAS, 15, 2008, Natal. *Anais...Natal*, 2008, pg.209.
- US DEPT. OF AGRICULTURE. 1954. US Salinity Lab., Handbook 60. Citado em: Szikszay M. *Geoquímica das águas*. IGC-USP, Boletim Série Didática 5, São Paulo: 1993.166 p.
- VELÁSQUEZ L.N.M., Fantinel L.M., Fleming P.M., Minardi P.S.P., Rodrigues P.C.H., Nacif W.F.N., Viola Z.G.G., Silva, S.M., Soares L.C., Costa D.A., Pereira C., Freitas, A.M. 2009. **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**. Belo Horizonte: Fapemig (EDT 83032/06) 236p.
- VELÁSQUEZ L.N.M., Uhlein A., Fantinel L.M., Vargas A.M.D., Ferreira E.F., Castilho L.S. de, Aranha P.R.A. 2007. **Investigação hidrogeológica do flúor em aquíferos carbonáticos do Médio São Francisco, MG, e epidemiologia da fluorose dentária associada**. Relatório CNPq. 130 p.