



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Caracterização Hidrogeológica e Hidroquímica da Bacia do Rio Verde Grande
em Minas Gerais**

AUTOR Estefânia Fernandes dos Santos

ORIENTAÇÃO Dra. Leila Nunes Menegasse Velásquez

Nº1

BELO HORIZONTE

DATA 22/02/2013

Estefânia Fernandes dos Santos

Caracterização Hidrogeológica e Hidroquímica da Bacia do Rio Verde Grande em Minas Gerais

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia.

Área de concentração: Geologia Econômica e Aplicada

Orientadora: Prof^ª. Leila Nunes Menegasse Velásquez

Belo Horizonte

Departamento de Geologia da UFMG

2013

S237c Santos, Estefânia Fernandes dos.
2013 Caracterização hidrogeológica e hidroquímica da Bacia do Rio Verde Grande em Minas Gerais [manuscrito] / Estefânia Fernandes dos Santos. – 2013.
217 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientadora: Leila Nunes Menegasse Velásquez.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2013.
Área de concentração: Geologia Econômica e Aplicada.
Bibliografia: f.191-195.
Inclui anexos.

1. Hidrogeologia – Teses. 2. Química da água – Teses. 3. Verde Grande, Rio (MG) – Teses. I. Velásquez, Leila Nunes Menegasse. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 556.3 (815.1)

FOLHA APROVAÇÃO

*“...Eu adoro todas as coisas
E o meu coração é um albergue aberto toda a noite.
Tenho pela vida um interesse ávido
Que busca compreendê-la sentindo-a muito.
Amo tudo, animo tudo, empresto humanidade a tudo,
Aos homens e às pedras, às almas e às máquinas,
Para aumentar com isso a minha personalidade.”
Álvaro de Campos*

*Aos meus pais,
Que me ensinaram a questionar
Ser curiosa
E persistir.*

AGRADECIMENTOS

À Prof^a Dra. Leila Nunes Menegasse Velásquez por aceitar orientar e fazer parte desse projeto, e ter tido a disponibilidade e paciência durante todos os meses.

À Maricene Paixão, Coordenadora do Programa de Monitoramento de Aguas Subterrâneas do IGAM, pelo incentivo ao projeto de mestrado e apoio de todas as etapas de campo.

À Vanderene Nacif, Gerente do Programa de Monitoramento Águas de Minas, IGAM, que apoiou desde sempre o desenvolvimento do programa Aguas do Norte de Minas e seus estudos.

À CAPES, por proporcionar um período de bolsa durante o mestrado.

Ao IGAM, por patrocinar e permitir o convênio entre a Universidade Federal de Minas Gerais e projeto ao qual eu desenvolvi na pós-graduação.

Ao CETEC – MG, pela realização das análises químicas de águas subterrâneas.

Ao Geraldo João, Hidrometrista do IGAM, grande companheiro de coletas de água e de campo.

Ao grande amigo Dr. Sérgio Melo da Silva, pela grande companhia durante os campos, e pela ajuda com correção de textos, mapas e artigos.

À grande amiga Daysianne Lopes, pelas palavras de apoio e compreensão.

À Michele Alves, Estagiária do IGAM, pelo suporte e amizade.

À amiga Dora Atman Costa, pelo apoio e indicação ao IGAM.

Ao amigo Vladimir, pela ajuda nos gráficos de Stiff.

Às amigas Tatiana Gonçalves, Joana Magalhães, Mônica Mendes, Lilian Catone, Rodrigo Sérgio de Paula, Fabrício Caxito, e demais colegas de pós-graduação que fizeram parte dessa caminhada.

À CSN, por me permitir ausentar do serviço para realização de campos.

À Hidrovia, por me permitir tempo para termino dos estudos quando solicitado.

À minha família, pela estrutura estável e amável.

Aos amigos que fiz durante os 6.000km rodados nas cidades do Norte de Minas e ao seu povo humilde.

RESUMO

Os recursos hídricos subterrâneos da bacia do rio Verde Grande são de grande importância para subsistência e desenvolvimento da região, devido à intermitência das drenagens superficiais e em grande parte a má distribuição e intensidade das chuvas na bacia. A bacia apresenta como geologia predominante as rochas do Grupo Bambuí, na porção ocidental de sul a norte da bacia, com rochas metamórficas na porção oriental, composta por xistos e metadiamicritos do Grupo Macaúbas, quartzitos do Supergrupo Espinhaço e rochas granito-gnáissicas e metavulcanossedimentares de associações ígneas presentes nessa região. Definiram-se quatro domínios hidrogeológicos com base na geologia regional sendo eles: Domínio aquífero Cárstico, Fissurado-Cárstico, Fissurado e Granular. A análise hidroclimatológica da bacia pode definir dois grandes domínios climáticos, um sub-úmido que abrange o alto e médio Verde Grande, e um semiárido, que compreende o baixo curso até a divisa do estado. A precipitação média obtida para a bacia foi de 870,60 mm. A recarga na bacia apresentou valores de 1 a 24%. Os tipos hidroquímicos determinados através de métodos de classificação existente permitiram apresentar algumas considerações sobre os principais processos de mineralização e evolução química na bacia do rio Verde Grande. O Domínio cárstico, com dez amostras de água analisadas, apresenta fácies hidroquímica predominante bicarbonatada cálcica, dividindo-se em dois grupos pelo diagrama de Chadha: Grupo 1 são águas com menor mineralização; e as águas do Grupo 2 apresentam concentrações iônicas duas vezes maiores que do Grupo 1. Verificou-se que a maioria das amostras desse domínio apresentou troca de bases alcalinas. No Domínio fissurado-cárstico, foram analisadas dezenove amostras de águas subterrâneas, que foram subdivididas em dois grupos: Grupo 1 classificado como águas bicarbonatadas cálcicas-magnesianas e teores em cálcio elevado com sódio baixo, elevados teores em cloretos, e troca entre os íons alcalinos e íons alcalino-terrosos; e Grupo 2 com características de águas bicarbonatadas sódicas, teores em cálcio baixos e em sódio altos, com concentração média de fluoretos relativamente elevada. No Domínio fissurado, contando com quatro amostras, as águas tendem a apresentar teores elevados em alguns parâmetros, com progressivo aumento das concentrações de nitratos, sulfatos, potássio e magnésio, e apresentam troca de bases. O Domínio aquífero granular foi amostrado em quatro pontos e as águas apresentaram maior condutividade e dureza que os demais domínios, sendo classificado como águas cloretadas cálcica-magnesianas, sendo águas bem mineralizadas. As águas se mostraram contaminadas por coliformes totais em 90% e apresentaram algumas restrições as potabilidade, como teor em ferro alto, turbidez e dureza elevadas. Apresenta também média a alta restrição ao uso na irrigação, devido ao risco de salinização e adsorção de sódio pelas plantas.

Palavras-chaves: Domínios hidrogeológicos, Hidroquímica, Bacia do rio Verde Grande

ABSTRACT

Groundwater resources of the Verde Grande Basin are of great importance to subsistence and development in the region, due to intermittency of surface drainage and largely poor distribution and intensity of rainfall in the basin. The basin features as the predominant geology Bambuí Group rocks, in the western portion in south to north of the basin, metamorphic rocks in the eastern portion, comprising the metadiamicitites and schists of Macaúbas Group, quartzites of Espinhaço Supergroup, and granite-gneiss and metavolcanosedimentary rocks associated to igneous rocks present in this region. Four domains were defined based on hydrogeological regional geology: Domain Karstic aquifer, Karstic-fissured, Fissured and Granular. The hydroclimatologic analysis can define two major climatic areas, a sub-humid covering the upper and middle Verde Grande, and a semiarid zone, which comprises the lower course until the border state. The average precipitation for the basin obtained was 870,60 mm. The recharge basin values changed by 1-24%. The hydrochemical types determined by existing methods of classification allowed to present some considerations on the main mineralization processes and chemical evolution in the Rio Verde Grande. The Domain karst, with ten water samples analyzed, presents hydrochemical facies predominantly calcium bicarbonate, dividing into two groups by Chadha diagram: Group 1 waters with less mineralization, and the waters of the Group 2 feature ionic concentrations twice as high that in Group 1. It was found in most of the samples showed that domain exchange alkalis. In karst-fissured Domain, nineteen samples were analyzed, which were subdivided into two groups: Group 1 waters classified as calcic-magnesium bicarbonate and calcium levels high with low sodium, high levels of chlorides and exchange between alkali ions and alkaline earth ions and Group 2 with characteristics of water with sodium bicarbonate, low calcium levels and high sodium levels, with a mean concentration of fluoride relatively high. In Fissured domain provided with four samples, water tend to have high levels in some parameters, with progressively increasing concentrations of nitrates, sulfates, potassium and magnesium, and exhibit exchanging bases. The Domain granular aquifer was sampled at four points and the waters had higher conductivity and hardness than other areas, classified as chlorinated calcium-magnesium waters, and well mineralized waters. The waters proved contaminated by coliforms in 90% and showed some restrictions the drinkability, as high iron content, high hardness and turbidity. It also feature medium to high restriction on use for irrigation because of the risk of salinization and adsorption of sodium by plants.

Key-words: Hydrogeologic domains, Hydrochemistry, Verde Grande basin

JUSTIFICATIVA

Este trabalho resultou de convênio entre o Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais e o Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM no âmbito do Projeto: *Instrumentação e Operação do Sistema de Monitoramento de Águas Superficiais e Subterrâneas na Bacia do Alto São Francisco, dentro da Meta II: Modernização do Programa e Monitoramento das Águas Subterrâneas das Sub-Bacias dos Rios Verde Grande, Riachão e Jequitaí*, desenvolvido pelo IGAM (Instituto Mineiro de Gestão das Águas) e CODEVASF (Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e Parnaíba). Foi realizado um convênio de cooperação técnica entre o IGAM e a UFMG, através da prof. Dr^a Leila Nunes Menegasse Velásquez, para que o apoio a esse trabalho pudesse ser garantido e oficializado.

No citado convênio o presente estudo abrangeu a bacia do rio Verde Grande, para o qual foram fornecidos todos os dados de monitoramento do nível d'água subterrâneo e hidroquímico aqui analisados no contexto geológico e hidrogeológico da bacia de modo a atingir os objetivos delineados.

É importante destacar que a autora participou ativamente das campanhas de monitoramento hidroquímico, como a seleção dos poços tubulares e coletas de água.

A relevância do tema é justificada pelo papel desempenhado pelos aquíferos da Bacia do São Francisco no âmbito do semiárido mineiro, destacando sua importância para o consumo humano e agrícola da região.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. Objetivos..... | 2 |
| 2. ASPECTOS GERAIS | 3 |
| 2.1. Localização da área de estudo | 3 |
| 2.2. Aspectos físicos..... | 5 |
| 2.2.1. Hidrografia..... | 5 |
| 2.2.2. Geomorfologia | 8 |
| 2.2.3. Uso do solo | 10 |
| 2.3. Caracterização socioeconômica | 12 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 14 |
| 3.1. Estimativas de recarga aquífera | 14 |
| 3.2. Constituintes das águas subterrâneas - abordagem conceitual | 16 |
| 3.3. Processos químicos que ocorrem nas águas nos aquíferos | 20 |
| 3.4. Evolução da composição química dentro do mesmo aquífero | 21 |
| 3.5. Estudos realizados na bacia | 25 |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS..... | 30 |
| 4.1. Caracterização Hidroclimatológica..... | 31 |
| 4.2. Caracterização Hidrogeológica..... | 36 |
| 4.2.1. Potencialidades dos aquíferos | 36 |
| 4.2.1.1. Potenciometria..... | 37 |
| 4.2.1.2. Avaliação da Recarga | 38 |
| 4.3. Caracterização Hidroquímica | 41 |
| 5. GEOLOGIA REGIONAL | 52 |
| 6. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA..... | 65 |
| 6.1. Domínios Hidrogeológicos..... | 65 |
| 6.2. Modelo Hidrogeológico para a bacia do rio Verde Grande | 77 |

| | |
|--|------------|
| 7. RESULTADOS..... | 79 |
| 7.1. CARACTERIZAÇÃO HIDROCLIMATOLÓGICA..... | 79 |
| 7.1.1. Clima..... | 81 |
| 7.1.2. Pluviometria..... | 82 |
| 7.1.3. Fluviometria..... | 86 |
| 7.1.4. Balanço Hídrico Climatológico..... | 89 |
| 7.1.5. Índice de Aridez e Domínio Climático | 92 |
| 7.2. Potenciometria | 95 |
| 7.3. Potencialidades dos aquíferos | 99 |
| 7.3.1. Valores médios dos Parâmetros Hidrodinâmicas por Domínio climático..... | 99 |
| 7.3.2. Valores médios dos Parâmetros Hidrodinâmicas por Domínio hidrogeológico | 100 |
| 7.4. Cálculo do escoamento de base..... | 110 |
| 7.5. Estimativa da recarga na bacia | 114 |
| 7.5.1. Método do cálculo de recarga pelo Balanço Hídrico | 114 |
| 7.5.2. Método de Recessão de Hidrogramas (Método de Maillet)..... | 116 |
| 7.5.3. Método de Meyboom..... | 119 |
| 7.6. CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA..... | 122 |
| 8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 168 |
| 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 174 |
| 10. ANEXOS | 179 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|--------------|---|----|
| FIGURA 2.1: | MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO RIO VERDE GRANDE E MUNICÍPIOS. | 4 |
| FIGURA 2.2: | REDE HIDROGRÁFICA DA BACIA DO RIO VERDE GRANDE. | 7 |
| FIGURA 2.3: | MAPA HIPSOMÉTRICO DA BACIA DO RIO VERDE GRANDE. | 9 |
| FIGURA 2.4: | MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA BACIA DO RIO VERDE GRANDE. (A3) | 11 |
| FIGURA 4.1: | DETERMINAÇÃO DO ESCOAMENTO DE BASE PELO PROGRAMA BASEFLOW. O FILTRO SEPARA O ESCOAMENTO SUPERFICIAL DA DESCARGA SUBTERRÂNEA. | 36 |
| FIGURA 4.2: | EXEMPLO DE HIDROGRAMA SEMILOG | 40 |
| FIGURA 4.3: | SONDA MULTIPARAMÉTRICA UTILIZADA. | 42 |
| FIGURA 4.4: | DIAGRAMA DE CHADHA (1999). | 49 |
| FIGURA 5.1: | MAPA ESQUEMÁTICO DAS PRINCIPAIS FEIÇÕES ESTRUTURAIS DO EMBASAMENTO DA BACIA SF, COM INDICAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO RIO VERDE GRANDE. | 53 |
| FIGURA 5.2: | MAPA GEOLÓGICO DA BACIA DO RIO VERDE GRANDE, MG – (A3) | 56 |
| FIGURA 6.1: | MAPA DOS DOMÍNIOS HIDROGEOLÓGICOS DA BACIA DO RIO VERDE GRANDE. | 67 |
| FIGURA 7.1: | LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES CLIMATOLÓGICAS E METEOROLÓGICAS, PLUVIOMÉTRICAS E FLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS NESSE ESTUDO. | 80 |
| FIGURA 7.2: | TEMPERATURA MÉDIA MENSAL EM CADA ESTAÇÃO CLIMATOLÓGICA | 82 |
| FIGURA 7.3: | EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL MÉDIA MENSAL EM CADA ESTAÇÃO CLIMATOLÓGICA. | 82 |
| FIGURA 7.4: | ÁREAS DE ISOIETAS DE PRECIPITAÇÃO PARA A BACIA DO RIO VERDE GRANDE. | 85 |
| FIGURA 7.5: | HIDROGRAMA DA ESTAÇÃO PONTE DE RODAGEM, INÍCIO EM MAIO/1969. | 87 |
| FIGURA 7.6: | HIDROGRAMA DA ESTAÇÃO COLÔNIA DO JAÍBA, INÍCIO EM SETEMBRO/1962. | 87 |
| FIGURA 7.7: | HIDROGRAMA DA ESTAÇÃO BOCA DA CAATINGA, INÍCIO EM MAIO/1969. | 87 |
| FIGURA 7.8: | HIDROGRAMA DA ESTAÇÃO JANAÚBA, INÍCIO EM MAIO/1969. | 88 |
| FIGURA 7.9: | VALORES ANUAIS DO BALANÇO HÍDRICO PARA CADA ESTAÇÃO CLIMATOLÓGICA. | 91 |
| FIGURA 7.10: | MAPA DA BACIA DO RIO VERDE GRANDE COM AS ZONAS DE ARIDEZ CALCULADAS E O LIMITE DOS DOIS DOMÍNIOS CLIMÁTICOS. | 94 |
| FIGURA 7.11: | LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE COTAS DE NÍVEL D'ÁGUA DA BACIA DO RIO VERDE GRANDE. .. | 96 |
| FIGURA 7.12: | MAPA POTENCIOMÉTRICO REGIONAL COM ISOLINHAS DE 50 M. | 98 |

| | | |
|--------------|--|-----|
| FIGURA 7.13: | VALORES MÉDIOS DOS PARÂMETROS HIDRÁULICOS POR DOMÍNIO HIDROGEOLÓGICO | 102 |
| FIGURA 7.14: | GRÁFICO BOX-PLOT PARA CAPACIDADE ESPECÍFICA DOS POÇOS EM CADA DOMÍNIO CLIMÁTICO | 103 |
| FIGURA 7.15: | GRÁFICO BOX-PLOT PARA TRANSMISIVIDADE DOS POÇOS EM CADA DOMÍNIO CLIMÁTICO..... | 103 |
| FIGURA 7.16: | GRÁFICO BOX-PLOT PARA VAZÃO DE ESTABILIZAÇÃO DOS POÇOS EM CADA DOMÍNIO CLIMÁTICO | 104 |
| FIGURA 7.17: | RELAÇÃO DA VAZÃO COM OS NÍVEIS HIDRÁULICOS (NE E ND) PARA DOMÍNIO CÁRSTICO. | 105 |
| FIGURA 7.18: | RELAÇÃO DA VAZÃO COM OS NÍVEIS HIDRÁULICOS (NE E ND) PARA DOMÍNIO FISSURADO-CÁRSTICO. | 107 |
| FIGURA 7.19: | RELAÇÃO DA VAZÃO COM OS NÍVEIS HIDRÁULICOS (NE E ND) PARA DOMÍNIO FISSURADO..... | 108 |
| FIGURA 7.20: | RELAÇÃO DA VAZÃO COM OS NÍVEIS HIDRÁULICOS (NE E ND) PARA DOMÍNIO GRANULAR..... | 109 |
| FIGURA 7.21: | MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS E SUAS BACIAS DE CONTRIBUIÇÃO.. | 111 |
| FIGURA 7.22: | GRÁFICO SEMILOG PARA A ESTAÇÃO PONTE DE RODAGEM, EM MONTES CLAROS. DATA DE AQUISIÇÃO: MAIO DE 1969 A DEZEMBRO DE 1975. | 116 |
| FIGURA 7.23: | GRÁFICO SEMILOG PARA A ESTAÇÃO JANAÚBA. DATA DE AQUISIÇÃO: MAIO DE 1969 A DEZEMBRO DE 1975 | 116 |
| FIGURA 7.24: | GRÁFICO SEMILOG PARA A ESTAÇÃO COLÔNIA DO JAÍNA, EM JAÍBA. DATA DE AQUISIÇÃO: JANEIRO DE 1969 A DEZEMBRO DE 1975 | 117 |
| FIGURA 7.25: | GRÁFICO SEMILOG PARA A ESTAÇÃO BOCA DA CAATINGA, EM MATIAS CARDOSO. DATA DE AQUISIÇÃO: MAIO DE 1969 A DEZEMBRO DE 1975 | 117 |
| FIGURA 7.26: | LOCALIZAÇÃO DOS POÇOS TUBULARES COLETADOS DURANTE O ESTUDO..... | 124 |
| FIGURA 7.27: | MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS POÇOS POR DOMÍNIOS HIDROGEOLÓGICOS E CLIMÁTICOS..... | 128 |
| FIGURA 7.28: | DIAGRAMA BOX-PLOT PARA OS ÍONS MAIORES DE 19 AMOSTRAS SOB INFLUÊNCIA DO CLIMA SEMIÁRIDO | 131 |
| FIGURA 7.29: | DIAGRAMA BOX-PLOT PARA OS ÍONS MAIORES DE 18 AMOSTRAS SOB INFLUÊNCIA DO CLIMA SUB-ÚMIDO. | 131 |
| FIGURA 7.30: | DIAGRAMAS DE STIFF PARA A BACIA. | 133 |
| FIGURA 7.31: | DIAGRAMA DE PIPER PARA 10 AMOSTRAS | 135 |
| FIGURA 7.32: | DIAGRAMA DE SCHOELLER PARA 10 AMOSTRAS..... | 135 |
| FIGURA 7.33: | DIAGRAMA ADAPTADO DE CHADHA (1999) E A SEPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DO DOMÍNIO AQUÍFERO CÁRSTICO EM GRUPOS COM CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS SEMELHANTES..... | 137 |
| FIGURA 7.34: | DIAGRAMA DE PIPER PARA 19 AMOSTRAS | 141 |

| | | |
|--------------|---|-----|
| FIGURA 7.35: | DIAGRAMA DE SCHOELLER PARA 19 AMOSTRAS..... | 141 |
| FIGURA 7.36: | DIAGRAMA ADAPTADO DE CHADHA (1999) E A SEPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DO DOMÍNIO AQUÍFERO FISSURADO-CÁRSTICO EM GRUPO COM CARACTERÍSTICA QUÍMICA SEMELHANTE..... | 142 |
| FIGURA 7.37: | DIAGRAMAS DE PIPER PARA 4 AMOSTRAS | 147 |
| FIGURA 7.38: | DIAGRAMAS DE SCHOELLER PARA 4 AMOSTRAS | 147 |
| FIGURA 7.39: | DIAGRAMA ADAPTADO DE CHADHA (1999) E A SEPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DO DOMÍNIO AQUÍFERO FISSURADO EM GRUPO COM CARACTERÍSTICA QUÍMICA SEMELHANTE. | 148 |
| FIGURA 7.40: | DIAGRAMAS DE PIPER PARA 4 AMOSTRAS | 151 |
| FIGURA 7.41: | DIAGRAMAS DE SCHOELLER PARA 4 AMOSTRAS | 152 |
| FIGURA 7.42: | DIAGRAMA ADAPTADO DE CHADHA (1999) E A SEPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DO DOMÍNIO AQUÍFERO GRANULAR EM GRUPO COM CARACTERÍSTICA QUÍMICA SEMELHANTE. | 152 |
| FIGURA 7.43: | DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS CONCENTRAÇÕES DOS ÍONS MAIORES NA BACIA DO RIO VERDE GRANDE. | 158 |
| FIGURA 7.44: | DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS CONCENTRAÇÕES DOS ÍONS MAIORES NA BACIA DO RIO VERDE GRANDE. | 159 |
| FIGURA 7.45: | DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS NA BACIA DO RIO VERDE GRANDE. | 160 |
| FIGURA 7.46: | DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS RELAÇÕES IÔNICAS RMG/RCA E RNA/RCA NA BACIA DO RIO VERDE GRANDE. | 162 |
| FIGURA 7.47: | DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS RELAÇÕES IÔNICAS RCL/RHCO3 E RSO4/RCL NA BACIA DO RIO VERDE GRANDE. | 163 |
| FIGURA 7.48: | GRÁFICO DE SAR PARA 37 AMOSTRAS COM DIFERENCIAÇÃO POR DOMÍNIO CLIMÁTICO..... | 167 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|--------------|---|-----|
| TABELA 4.1: | MÉTODOS DE ENSAIO, REFERÊNCIA E LIMITE DE DETECÇÃO..... | 43 |
| TABELA 4.2: | PRINCIPAIS RAZÕES IÔNICAS E SEUS SIGNIFICADOS..... | 48 |
| TABELA 6.1: | DOMÍNIOS HIDROGEOLÓGICOS DA BACIA DO RIO VERDE GRANDE..... | 66 |
| TABELA 7.1: | ESTAÇÕES CLIMATOLÓGICAS NA BACIA DO RIO VERDE GRANDE..... | 81 |
| TABELA 7.2: | VARIÁVEIS CLIMÁTICAS NA BACIA DO RIO VERDE GRANDE..... | 81 |
| TABELA 7.3: | ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS DENTRO E PRÓXIMAS A BACIA DO RIO VERDE GRANDE..... | 83 |
| TABELA 7.4: | ÁREAS CALCULADAS PELO MÉTODO DE ISOIETAS..... | 84 |
| TABELA 7.5: | CÁLCULO DA PRECIPITAÇÃO MÉDIA NA BACIA PELO MÉTODO DAS ISOIETAS..... | 84 |
| TABELA 7.6: | ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS..... | 86 |
| TABELA 7.7: | RESULTADOS DO BALANÇO HÍDRICO SEQUENCIAL DECENDIAL..... | 89 |
| TABELA 7.8: | CLASSES DE CLIMA DE ACORDO COM O ÍNDICE DE ARIDEZ, POR PENMAN (1953, <i>IN</i> CONAMA, 1997)..... | 92 |
| TABELA 7.9: | ÍNDICE DE ARIDEZ PARA A BACIA DO RIO VERDE GRANDE..... | 92 |
| TABELA 7.10: | VALORES HIDROCLIMÁTICOS MÉDIOS ANUAIS PARA OS DOMÍNIOS DEFINIDOS..... | 93 |
| TABELA 7.11: | ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS DOS POÇOS SELECIONADOS..... | 99 |
| TABELA 7.12: | ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS DOS POÇOS NO DOMÍNIO SEMIÁRIDO..... | 100 |
| TABELA 7.13: | ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS DOS POÇOS NO DOMÍNIO SUB-ÚMIDO..... | 100 |
| TABELA 7.14: | ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS DOS POÇOS POR DOMÍNIO AQUÍFERO NA BACIA DO RIO VERDE GRANDE..... | 101 |
| TABELA 7.15: | VALORES MÉDIOS DE CAPACIDADE ESPECÍFICA E TRANSMISSIVIDADE PARA OS DOMÍNIOS COMBINADOS..... | 109 |
| TABELA 7.16: | DADOS DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS PARA CÁLCULO DO ESCOAMENTO SUBTERRÂNEO..... | 110 |
| TABELA 7.17: | RESULTADOS DE ESCOAMENTO BASE PARA CADA ESTAÇÃO (CALCULADOS PELO BASEFLOW)... 112 | |
| TABELA 7.18: | VAZÕES DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL E SUBTERRÂNEO PARA CADA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA..... | 113 |
| TABELA 7.19: | VAZÕES ESPECÍFICAS SUPERFICIAIS DA SÉRIE HISTÓRICA UTILIZADA..... | 114 |
| TABELA 7.20: | VALORES MÉDIOS ANUAIS DOS PARÂMETROS DO BALANÇO HÍDRICO..... | 115 |

| | | |
|----------------------------|---|-----|
| TABELA 7.21: | VALORES OBTIDOS PARA A ESTAÇÃO PONTE DE RODAGEM, EM MONTES CLAROS. | 117 |
| TABELA 7.22: | VALORES OBTIDOS PARA A ESTAÇÃO DE JANAÚBA. | 118 |
| TABELA 7.23: | VALORES OBTIDOS PARA A ESTAÇÃO COLÔNIA DA JAÍBA, EM JAÍBA. | 118 |
| TABELA 7.24: | VALORES OBTIDOS PARA A ESTAÇÃO BOCA DA CAATINGA, EM MATIAS CARDOSO. | 118 |
| TABELA 7.25: | RESULTADOS DA RECARGA REFERENTE A CADA ÁREA DRENADA DA BACIA. | 119 |
| TABELA 7.26: | ESTIMATIVA DE RECARGA DA BACIA PELO MÉTODO DE MEYBOOM. | 120 |
| TABELA 7.27: | ESTIMATIVAS DE RECARGA PARA A BACIA DO RIO VERDE GRANDE. | 121 |
| TABELA 7.28: | POÇOS TUBULARES AMOSTRADOS NA BACIA DO RIO VERDE GRANDE. | 123 |
| TABELA 7.29: | CÁLCULOS PARA VALIDAÇÃO DAS ANÁLISES QUÍMICAS. | 125 |
| TABELA 7.30: | BALANÇO IÔNICO CORRIGIDO (EM MEQ/L)..... | 126 |
| TABELA 7.31: AMOSTRAS. | ESTATÍSTICA DAS CONCENTRAÇÕES (MG/L) DE CÁTIONS E ÂNIONS PRINCIPAIS PARA AS 37 | 129 |
| TABELA 7.32: | ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS PARA AS 37 AMOSTRAS. | 130 |
| TABELA 7.33: CÁRSTICO. | DADOS DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS PARA OS GRUPOS DO DOMÍNIO AQUÍFERO | 138 |
| TABELA 7.34: | ÍNDICES HIDROGEOQUÍMICOS PARA O DOMÍNIO CÁRSTICO (SOB DOMÍNIO SUB-ÚMIDO)..... | 139 |
| TABELA 7.35: CÁRSTICO. | DADOS DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS PARA O DOMÍNIO AQUÍFERO FISSURADO- | 144 |
| TABELA 7.36: | ÍNDICES HIDROGEOQUÍMICOS PARA O DOMÍNIO FISSURADO-CÁRSTICO. | 145 |
| TABELA 7.37: FISSURADO. | DADOS DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS PARA OS GRUPOS DO DOMÍNIO AQUÍFERO | 150 |
| TABELA 7.38: | ÍNDICES HIDROGEOQUÍMICOS PARA O DOMÍNIO FISSURADO. | 149 |
| TABELA 7.39: GRANULAR | DADOS DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS PARA OS GRUPOS DO DOMÍNIO AQUÍFERO | 154 |
| TABELA 7.40: | ÍNDICES HIDROGEOQUÍMICOS PARA O DOMÍNIO GRANULAR. | 155 |
| TABELA 7.41: GRANDE | POTABILIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS POR DOMÍNIO AQUÍFERO NA BACIA DO RIO VERDE | 165 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

ANA – Agência Nacional de Águas

CETEC - Centro tecnológico de Minas Gerais

CODEVASF - Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba

COPASA – Companhia de Saneamento de Minas Gerais

DNOCS - Departamento Nacional de Obras Contra a Seca

DNOS - Departamento Nacional de Obras e Saneamento

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ICMS – Imposto Sobre Circulação de Mercadorias

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

MIR - Ministério de Irrigação e Reforma Agrária

PRONI - Programa Nacional de Irrigação

SRTM - *Shuttle Radar topography Mission*

SUDENE - Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste

UNESCO - *United Nation Educational, Scientific and Cultural Organization*

USSL - *United State Salinity Laboratory*

UTM - Universal Transversa de Mercator

1. INTRODUÇÃO

Esse estudo foi desenvolvido na área da sub-bacia do rio Verde Grande, afluente da margem direita do rio São Francisco, com superfície aproximada de 27.000 km² no estado de Minas Gerais. Insere-se na sua maior parte, em uma zona rebaixada denominada de “Depressão Sanfranciscana”, com altitudes médias entre 500 e 600 metros.

Nessa sub-bacia, de acordo com ANA (2002), ocorrem importantes mananciais de água subterrânea que vêm sendo intensivamente utilizados para abastecimento público, irrigação e consumo animal. Nos últimos anos, tem-se verificado um aumento substancial do número de perfurações de poços de grande vazão para utilização agrícola. Em algumas áreas, já se registram conflitos de uso e superexploração, com interferências entre poços e rebaixamentos acentuados dos níveis de água. Segundo ANA (2009), os primeiros registros de conflito entre usuários de água na região surgiram em fins de 1988, e a partir da crescente demanda e, conseqüentemente, redução da disponibilidade hídrica, criou um quadro de dificuldades de compatibilização dos vários usos.

Tal quadro evidencia a demanda por estudos qualitativos e quantitativos dos recursos hídricos da bacia do rio Verde Grande, indispensável para o planejamento dos diferentes tipos de usos da água. A caracterização química das águas e sua correlação com os diferentes tipos de ambientes geológicos, o cruzamento de informações hidroclimatológicas, bem como a caracterização hidrogeológica, fornecem a base para identificação e zoneamento dos diferentes tipos hidroquímicos presentes nessa bacia.

As águas subterrâneas correspondem a aproximadamente 97% da água doce disponível no planeta e ao longo dos anos têm ganhado projeção como alternativa atraente de abastecimento para empreendimentos públicos e privados, pois apresentam baixo custo de tratamento e distribuição sendo naturalmente protegidas de variações sazonais bruscas. Essas águas vêm sendo utilizadas para abastecimento de mais de 50% da população do planeta e irrigação de aproximadamente 90 milhões de hectares (UNESCO 1992; *in* RAMOS & PAIXÃO, 2009).

À medida que cresce a utilização desse recurso, cresce também a preocupação com a necessidade de conservação da sua disponibilidade tanto em quantidade como em qualidade. As expansões dos centros urbanos, o desenvolvimento dos setores agrícolas, industrial e mineral, contribuem para a deterioração das águas subterrâneas através do aumento de fontes potencialmente poluidoras e conseqüentemente do risco de contaminação, bem como

a implantação de obras de captação sem a observação de critérios técnicos pode comprometer o uso sustentável desse recurso.

Neste contexto, os gestores de recursos hídricos têm um desafio institucional e legal a vencer para implantação de políticas públicas que garantam água em quantidade e qualidade para os usos múltiplos preconizados na legislação.

A água subterrânea é a componente do ciclo hidrológico que infiltra nos solos através do excesso de precipitação pluviométrica, formando os aquíferos. Os aquíferos são formações geológicas com capacidade de acumular e transmitir água através de seus poros, fissuras ou espaços resultantes da dissolução e carreamento de materiais rochosos.

As reservas reguladoras ou renováveis são aquelas relacionadas à precipitação anual ou taxas de recarga anuais. Estas reservas definem os recursos exploráveis dos aquíferos, consideradas como a quantidade máxima de água que pode ser utilizada através de poços, sem comprometer as chamadas reservas permanentes ou acumuladas e a alimentação dos cursos d'água.

Em termos médios de longo período e em condições não influenciadas por fatores externos, admite-se que as entradas de água nos sistemas igualam às descargas ou saídas. Teoricamente, uma exploração cujo volume se iguala à recarga total do sistema acabaria por comprometer o regime de vazões mínimas do escoamento superficial. Por este motivo, admite-se que os recursos exploráveis devem representar apenas uma parcela das reservas reguladoras, a fim de garantir a manutenção de uma vazão mínima dos cursos d'água (MOURÃO *et al.*, 2001).

1.1. Objetivos

O objetivo geral do presente estudo é a caracterização hidrogeológica e hidroquímica na Bacia do Rio Verde Grande em Minas Gerais.

Os objetivos específicos foram os seguintes:

- Determinar os domínios hidrogeológicos existentes na bacia;
- Definir os principais domínios climáticos influentes;
- Estimar a recarga aquífera na bacia;
- Correlacionar as potencialidades e recargas dos aquíferos com o clima;

- Identificar os padrões de distribuição dos tipos químicos de águas e suas relações espaciais com os domínios hidrogeológicos e climáticos.

2. ASPECTOS GERAIS

2.1. Localização da área de estudo

A área de estudo compreende a bacia hidrográfica do rio Verde Grande, afluente da margem direita do rio São Francisco, no Norte de Minas Gerais (Figura 2.1), entre os paralelos 14°20' e 17°14' de latitude Sul e meridianos 42°30' e 44°15' de longitude Oeste. A bacia drena uma área aproximada de 30.000 km², sendo que desse total 88% pertencem ao Estado de Minas Gerais, equivalente a 27.004 km², e o restante, 12%, ao Estado da Bahia.

Estão inseridos nessa região 31 municípios, sendo 27 municípios mineiros e 4 baianos. A parte mineira da bacia estudada é composta pelos municípios apresentados na Figura 2.1.

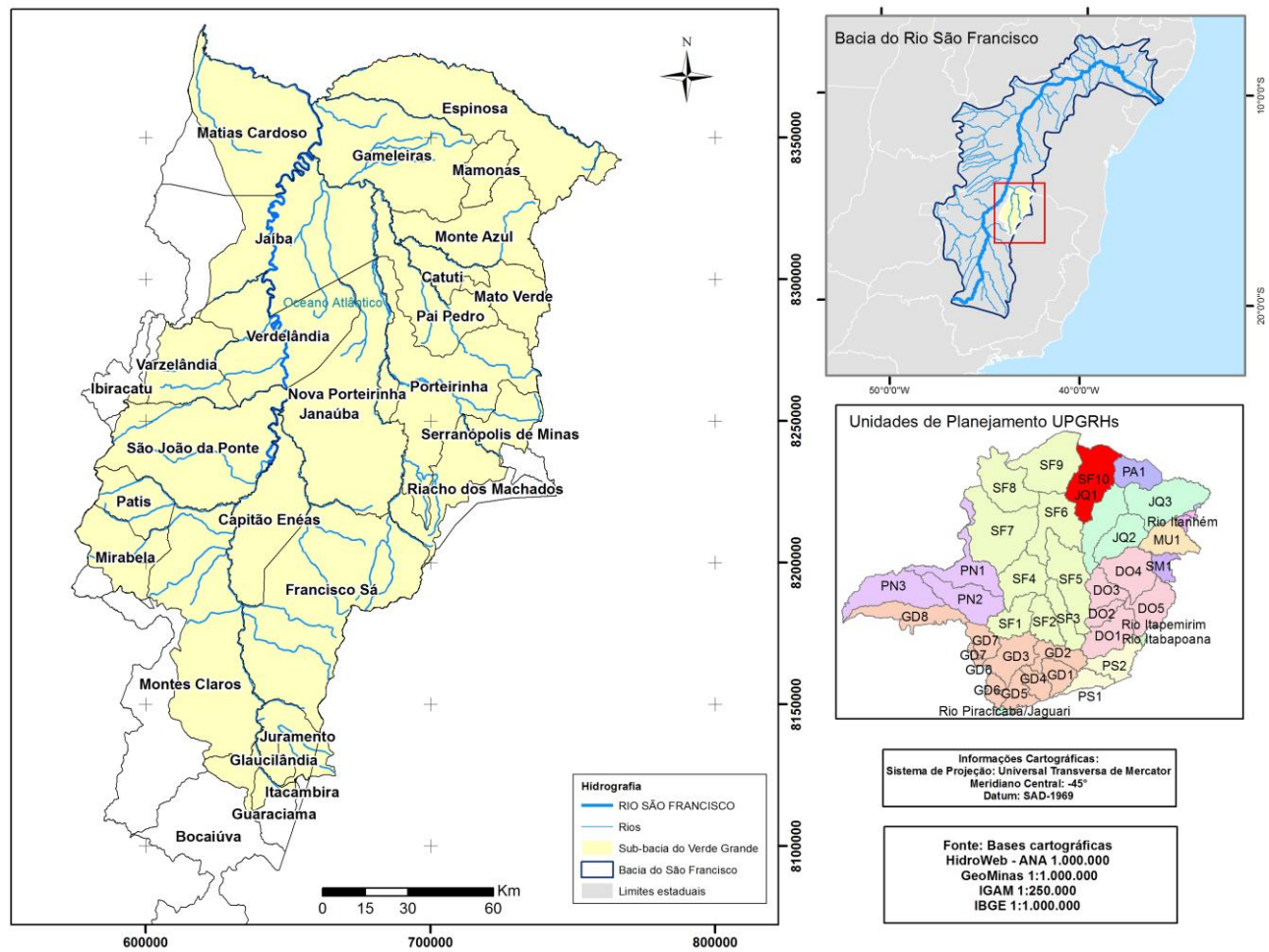


Figura 2.1: Mapa de localização da bacia do Rio Verde Grande e municípios.

Fonte: Base HydroWeb – ANA 1:1.000.000, IGAM / 2002 - Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos do Estado de Minas Gerais, Escala Original: 1:100.000 e 1:50.000; GeoMinas, Escala Original: 1:1.000.000.

2.2. Aspectos físicos

2.2.1. Hidrografia

A bacia do rio Verde Grande é drenada pelo rio homônimo no sentido Sul-Norte. Seu principal tributário dentro da bacia é o rio Gorutuba, que deságua na margem direita do rio Verde Grande, no município de Matias Cardoso (Figura 2.2). A bacia pode ser subdividida em 8 sub-bacias hidrográficas de acordo com ANA (2009), descritas a seguir :

- Alto Verde Grande (AVG) - Consiste na sub-bacia hidrográfica formada pelo trecho superior do rio Verde Grande, com seus principais afluentes, nesta área: rio do Juramento, rio Saracura, rio da Prata e ribeirão da Boa Vista pela margem direita e o rio do Vieira pela margem esquerda. A área desta sub-bacia é de 3.098 km². As sedes municipais encontradas nesta sub-bacia são: Montes Claros, Glaucilândia, Guaraciama e Juramento.
- Médio Verde Grande – Trecho Alto (MVG-TA) - Apresenta área de drenagem de 7.102 km², contando com as seguintes sedes municipais: Capitão Enéas, Francisco Sá, Mirabela, Patis e São João da Ponte. Os principais afluentes do rio Verde Grande, neste trecho, são: rio São Domingos e rio Quem-Quem, ambos pela margem direita, e rio Barreiras, rio Jacuí, ribeirão do Ouro, riacho Salobro, e rio Arapaim pela margem esquerda.
- Alto Gorutuba (AG) - Consiste na sub-bacia hidrográfica formada pelo trecho superior do rio Gorutuba e possui uma área de 2.133 km², contando com as seguintes sedes municipais: Janaúba, Nova Porteirinha e Riacho dos Machados. Alguns afluentes do rio Gorutuba nesta sub-bacia são: ribeirão Confisco, córrego Piranga e rio da Água Quente pela margem direita, rio Baixa Cedro e os córregos Mato Dentro, Baixa Grande e Baixa da Serra, pela margem esquerda.
- Médio e Baixo Gorutuba (MBG) - Com área de 7.715 km², situa-se a jusante da sub-bacia AG e é conformada pela área de drenagem do rio Gorutuba e seus afluentes até sua confluência (exclusive) com o rio Verde Grande. As sedes municipais total ou parcialmente inseridas na sub-bacia são: Catuti, Gameleiras, Mato Verde, Monte Azul, Pai Pedro, Porteirinha e Serranópolis de Minas.
- Médio Verde Grande – Trecho Baixo (MVG-TB) - Limita-se a jusante pela confluência (exclusive) do rio Verde Grande com o rio Verde Pequeno. As sedes

municipais inseridas na sub-bacia são: Jaíba, Varzelândia e Verdelândia. Os principais afluentes do rio Verde Grande nesta sub-bacia são: rio Gorutuba pela margem direita, e córrego São Vicente, córrego Macaúbas e córrego Escuro pela margem esquerda.

- Alto Verde Pequeno (AVP) - Consiste na sub-bacia hidrográfica formada pelo trecho superior do rio Verde Pequeno, desde as suas nascentes até a confluência com o rio Verde Grande. O afluente do rio Verde Pequeno, na porção mineira, é o rio Cova da Mandioca, pela margem direita. A área desta sub-bacia é de 2.899 km², abrangendo parte dos Estados de Minas Gerais (47%) e Bahia (53%), e os municípios Mamonas, Espinosa e Urandi.
- Baixo Verde Pequeno (BVP) - Essa sub-bacia compreende a área de drenagem do rio Verde Pequeno segundo os limites: a montante o término da sub-bacia AVP, e a jusante a confluência (inclusive) do rio Verde Pequeno com o rio Verde Grande. Possui área de drenagem com 3.368 km² entre os Estados de Minas Gerais (40%, nos municípios de Espinosa e Gameleiras) e Bahia (60%, município de Sebastião Laranjeiras).
- Baixo Verde Grande (BVG) - Essa sub-bacia é a menor da divisão hidrográfica adotada, com área de 1.934,11 km² distribuída entre os Estados de Minas Gerais (67%, município de Matias Cardoso) e Bahia (33%, municípios de Malhada e Iuiú). Consiste na área de drenagem deste ponto do rio Verde Grande até sua foz no rio São Francisco. Os principais afluentes são: o rio Verde Pequeno pela margem direita, e o ribeirão Baixa da Mula pela margem esquerda.

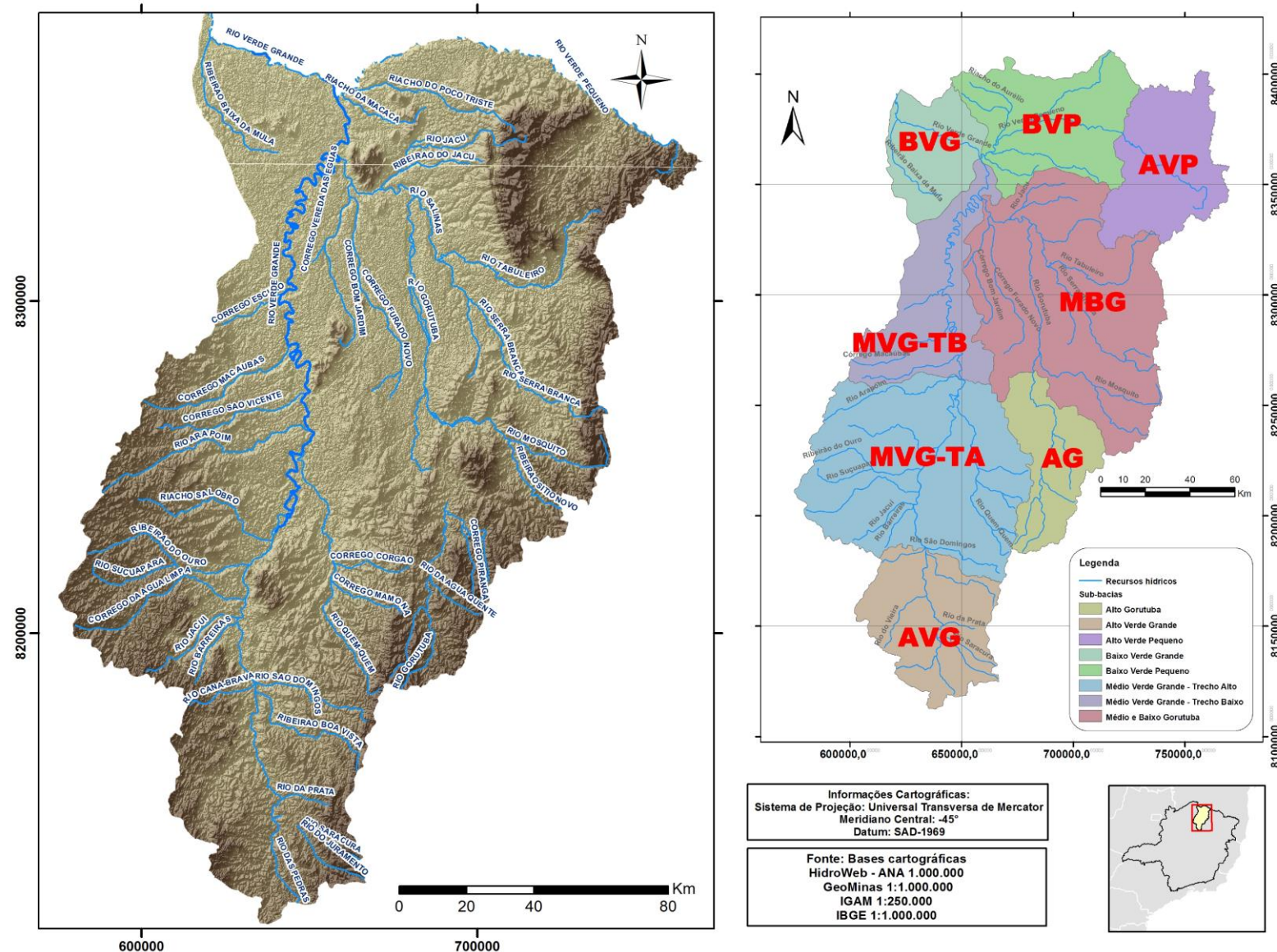


Figura 2.2: Rede hidrográfica da Bacia do rio Verde Grande.

Fonte: Bases cartográficas HidroWeb, ANA, GeoMinas, IGAM e IBGE.

2.2.2. Geomorfologia

A bacia do rio Verde Grande, de acordo com ANA (2011), está situada sobre três unidades geomorfológicas que guardam estreita relação com a geologia e hipsometria. A Depressão Sanfranciscana, unidade de maior extensão na bacia, está delimitada a oeste pelos rebordos do Planalto São Francisco e a leste pelo Planalto das Bordas do Espinhaço.

A Depressão Sanfranciscana estende-se pelas porções centro, sul e norte (cerca de dois terços da área) da bacia, geologicamente correspondendo essencialmente à região de ocorrências das rochas do Supergrupo São Francisco. A unidade apresenta principalmente extensas áreas aplainadas e dissecadas, superfícies onduladas, colinas e áreas de relevo cárstico, como dolinas e uvalas, desenvolvidas em sua maior parte sobre rochas pertencentes ao Grupo Bambuí. As altitudes estão, em sua maioria, em torno de 500 m (Figura 2.3) e a rede de drenagem instalada é comandada pelo eixo do Verde Grande e os baixos cursos dos principais afluentes, como os rios Gorutuba, Verde Pequeno, Ouro, Vieira e Macaúbas (ANA, 2011).

O Planalto São Francisco, localizado entre Varzelândia e Montes Claros, apresenta patamares rochosos, interflúvios tabulares, vertentes convexas e retilíneas, assentados sobre os siltitos do Grupo Bambuí. As chapadas, com cotas entre 800 e 1.000 m de altitude, foram esculpidas nos arenitos do Grupo Urucuia, que normalmente encontram-se desagregados e transformados em cobertura arenosa. Essas superfícies são delimitadas por rebordos erosivos bem marcados e constituem aquíferos que originam nascentes muito susceptíveis à degradação. Em níveis topográficos mais rebaixados, as veredas prolongam-se como vales encaixados (ANA, 2011).

O Planalto das Bordas do Espinhaço constitui o limite leste da bacia, representando o divisor de águas das bacias do Jequitinhonha e Pardo com a do São Francisco. Apresentam patamares rochosos, cristas, colinas com vales encaixados, vertentes retilíneas desenvolvidas principalmente sobre a borda leste da bacia, correspondente às cabeceiras do rio Gorutuba e do Verde Pequeno. A densidade de drenagem é alta e o grau de dissecação é acentuado (ANA, 2011).

As nascentes situadas nessa unidade, que é dividida em Serra do Espinhaço, Serra Central e Monte Alto, são perenes. A abundância de fontes e nascentes que alimentam a rede de drenagem superficial contribui para a manutenção dos tributários da margem direita do Verde Grande. Contudo, após atingirem a região mais plana, áreas de baixa produtividade de águas subterrâneas, esses cursos de água se tornam intermitentes (ANA, 2011).

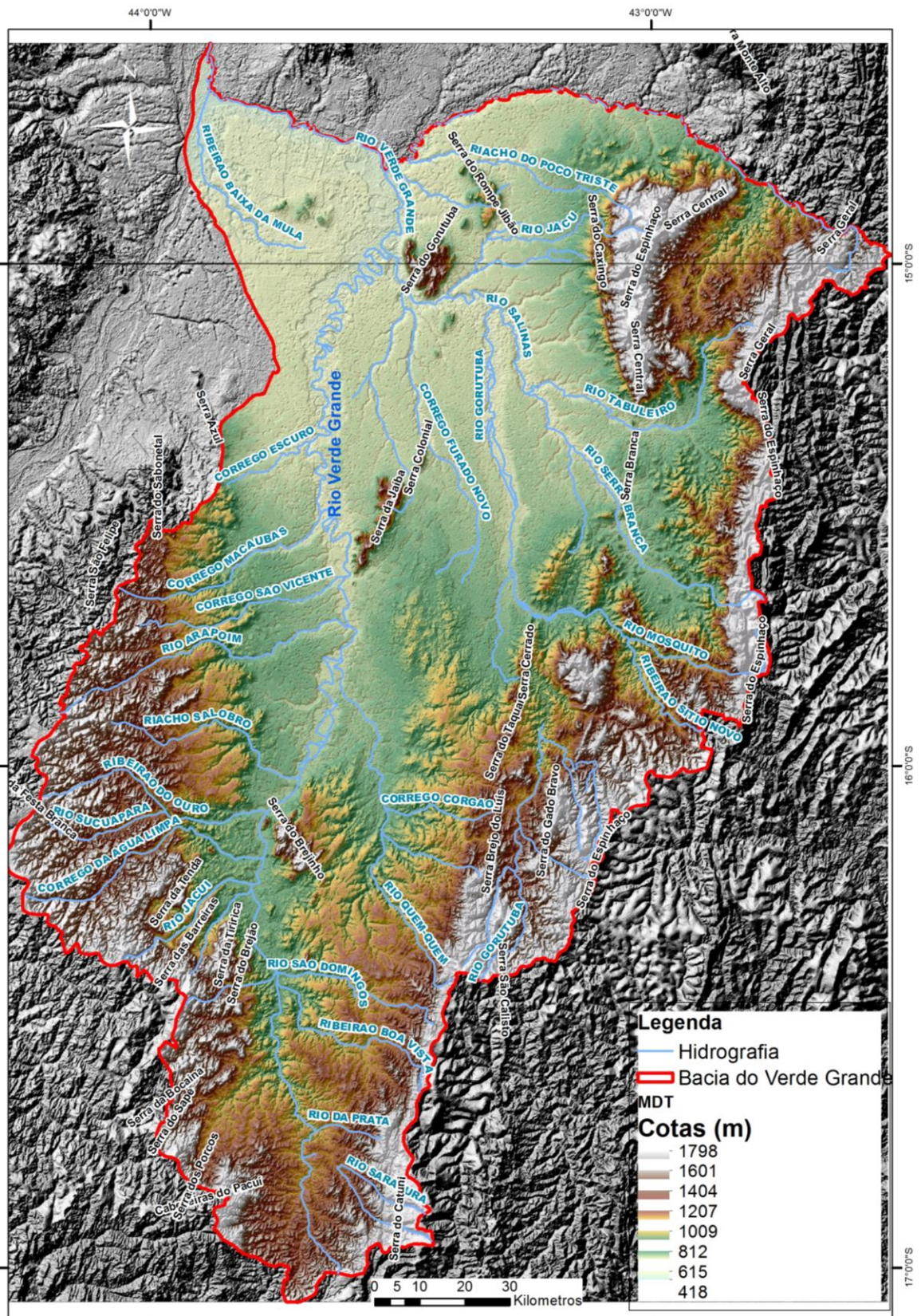


Figura 2.3: Mapa Hipsométrico da Bacia do rio Verde Grande.

Fonte: SRTM corrigido da Embrapa.

2.2.3. Uso do solo

As classes de uso e cobertura atual da terra foram estabelecidas através de estudos interdisciplinares realizados no âmbito do Plano de Bacia do Rio Verde Grande, existente no relatório de diagnóstico da bacia (ANA, 2009). Foram definidas preliminarmente duas grandes categorias: uma na qual a dinâmica está relacionada com as atividades socioeconômicas, denominada “Uso Antrópico” e outra, cuja dinâmica está relacionada com os elementos da natureza, denominada “Cobertura Natural” (Figura 2.4).

As unidades mapeadas são: Agropecuária; Agricultura Irrigada; Queimada; Silvicultura; Área Urbana; Hidrografia; Área Úmida; Afloramento Rochoso; Mata Ciliar; Vegetação Arbustiva; Vegetação Arbórea / Arbustiva.

O principal uso atual mapeado na bacia corresponde ao agropecuário, o qual inclui áreas de cultivos não irrigados e pastagens (50,1%, correspondentes a 1,57 milhões de hectares. Sendo assim, predomina o uso antrópico na bacia, o qual conta também com pouco mais de 39 mil hectares de agricultura (1,2%) e destes 22 mil hectares são de cultivo irrigado, e 35,5 mil hectares de silvicultura (1,1%). Ainda na categoria de usos antrópicos o mapeamento registrou também 459 hectares de áreas queimadas (0,015%) e 12,8 mil hectares de áreas urbanas (0,4%). Ao todo, portanto, o uso antrópico na bacia hidrográfica do rio Verde Grande representa 52,9% de sua área total (1,66 milhões de hectares, ANA 2011).

As atividades antrópicas mencionadas anteriormente são mais concentradas no eixo central, ao norte e nordeste do vale, sendo menos observada nas áreas de cabeceira, a montante das drenagens e nos topos de serras e morros (Figura 2.4). Essa característica posteriormente será utilizada para corroborar os tipos hidroquímicos de águas subterrâneas identificados na bacia.

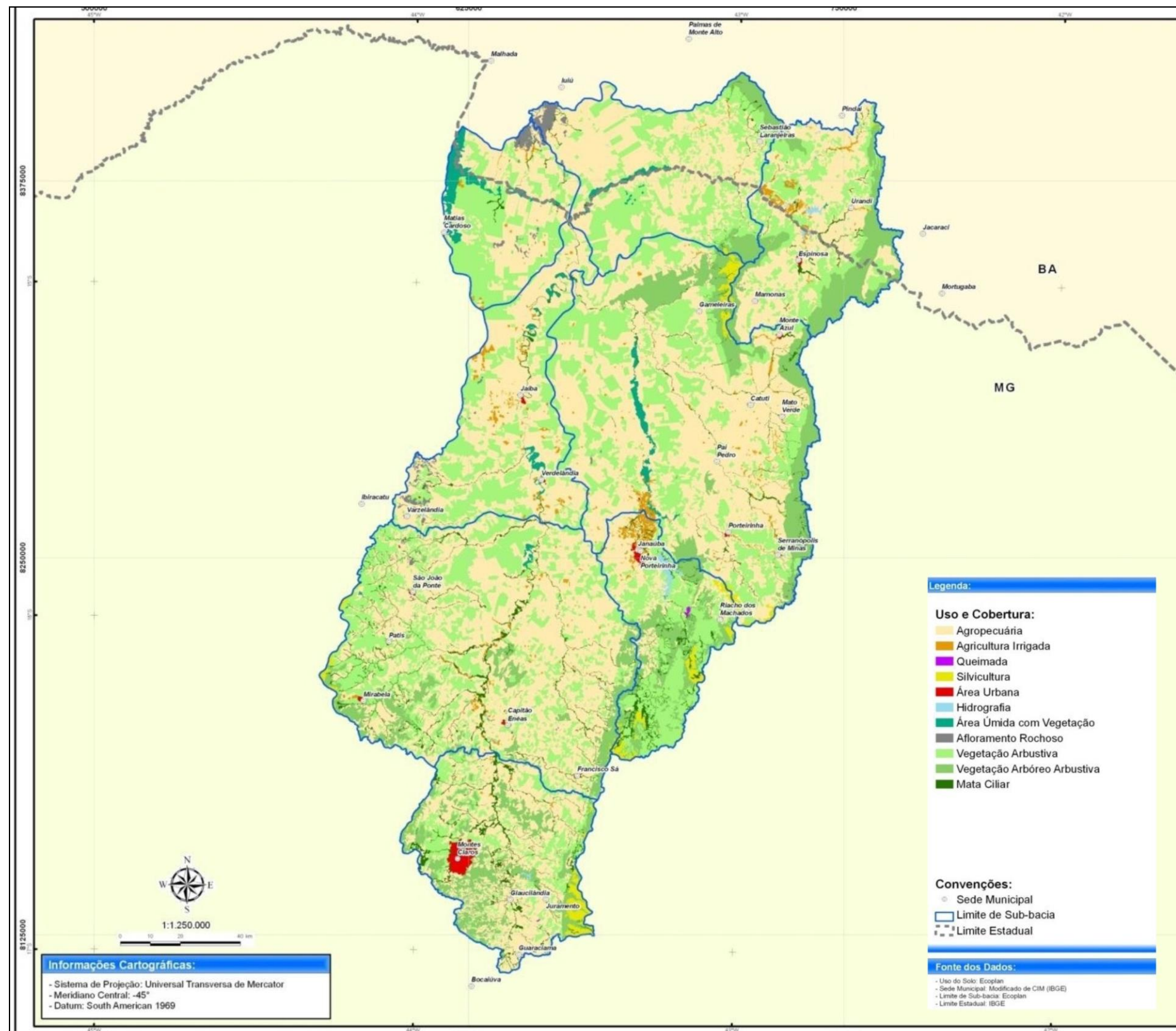


Figura 2.4: Mapa de Uso e Ocupação do Solo na bacia do rio Verde Grande. (A3)

Fonte: ANA (2011).

2.3. Caracterização socioeconômica

De acordo com ANA (2011), a demografia da bacia do rio Verde Grande é fortemente influenciada pela presença, em sua área geográfica, da cidade de Montes Claros, principal pólo regional. Mais de 1/3 da população da bacia reside em Montes Claros. Esse indicador traz à tona um dos graves problemas sociais identificados na bacia: o êxodo rural, principalmente para o município de Montes Claros, em decorrência do agravamento da situação social, com a miserabilidade das famílias de pequenos produtores.

Em relação às atividades econômicas, dados demonstram que o número de estabelecimentos industriais, na porção mineira, responde por 2% do total existente no estado, enquanto que a mão de obra ocupada na região corresponde à cerca de 3% do total. Em torno de 18% das principais indústrias responsáveis pela arrecadação de ICMS, localizadas na porção mineira da bacia, trabalhavam com a transformação de minerais não metálicos. O setor industrial estabelecido principalmente no município de Montes Claros e alguns outros como Bocaiúva e Capitão Enéas foi implantado através de incentivos da extinta Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) e da isenção de impostos.

Porém, dentre as atividades econômicas desenvolvidas na bacia do rio Verde Grande, destaca-se a agropecuária, responsável pelo emprego de 50% da população economicamente ativa. No setor agropecuário, o estabelecimento e posterior desdobramento se deram em duas vertentes. Grandes projetos de irrigação foram estabelecidos, destinados inicialmente à produção de cereais e depois redirecionados à produção de frutas, especialmente a banana, voltados para uma agricultura mais empresarial. E outro destinado à inclusão da agricultura familiar no mercado, através da produção de matéria prima para a indústria (algodão, mamona) em detrimento da produção local e tradicional de subsistência diversificada.

A ocupação do solo na bacia do rio Verde Grande acompanha a tendência de ocupação de todo o norte de Minas Gerais. As pastagens, dada a importância econômica da bovinocultura extensiva na região, ocupam 63% da área, sendo 19% com pastagem natural, ao passo que outros 44% são ocupados com pastagens formadas.

Aliados a este quadro de ocupação do solo pela bovinocultura extensiva, têm-se ainda 19% de mata nativa (cerrado e caatinga) e 4% de mata plantada com pinus e eucalipto. Ou seja, a maior parte da Bacia está ocupada com pastagens, sendo na sua maioria, degradadas. Esta média assume características mais extremas conforme a região considerada na Bacia do

rio Verde Grande, já que a atividade da bovinocultura exerce maior ou menor pressão sobre os recursos naturais.

A bacia apresenta um alto grau de concentração de terra, pois ao analisar a área ocupada pelos diversos estratos, verifica-se que as propriedades no estrato de 0 a 100 ha ocupam apenas 22% da área total da Bacia, enquanto as propriedades no estrato de 101 a 1000 ha ocupam 78% da área total da bacia do Rio Verde Grande.

A pecuária constitui a principal atividade em termos de área, apresentando caráter extensivo. O total de pastagens é estimado em cerca de um milhão de ha, sendo aproximadamente 700.000 ha de pastagens formadas e por volta de 300.000 ha de pastagem natural.

Na bacia do rio Verde Grande em Minas Gerais está em operação o projeto público de irrigação intitulado Gorutuba. O Projeto Gorutuba, localizado na parte mineira da bacia, abrange área de 7.224 ha, porém em 2001 eram irrigados em torno de 4.500 ha. Na margem esquerda do rio Gorutuba iniciou-se, em 1996, a implantação pela CODEVASF, do Projeto de Irrigação Lagoa Grande, com capacidade para irrigar cerca de 2.000 ha.

Estima-se que a área total atualmente irrigada na bacia é superior a 22.000 ha, o que corresponde a 85% do consumo total de água pelos usuários, segundo dados da SEAPA/MG (2001, *in* ANA, 2011). É válido mencionar que a capacidade total de áreas irrigáveis, considerando-se a disponibilidade hídrica da bacia, segundo dados de seu Plano Diretor, corresponde a 27.000 ha.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Estimativas de recarga aquífera

O uso da água subterrânea é de fundamental importância para atender as necessidades de água em rápida expansão urbana, industrial e agrícola, especialmente nas zonas semiáridas. Quantificar a taxa atual de recarga das águas subterrâneas é, portanto, um pré-requisito para uma gestão eficiente e sustentável dos recursos de águas subterrâneas nestas áreas secas, onde esses recursos são muitas vezes a chave para o desenvolvimento econômico. As estimativas de recarga devem também estar voltadas para pesquisas em aquíferos de importância econômica e social. Desde meados dos anos 1980, tem se visto um notável aumento de referências bibliográficas sobre estudos de recarga de aquíferos (DE VRIES & SIMMERS, 2002).

- Tipos de recarga:

As várias fontes de recarga para um sistema de águas subterrâneas são bem conhecidas. Os mecanismos de recarga principais dessas fontes foram conceitualmente definidos por *Lerner et al.* (1990) como:

- ✓ Recarga direta: água adicionada ao reservatório de água subterrânea em excesso da através da percolação vertical direta pela zona vadosa.
- ✓ Recarga indireta: percolação para o lençol freático através dos leitos de superfície de cursos d'água.
- ✓ Recarga localizada: uma forma intermediária de recarga resultante da concentração superficial (quase) horizontal da água, na ausência de canais bem definidos.

A interação da geologia, clima, morfologia, condições do solo e vegetação determina o processo de recarga. Em geral, a recarga de águas subterrâneas em regiões mais secas é muito mais suscetível às condições próximas da superfície do que em regiões mais úmidas. A percolação profunda em áreas úmidas é controlada principalmente pelo excesso de precipitação potencial (precipitação menos evapotranspiração potencial), capacidade de infiltração do solo e capacidade de armazenamento e transporte em subsuperfície. Em regiões semiáridas, no entanto, a evapotranspiração potencial média excede a precipitação, de modo que a recarga de águas subterrâneas depende, nomeadamente, de episódios de precipitação de grande intensidade, da acumulação de água da chuva em depressões e canais e da capacidade da água da chuva para escapar da evapotranspiração por percolação rápida

através de rachaduras, fissuras ou canais de dissolução existentes. A recarga normalmente é dificultada pela espessura dos solos aluviais, que permitem o armazenamento e alta retenção durante a estação úmida. A vegetação posteriormente irá extrair essa água do solo na próxima estação de seca. Em contraste, uma cobertura vegetal pobre em um solo permeável ou uma rocha porosa fraturada perto da superfície, juntamente com alta intensidade de chuvas, criam condições favoráveis para a recarga (DE VRIES & SIMMERS, 2002).

- Estimativa de recarga

De acordo com De Vries & Simmers (2002), diferenças em fontes subterrâneas de recarga e processos significam que os valores aplicáveis de técnicas de estimativa disponíveis variam. Embora a recarga direta seja conhecida por ser de significância decrescente com aridez crescente, os processos são conceitualmente os mais fáceis de definir e, ainda assim, formar a base de numerosas técnicas de estimativa de recarga de uso comum. Aspectos transitórios, tais como a frequência dos acontecimentos de recarga e do tempo de trânsito até a recarga acontecer são também importantes nesse assunto.

Os procedimentos usados na quantificação da recarga provêm de diversas fontes como medição direta, métodos de balanço hídrico, estimativa Darciniana, técnicas de traçadores naturais (trítio e cloretos) e métodos empíricos (DE VRIES & SIMMERS, 2002). A análise de curvas de recessão de hidrogramas, bem como a variação do nível d'água também são métodos bem utilizados para estimar a recarga aquífera.

A recarga aquífera, segundo Costa (2000, *in* FEITOSA *et al.*, 2008), em condições de equilíbrio natural pode ser entendida como a própria reserva renovável. Castany (1963) ignora o conceito de recurso e classifica as reservas da água subterrânea em quatro grandes categorias:

- i) Reservas reguladoras: representa o comportamento mediano secular das variações sazonais do nível da água subterrânea, produzidas por entradas supostas iguais às saídas, que traduz um estado de equilíbrio entre a recarga e a descarga (vazão de escoamento natural) do sistema aquífero, indicativo de que não existe variação no armazenamento.
- ii) Reservas geológicas: foram definidas como águas armazenadas no tempo geológico, das quais é possível dispor de certa quantidade regularizada durante certo período de tempo. Também são conhecidas como reservas permanentes.

- iii) Reservas naturais: representam a soma das reservas geológicas e das reservas reguladoras, tendo, portanto, o mesmo significado de reservas totais.
- iv) Reservas de exploração: vários conceitos são aplicados a esse termo, como o de Custódio e Llamas (1983) que define como descarga de extração do aquífero que pode manter-se com segurança. Conkling (1946, *in* FEITOSA *et al.*, 2008) já define como vazão média anual extraída artificialmente do aquífero sem que se produzam resultados indesejáveis.

A reserva explotável corresponde ao volume de água possível de ser explotado com sustentabilidade. Considera-se esse tipo de reserva como aquela constituída por uma parcela das Reservas reguladoras. Essa parcela pode ter um valor máximo variando entre 25% e 50% destas reservas (REBOUÇAS, 1992).

3.2. Constituintes das águas subterrâneas - abordagem conceitual

A água é um solvente quimicamente muito ativo capaz de reagir com o meio percolado incorporando substâncias orgânicas e inorgânicas. Desta forma, quando considerados exclusivamente processos naturais, os principais constituintes presentes nas águas resultam de processos físicos e químicos de intemperismo de rochas em que são formados minerais secundários (de alteração) e liberados íons solúveis que são incorporados ao ambiente aquático.

Em águas subterrâneas, os solutos e suas concentrações são consequentes dos litotipos dos aquíferos, do tipo de alteração mineral, do fluxo e taxa de recarga do aquífero. Por sua vez, as reações químicas de alteração mineral dependem do tempo de contato água/rocha, temperatura, do CO₂ disponível e da presença de ácidos inorgânicos e orgânicos.

A composição física e química das águas subterrâneas irá refletir a mobilidade e solubilidade dos elementos envolvidos no processo de intemperismo (DREVER, 1988). Os cátions Na⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ são móveis e tendem a ser liberados facilmente por intemperismo; K⁺ é intermediário; Al³⁺ e Fe³⁺ apresentam menor mobilidade e tendem a permanecer no solo. Desta forma, os plagioclásios podem constituir fontes de Na⁺ e Ca²⁺ para o ambiente aquático, enquanto que biotita e feldspato potássico podem ser fontes de Mg²⁺ e K⁺.

A presença de constituintes dissolvidos nas águas subterrâneas depende também de fatores externos ao meio percolado, tal como o clima (DREVER, 1988). As águas pluviométricas podem promover a concentração ou a diluição dos constituintes iônicos das

águas subterrâneas. Além disso, as águas meteóricas podem ser importantes fontes de espécies químicas dissolvidas tais como Cl^- , SO_4^{2-} e Na^+ .

A composição natural das águas superficiais também é controlada por inúmeros processos naturais, os quais incluem: geológicos e pedológicos (espécies minerais, tipos de solos); químicos (solubilidade dos minerais); geomorfológicos (variações de relevo), climáticos (temperatura, precipitação, evaporação) e biológicos (cobertura vegetal, presença de organismos).

As características naturais das águas podem ser alteradas em função do uso e ocupação do meio físico. A disposição inadequada de resíduos domésticos, industriais, de mineração a utilização de pesticidas e fertilizantes constituem as principais fontes de poluição ou contaminação dos recursos hídricos.

O quadro climático também deve ser associado à origem dos constituintes nas águas, principalmente, nos sistemas não confinados. Nas regiões áridas e semiáridas, à medida que a evaporação cresce, não há excedente para infiltração e os mecanismos bio-físico-químicos promovem o aumento dos sólidos dissolvidos nas camadas mais superficiais. Com a chuva, as águas de infiltração lixiviam os sais para a água subterrânea e, por consequência, a água apresenta maiores valores de salinidade (MESTRINHO, 2005).

A maioria das substâncias dissolvidas se encontra em estado iônico. De acordo com Custódio & Llamas (1983), alguns desses íons se encontram presentes quase sempre e seu somatório representa quase a totalidade dos íons presentes; estes são os íons fundamentais e sobre eles incidirá a maior parte dos processos químicos e hidrogeoquímicos.

Estes íons fundamentais são:

- Ânions: Cloro, Sulfato, Bicarbonato.
- Cátions: Sódio, Cálcio, Magnésio.

É frequente que os ânions Nitrato e Carbonato e o cátion Potássio sejam considerados dentro desse grupo de íons fundamentais, apesar de possuírem uma proporção pequena. Outras vezes, se incluem o íon ferroso (Fe^{2+}). As concentrações médias desse íon em águas subterrâneas ficam entre 0,1 a 1 mg/L, podendo aumentar consideravelmente em zonas mais áridas (CUSTODIO & LLAMAS, 1983).

Entre os gases devem se considerar como fundamentais o gás carbônico (CO_2) e o oxigênio dissolvido (O_2), ainda que não sejam frequentes suas análises em água subterrânea.

Entre as substâncias dissolvidas pouco ionizadas ou em estado coloidal são importantes os ácidos e ânions derivados da sílica (SiO_2).

O resto dos íons e substâncias dissolvidas, incluindo os elementos traços, se encontra geralmente em quantidades notadamente menores que os anteriores, habitualmente formando menos de 1% do conteúdo iônico total.

Os íons menores mais importantes são NO_3^- , NO_2^- , CO_3^{2-} , K^+ , Fe^{+2} , F^- , NH_4^+ e Sr^{2+} . Frequentemente estão em concentrações entre 0,01 a 0,1 mg/L. Em concentrações de 0,01 a 0,0001 mg/L estão os íons Br^- , S^{2-} , PO_4^{3-} , BO_3^{3-} , OH^- , I^- , Fe^{3+} , Mn^{2+} , Al^{3+} , etc.

Os íons metálicos derivados de As, Sb, Cr, Pb, Cu, Zn, Ba, V, Hg, U etc., às vezes estão em quantidades mensuráveis, mas em geral são elementos traços. O resto de possíveis íons estão quase sempre em quantidades menores que 0,0001 mg/L.

As águas subterrâneas chamadas de doces contêm no máximo 1.000 a 2.000 mg/L de substâncias dissolvidas; se o conteúdo é alto, acima de 5.000 mg/L são chamadas de águas salobras e acima de 40.000 mg/L, águas salgadas. Não é raro encontrar águas que superem os 40.000 mg/L de substâncias dissolvidas, chegando a 300.000 mg/L. Estas águas são denominadas salmouras e estão associadas com frequência a depósitos salinos, águas de reservas petrolíferas ou a águas bem antigas situadas a grandes profundidades.

De acordo com Custodio & Llamas, (1983), pode se definir alguns parâmetros mais comuns analisados nas águas subterrâneas:

- Condutividade elétrica (CE) - é a medida da facilidade da água em conduzir a corrente elétrica. É diretamente proporcional ao teor de sólidos dissolvidos sob a forma de íons.
- Cor - resulta da presença de substâncias dissolvidas na água, provenientes principalmente da lixiviação de matéria orgânica.
- Dureza - é a medida da capacidade da água em consumir sabão e formar incrustações.

Deve-se principalmente à presença de compostos de cálcio e magnésio, em geral sob a forma de carbonatos, sulfatos e cloretos. Segundo Custódio & Llamas (1983), as águas com dureza total inferior a 50 mg/L CaCO_3 são do tipo brandas, de 50 a 100 mg/L CaCO_3 são pouco duras, de 100 a 200 mg/L CaCO_3 são duras e acima de 200 mg/L CaCO_3 são muito duras.

- pH - é a medida da concentração hidrogeniônica da água ou solução, sendo controlado por reações químicas e por equilíbrio entre os íons presentes. O pH é essencialmente função do gás carbônico dissolvido e da alcalinidade da água.

- Potencial de oxi-redução (Eh) – determina a característica do ambiente quanto à fugacidade de oxigênio (reductor/oxidante), controlando inúmeros processos químicos que ocorrem na natureza.

- Sólidos totais dissolvidos (STD) - refere-se à concentração de íons dissolvidos presentes nas águas.

- Turbidez - representa o grau de interferência que a água apresenta à passagem de luz, devido à presença de carga sólida em suspensão.

- Cátions Principais

- Cálcio (Ca^{2+}) - representa um dos principais elementos responsáveis pela dureza nas águas. É amplamente distribuído em rochas e solos. As fontes geológicas são muitas, tendo como exemplos anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) e calcita (CaCO_3).

- Magnésio (Mg^{2+}) - é mais solúvel e mais difícil de precipitar quando comparado ao cálcio. É também responsável pela dureza nas águas. Um exemplo de mineral fonte é a biotita [$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$].

- Potássio (K^+) - devido à sua intensa participação em processos de troca iônica, da facilidade de ser adsorvido pelos minerais de argila e de seus sais serem bastante utilizados pelos vegetais, possui normalmente concentrações mais baixas nas águas quando comparadas com as de cálcio e de magnésio. Exemplos de minerais fontes são feldspatos potássicos como microclina (KAlSi_3O_8) e o ortoclásio.

- Sódio (Na^+) - sua ocorrência está associada às seguintes características: ampla distribuição em minerais fontes; baixa estabilidade química dos minerais que o contém; solubilidade elevada e difícil precipitação dos seus compostos químicos em solução. A albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) é exemplo de fonte de sódio.

- Ânions Principais

- Cloretos (Cl^-) – são solúveis e estáveis em solução e dificilmente formam precipitados. Minerais fontes de cloro são halita (NaCl) e silvita (KCl).

- Sulfatos (SO_4^{2-}) - são sais moderadamente a muito solúveis, exceto sulfatos de estrôncio e de bário. A presença de sulfato nas águas está relacionada à oxidação de sulfetos nas rochas e à lixiviação de compostos sulfatados como gipsita e anidrita.
- Bicarbonatos (HCO_3^-) – podem precipitar com certa facilidade como carbonato de cálcio (CaCO_3), mas estes íons não sofrem oxidação e nem redução nas águas naturais. Segundo Logan (1965) o bicarbonato predomina sobre o carbonato na faixa de pH de 6 a 10.
- Série Nitrogênio - O nitrogênio ocorre em diversas formas e estados de oxidação. No meio aquático pode ser encontrado nas seguintes formas: Nitrogênio orgânico (NO) → Nitrogênio amoniacal (NH_3) → Nitrito (NO_2^-) → Nitrato (NO_3^-). Teores de nitrato acima de 10mg/L podem ser indicativos de contaminação por atividades antrópicas.

As relações entre os íons dissolvidos na água podem guardar certa relação com o terreno de que procede a água ou indicar a ação de fenômenos modificadores, ou indicar uma característica específica da água considerada (CUSTODIO & LLAMAS, 1983). Utilizando a concentração em miliequivalente, pode-se estabelecer muitos tipos de relações, chamadas por vezes de índices hidrogeoquímicos, sendo as mais utilizadas $r\text{Mg}^{2+}/r\text{Ca}^{2+}$, $r\text{K}^+/r\text{Na}^+$, $r\text{Cl}^-/r\text{HCO}_3^-$ e $r\text{SO}_4^{2-}/r\text{Cl}^-$.

3.3. Processos químicos que ocorrem nas águas nos aquíferos

Os processos químicos que ocorrem nas águas nos aquíferos são devidos às condições físicas e geológicas da solubilização, dos ataques químicos e das reações, descritos por Schoeller (1962):

- a) Temperatura - Uma redução de temperatura diminuirá a solubilidade de CaSO_4 e aumentará a do CaCO_3 .
- b) Misturas - As misturas de diferentes aquíferos podem levar a precipitações. Uma água com teor elevado de Ca^{2+} pode precipitar o CaCO_3 ou CaSO_4 de uma outra água. Um teor elevado de SO_4^{2-} , por mistura, pode precipitar CaSO_4 .
- c) Troca de bases - Quando a água troca Ca^{2+} por Na^+ , observa-se uma diminuição de HCO_3^- e às vezes de SO_4^{2-} .
- d) Profundidade - Com a profundidade aumenta a pressão e a tensão de CO_2 permitindo um ataque mais intenso dos carbonatos e mesmo dos silicatos.

- e) Extensão de superfície de contato entre água/rocha. - Este processo aumenta a dissolução, e as águas das argilas terão alto teor de sais; águas de rochas fissuradas terão baixo teor de sais, dependendo do tempo de contato; aumento de concentração a jusante em relação à montante. Estas considerações anteriores deixam compreender melhor as possíveis variações que podem ocorrer no mesmo aquífero.

3.4. Evolução da composição química dentro do mesmo aquífero

No mesmo aquífero, a água pode sofrer mudança na sua composição química. Por exemplo, concentração, troca de bases, redução de sulfatos, etc, descritos por Schoeller (1962).

a - Concentração - A concentração ocorre por evaporação e por dissolução. Em concentração por evaporação, a influência é do clima. Em aquíferos profundos, a evaporação ocorre por gases que escapam levando consigo vapor da água.

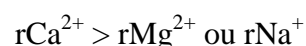
b - Aumento por novas dissoluções - Quanto mais lenta a circulação, trajeto longo, tempo de contato grande, e/ou contato água/rocha grande, maior será a possibilidade de dissolução. Geralmente, a razão $r\text{SO}_4^{2-}/r\text{Cl}^-$ diminui de montante a jusante e a velocidade de dissolução é maior para Cl^- que para SO_4^{2-} , porém, no terreno rico em SO_4^{2-} , a razão aumentará; $r\text{Mg}^{2+}/r\text{Ca}^{2+}$, aumenta de montante para jusante. Solubilização de MgSO_4 , MgCl_2 é mais rápida que de CaSO_4 e de CaCO_3 , cessando no momento em que a água se torna saturada desses sais.

c - Troca de bases - O índice de troca de bases (i.t.b.) é positivo na zona de alimentação, diminui progressivamente e pode ficar negativo a jusante. Nos aquíferos freáticos a concentração se dá por evaporação.

d - Resíduo Seco (RS) - Aumenta de montante a jusante. A circulação pode ocorrer em zonas preferenciais. Nos aquíferos freáticos, a concentração se dá por evaporação.

Existe também uma variação da composição química em aquíferos diferentes. Neste caso, pode-se estabelecer algumas regras de acordo com Schoeller (1962):

- a) Águas de aquíferos de mesma litologia, qualquer que seja sua idade, podem ter características comuns. Assim, águas de calcários geralmente terão:



e águas das argilas ou margas com RS elevado, terão teor grande em Na^+ e Cl^- , assim:

$$r\text{Cl}^- \text{ ou } r\text{SO}_4^{2-} > r\text{CO}_3^{2-}$$

$$r\text{Na}^+ \text{ ou } r\text{Mg}^{2+} > r\text{Ca}^{2+}$$

- b) Mas todas as águas de mesma litologia não terão obrigatoriamente a mesma composição química porque pode influir a zona de alimentação diferente, comprimento do trajeto, clima, etc.
- c) Águas de terrenos de mesma litologia, mesma idade, de mesma região, geralmente têm características comuns.
- d) Mas, águas de dois aquíferos diferentes, situados na mesma região, mesmo estando lado a lado, podem ter composição química diferente.

- Estudo de mapas

- a) Para distinguir os aquíferos uns dos outros pelas características químicas, são necessárias análises de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$, NO_3^- , SiO_2 , Sólidos totais dissolvidos (STD), etc. Comparam-se as relações características $r\text{SO}_4^{2-}/r\text{Cl}^-$, $r\text{Mg}^{2+}/r\text{Ca}^{2+}$, etc.
- b) Para seguir o comportamento químico dentro do mesmo aquífero, traçam-se curvas de valores iguais de certos elementos (isoteores).

- Zonalidade de composição química

- a) Zonalidade geológica

A composição química da água primeiramente depende da litologia que é fator essencialmente geológico. Ela depende das substâncias solúveis das rochas, das reações secundárias (p.ex.: troca de bases, redução dos sulfatos, concentrações) que são causas geológicas. Existem zonas muito sulfatadas, cloretadas, correspondentes a certas formações, que é zonalidade geológica (SCHOELLER, 1962).

- b) Zonalidade vertical

As águas subterrâneas circulam mais lentamente quanto mais profundas são. Quanto mais profundos são os terrenos menos são lixiviados. A concentração em sais aumenta com a profundidade. Portanto, existe uma zonalidade vertical. Assim, as águas bicarbonatadas na

superfície, transformam-se em cloretadas em profundidade, segundo esquema de Ignatovich & Souline (1951, *in* SCHOELLER, 1962):



(Zona superior da circulação das águas subterrâneas)

Os processos que tentam explicar essa mudança de composição química com a profundidade são os seguintes:

- a) reação do H_2CO_3 com o calcário e/ou com dolomito, deixando Ca^{2+} , Mg^{2+} e HCO_3^- em solução.
- b) oxidação da pirita na presença de calcita sob condições alternadas seco-úmidas.
- c) dissolução do gipso para produzir Ca^{2+} e SO_4^{2-} .
- e) perda de Ca^{2+} e Mg^{2+} e ganho de Na^+ por troca iônica com argilas esmectíticas ricas em Na^+ .
- f) quando a pressão parcial de O_2 diminui para um nível suficientemente baixo, permitindo a redução do SO_4^{2-} , então a perda de SO_4^{2-} e a liberação de CO_2 ocorrem na presença da bactéria *Sulfovibrio desulfuricans*. Essa bactéria promove uma reação característica na zona de água subterrânea, chamada catálise microbiana, que é a redução dos sulfatos em meio anaeróbico, resultando em compostos como de H_2O , S^{2-} e H_2S .
- g) adição de Cl^- através de difusão iônica a partir de águas de formações salinas mais profundas ou através de dissolução da halita.

- Zonalidade climática

Os fatores climáticos que regem a composição química da água, de acordo com Schoeller (1962) são:

- a) Pluviometria - as chuvas provocam lixiviação dos terrenos levando os sais para mais baixo nos aquíferos, especialmente o NaCl e CaSO_4 das águas. O CaCO_3 tem outro regime porque é pouco solúvel, precisa de outro fator que é o CO_2 livre da água. Nas regiões com muita chuva, ocorre diminuição de Cl^- ; sem chuva há aumento de Cl^- , SO_4^{2-} e RS (resíduo sólido).

- b) Evaporação - por evaporação a concentração de Cl^- , SO_4^{2-} - e RS das camadas superficiais aumenta. A capilaridade leva para cima sais como constatado em regiões semiáridas e áridas. Por supersaturação, vem a precipitação de crostas de calcita e gesso. Assim, nas regiões áridas tem-se água salgada e RS elevado, em regiões temperadas, as águas são menos concentradas e, nas regiões tropicais, ainda menos.
- c) Elevação de temperatura - Fator primordial da evaporação. Favorece o ataque dos silicatos. Com a umidade, a atividade dos microrganismos aumenta e, portanto, a produção de CO_2 , que por sua vez é o fator essencial no ataque dos minerais das rochas silicatadas e carbonatadas.

Schoeller (1941) estudou a evolução das características químicas das águas relacionadas com o clima. Os resultados foram os seguintes:

- a) RS (Resíduo Seco) – o teor aumenta nos climas temperados até regiões áridas, diminuindo depois nas regiões tropicais;
- b) Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- - a concentração destes íons varia em função do clima; o teor de HCO_3^- fica mais ou menos estável com pouco aumento das regiões temperadas até regiões áridas, diminuindo até as regiões equatoriais;
- c) SO_4^{2-} , Cl^- - nas regiões temperadas as concentrações de SO_4^{2-} e Cl^- são fracas, aumentando para regiões áridas, mas o SO_4^{2-} cresce mais lentamente devido à forte pluviosidade que lixivia intensamente os terrenos;
- d) Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ - as concentrações crescem das regiões temperadas até regiões áridas; não têm relação com HCO_3^- , mas mais com SO_4^{2-} ; para o Mg^{2+} ocorre idêntico, porém ocorre mais rapidamente, ligando-se com o SO_4^{2-} ; Na^+ com Cl^- , portanto aumenta de regiões tropicais até regiões áridas; todos são menos abundantes em regiões tropicais por causa da lixiviação dos terrenos.

Segundo Garmonov (1948, *in* SCHOELLER, 1962), a salinidade das águas de lençóis freáticos depende do clima, da cobertura vegetal e das condições de aeração dos terrenos.

Existe, portanto, uma zonalidade climática. Esta primeira zonalidade é extensa, independente de fatores geológicos, caracterizada pelas concentrações ou dissoluções maiores ou menores da água. Dentro da zonalidade climática, encontra-se a zonalidade geológica, na qual a variação da composição química depende do terreno.

3.5. Estudos realizados na bacia

De acordo com ANA (2009), em 1975 e 1978, o Departamento Nacional de Obras Contra a Seca – DNOCS e a Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba - CODEVASF, iniciaram, respectivamente, a implantação dos Perímetros Irrigados do Estreito (em Urandi/BA e em Espinosa/MG) e do Gorutuba (em Nova Porteirinha/MG), marcando a introdução da agricultura irrigada na bacia do rio Verde Grande.

O Ministério de Irrigação e Reforma Agrária – MIR, foi criado a nível federal, se tornou responsável pela coordenação do Programa Nacional de Irrigação – PRONI e pela Elaboração do Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Verde Grande em fins dos anos 70 e início dos anos 80. Ele tinha a finalidade de executar a Política Nacional de Irrigação fixando diretrizes e normas, além de coordenar e fiscalizar o uso das águas públicas de domínio da União para fins de irrigação, ficando vinculados os órgãos que já vinham atuando em questões ligadas à irrigação, como o DNOCS, a CODEVASF e o DNOS (Departamento Nacional de Obras e Saneamento).

Dentro desse programa federal foi criado o Projeto Nordeste a nível regional, dentro do qual foram inseridos os perímetros irrigados já existentes na bacia: Gorutuba e Estreito. As experiências advindas desses projetos, aliada à abundância de solos aptos para a irrigação e aos benefícios fiscais e subsídios oferecidos serviram de atrativos para que inúmeros projetos se instalassem na bacia, de forma que, entre os anos de 1975 e 1980, a área irrigada sofreu um incremento de 176%. Estima-se que essa área seja atualmente cerca de 22.000 ha, valor este muito elevado em relação à disponibilidade hídrica superficial e subterrânea da região e, sobretudo, considerando-se as infraestruturas instaladas, são superiores à possibilidade de utilização da água disponível.

Estudos mais específicos sobre a quantificação e qualificação dos recursos hídricos na bacia foram realizados através dos trabalhos de CETEC de 1981, com o “Projeto Karst”, e em 1984 e 1995, sobre a disponibilidade hídrica superficial e subterrânea da bacia.

No estudo do CETEC de 1995 sobre vazão específica, indicam que o potencial hidrogeológico no conjunto da bacia pode ser considerado médio a baixo, sendo que cerca de 75% dos poços têm produtividades inferiores a 1,0 L/s/m, e a distribuição das vazões específicas na bacia indica uma zona de maior produtividade, com valores entre 1,0 e 10,0 L/s/m nas faixas sul e sudoeste e uma zona de baixa produtividade (<1,0 L/s/m) ao norte e

leste da bacia. Foram obtidas também estimativas de recarga para a bacia através do método de Maillet (Custódio & Llamas, 1976), que analisa as curvas de recessão de hidrogramas. Os resultados obtidos para as 3 estações fluviométricas presentes foram:

- Estação Boca da Caatinga (Matias Cardoso): recarga de 1,37 %;
- Estação Colônia do Jaíba (Jaíba): recarga de 2,23 %
- Estação Gorutuba (Janaúba): recarga de 5,58 %.

Nesse mesmo estudo, pelo método do balanço hídrico, o valor de recarga obtivo foi de 3,3 % do total precipitado.

CETEC (1981) apresentou valores de coeficiente de infiltração para uma estação fluviométrica em fazenda Rio Verde em 2%, e foi considerado muito pequeno e restrito a estação e sub-bacia representativa.

Os primeiros registros de conflito entre usuários de água na região surgiram em fins de 1988, quando a crescente demanda e conseqüente redução na disponibilidade hídrica, criou um quadro de dificuldades de compatibilização dos vários usos. Estes conflitos podem ser agrupados em 2 categorias principais: entre irrigantes (incluindo os de irrigação pública e privada) e entre irrigantes e outros usuários.

Os conflitos continuaram e ocorreram várias denúncias aos órgãos públicos sobre a situação de disputa pela água, inclusive pedindo providências. Medidas paliativas foram tentadas, como a abertura das comportas da barragem Bico da Pedra.

Em 1995, o CETEC, Centro tecnológico de Minas Gerais, realizou um projeto de caracterização da bacia denominado “Desenvolvimento metodológico para modelo de gerenciamento ambiental de bacias hidrográficas. Estudo de caso: Bacia do rio Verde Grande”. Os resultados desse projeto de pesquisa foram estruturados em 12 volumes sendo este documento o Relatório Diagnóstico e Diretrizes para a Gestão Integrada, onde se contextualiza a questão da gestão integrada dos recursos hídricos com vistas à proposição de diretrizes para subsidiar a gestão na Bacia.

Os constantes conflitos e a constatação de que critérios técnicos e procedimentos utilizados na concessão de outorgas para esta bacia precisavam ser revistos, levaram o Ministério do Meio Ambiente e da Amazônia Legal a suspender a emissão de outorgas de direito de uso de água superficial para a irrigação em toda a bacia em 30/12/1996, através da Portaria nº 396, na expectativa de retornar o processo a partir da definição desses critérios.

Após a entrada em vigor da portaria, houve um acentuado incremento na utilização dos recursos hídricos subterrâneos que não sofreram restrição de uso.

Foi aprovada pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos, em 2003, a criação do Comitê da Bacia Hidrográfica do rio Verde Grande. O Comitê é um órgão público com competência legislativa e tem por finalidade promover o gerenciamento participativo e democrático dos recursos hídricos da bacia.

Em 2005, por meio de um convênio firmado entre a Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba – CODEVASF e o Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM, iniciou-se o monitoramento qualitativo dos recursos hídricos subterrâneos do Estado de Minas Gerais, através de uma rede piloto constituída por 39 (trinta e nove) poços tubulares nas sub-bacias dos rios Verde Grande, Riachão e Jequitaí. Essa área é um importante pólo agropecuário regional, desenvolvida especialmente em função do Projeto Jaíba e pouco contemplada com o estudo de monitoramento da qualidade das águas subterrâneas.

Em 2009, foi iniciada a elaboração do Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do rio Verde Grande (PRH Verde Grande), que visa articular os instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos e embasa as ações para a gestão e o uso múltiplo e integrado dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos. Isso se reflete diretamente no enfrentamento dos dois principais problemas que se verificam na bacia: a escassez hídrica com suas repercussões sobre a qualidade e a quantidade de água e a fragilidade na gestão de recursos hídricos na região.

Em 2010, iniciou o projeto “Instrumentação e Operação do Sistema de Monitoramento de Águas Superficiais e Subterrâneas na Bacia do Alto São Francisco”, que consistiu em aperfeiçoar o monitoramento iniciado em 2005 pelo IGAM nas sub-bacias dos rios Verde Grande, Riachão e Jequitaí, aumentando o número de poços monitorados, de modo a abranger mais representativamente os municípios dessa região. O aperfeiçoamento e manutenção dessa rede de monitoramento são de extrema importância devido ao pouco conhecimento da região e da necessidade de informações que complementem aquelas já existentes para a realização de uma análise mais consistente. Nessas sub-bacias as águas subterrâneas são utilizadas principalmente para irrigação, seguida de uso industrial e em menor escala para abastecimento público, com 47%, 46% e 5% da vazão outorgada, respectivamente (dados de 2010).

A Agência Nacional de Águas -ANA, em 2008 contratou um estudo para elaborar um Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do rio Verde Grande, que compilou os trabalhos existentes da bacia. O estudo do balanço hídrico mostrou valor de recarga de 3,0% do volume precipitado.

Dos estudos acadêmicos realizados na região da bacia do rio Verde Grande, destacam-se os direcionados para a pesquisa sobre o flúor nas águas subterrâneas da região noroeste da bacia, compreendendo os municípios de Verdelândia, Varzelândia e Jaíba. Os trabalhos de Diniz (2006), Velásquez *et al.* (2007) e Freitas *et al.* (2008) concluíram que as concentrações elevadas de fluoreto nas águas subterrâneas analisadas no estado de Minas Gerais, em 25 municípios e nos municípios de Jaíba, Verdelândia e Varzelândia têm correlação positiva com o sódio e negativa com o cálcio. Correlações positivas com o fluoreto foram registradas ainda por Velásquez *et al.* (*op. cit.*) e Freitas *et al.* (*op. cit.*) para o pH, condutividade elétrica e STD, enquanto o Eh correlaciona-se negativamente com este elemento. Regionalmente, Velásquez *et al.* (*op. cit.*) observaram também a tendência de concentrações elevadas de flúor na água associadas a valores baixos de vazão e a poços associados a fotolineamentos. Na área pesquisada por Freitas *et al.* (*op. cit.*) não foi observada correlação significativa entre flúor e as vazões dos poços. Costa (2011) correlacionou as fácies mais enriquecidas em flúor aos calcarenitos e calcirruditos oolíticos e intraclásticos presentes nos aquíferos carbonáticos da Fm. Lagoa do Jacaré e da Fm. Serra da Saudade. Poços com vazões altas tenderam a apresentar águas de menor salinidade e menor concentração de flúor. Nessa região a noroeste da bacia, as águas subterrâneas são insaturadas em relação à fluorita alcançando concentrações altas em fluxos regionais, profundos, que apresentam águas mais antigas (com concentração de trítio inferior a 0,5 UT), de temperatura mais elevada e com alta razão $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ (COSTA *op.cit.*).

Nesse ponto vale comentar alguns dados do tempo de residência ou renovação das águas subterrâneas na região de Verdelândia e Jaíba, apresentado por Velásquez *et al.* (2009), Nesse trabalho, que abrange a região de Verdelândia e Jaíba, foram determinadas as concentrações de trítio nas águas subterrâneas para definir o tempo de renovação das águas subterrâneas ou de residência das águas no sistema aquífero. As análises indicam um tempo de renovação para as águas subterrâneas, localizadas na região norte–noroeste da Jaíba, superior a 250 anos. Na porção sudoeste da Jaíba e uma faixa norte sul onde o relevo apresenta feições cársticas (dolinas e sumidouros), os valores de trítio mostram concentrações compatíveis

com águas de precipitação recente, com idades entre 10 e 60 anos, evidenciando que se trata de uma área de recarga.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Realizou-se um levantamento dos trabalhos anteriores realizados na bacia do rio Verde Grande, de forma a consolidar todas as informações existentes sobre a hidrodinâmica das águas subterrâneas nessa bacia.

Os dados levantados vieram das seguintes referências:

- Relatório do Diagnóstico da bacia Hidrográfica do rio Verde Grande – ECOPLAN – Contrato ANA/2008, Edição Revisada em outubro de 2009.
- Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do rio Verde Grande – TECNOSSOLO – EPTISA, Volume 1, Relatório Geral, 1996.
- Desenvolvimento Metodológico para Modelo de Gerenciamento Ambiental de Bacia, Estudo de Caso: Bacia do rio Verde Grande – CETEC, Relatório técnico final, 1995.
- Projeto de Gerenciamento Integrado das atividades desenvolvidas em terra na Bacia do São Francisco – ANA, Relatório final, janeiro de 2003.
- Programa de Monitoramento de Águas Subterrâneas - CONVÊNIO CODEVASF/IGAM, Projeto: Monitoramento das Águas Superficiais e Subterrâneas das Sub-bacias dos rios Verde Grande, Riachão e Jequitaí na Bacia do Rio São Francisco, em Minas Gerais, 2005.

A base de dados cartográficos georreferenciados compreendeu a criação de um acervo específico, de todos os arquivos disponíveis em empresas e órgãos públicos. Foi efetuada uma análise preliminar para avaliação das informações quanto à qualidade, confiabilidade, relevância e interesse. Discriminam-se abaixo os dados georreferenciados utilizados no desenvolvimento desse estudo.

- Arquivo vetorial em formato Shapefile (.shp) contendo a Base hidrográfica (2002) de Minas Gerais, projeção Lat/Long, escala original: 1:50.000, obtida no site do IGAM.
- Base cartográfica de Minas Gerais, obtida pelo IGAM, do banco de dados do GeoMinas, no sistema métrico, projeção UTM, *datum* SAD69.
- Arquivo vetorial em formato Shapefile (.shp) contendo a malha digital dos municípios, estradas, hidrografia e estruturas físicas de Minas Gerais e da bacia rio do Verde Grande, no sistema métrico, projeção UTM, *datum* SAD69, obtida no site do HidroWeb (acesso em 2011).

- Arquivo vetorial em formato Shapefile (.shp) contendo feições poligonais das Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos do Estado de Minas Gerais - Comitês de Bacia Hidrográfica do Estado de Minas Gerais, projeção: Latitude /Longitude, obtida no site do IGAM.
- SRTM do estado de Minas Gerais, corrigido pela EMBRAPA.
- Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais, escala 1:2.500.000, CPRM (2003);
- Projeto Espinhaço, escala 1:500.000, CODEMIG/UFMG (2007);
- Domínios Hidrogeológicos, CPRM, maio 2007, Escala 1:2.500.000, de CD SIG em ArcExibe.
- Mapa Geológico do Brasil, CPRM, 2004. Escala 1:2.500.000, de CD SIG em ArcExibe;
- Mapa de Domínios/subdomínios hidrogeológicos, CPRM, maio de 2007.

Todos os arquivos (formato shapefile) foram processados com utilização do software ArcView GIS 9.3 pertencente ao Sistema de Informação Geográfica ArcView, da empresa Environmental System Research Institute (ESRI), versão 2006. Foi adotado o datum horizontal *South American Datum 1969* (Datum SAD'69 – IBGE), e projeção métrica UTM (Universal Transversa Mercator).

4.1. Caracterização Hidroclimatológica

4.1.1. Temperatura e Evapotranspiração real

Para a determinação dos valores médios de temperatura e evapotranspiração utilizados na caracterização climatológica, utilizaram-se duas fontes de dados climáticos obtidos através de estações meteorológicas e climatológicas.

No primeiro caso, as estações meteorológicas foram obtidas do banco de dados do IGAM. Os dados disponibilizados consistiam em medições a cada 3 horas diárias de temperatura do ar média, mínima e máxima e da mesma forma para a evapotranspiração, assim como medição da pluviometria acumulada no mesmo período.

No segundo caso, as estações climatológicas utilizadas pertencem ao INMET e os dados disponibilizados foram obtidos uma vez por dia, sendo esses dados de temperatura média, mínima e máxima e aquisição simultânea da pluviometria.

Para a utilização das temperaturas nesse estudo, adotaram-se as temperaturas médias diárias medidas nas estações a fim de se obter as médias decendiais (período de 10 dias)

durante o período monitorado como dado de entrada no cálculo do balanço hídrico climatológico.

Nas estações climatológicas do INMET os dados obtidos de evapotranspiração real foram medidos diariamente, com valores de mínima e máxima. Para utilização desses dados na caracterização climática, foi calculada uma média mensal dos valores médios diários. Já para as estações meteorológicas do IGAM, a medida de evapotranspiração real foi obtida diariamente.

4.1.2. Pluviometria

Foram utilizadas para a caracterização da pluviometria estações pluviométricas dentro e fora da bacia, para melhor definição da média, sendo 9 estações localizadas fora da bacia e 5 dentro.

Para a representação do regime pluviométrico da bacia do rio Verde Grande, utilizou-se do ambiente ArcView GIS 9.3 na interpolação dos valores médios das estações pluviométricas da região. De acordo com Feitosa *et al.* (2008), a distribuição espacial da precipitação na bacia hidrográfica pode ser realizada através do cálculo da média aritmética das precipitações, ou através de métodos mais criteriosos, como os métodos de Thiessen e das Isoietas. Os métodos para obtenção da precipitação média da bacia adotados foram o da Média Aritmética e o Método das Isoietas.

- **Média Aritmética**

O Método da média aritmética consiste em calcular a média aritmética das alturas de chuva precipitadas nos postos pluviométricos da região. Quando há a grande diferença entre os valores mínimos e máximos de precipitação na bacia, o método da média aritmética não é muito adequado, pois esse método só apresenta boa estimativa se os aparelhos de medição forem distribuídos uniformemente e a área for plana ou de relevo muito suave, com área total abrangida inferior a 5000 km², sendo também necessário que a média efetuada em cada estação individualmente varie pouco em relação à média.

- **Método das Isoietas**

No mapa da área são traçadas as isoietas ou curvas que unem pontos de igual precipitação. Em seguida calculam-se as áreas parciais contidas entre duas isoietas sucessivas e a precipitação média em cada área parcial, que é determinada fazendo-se a

média dos valores de duas isoietas. Usualmente se adota a média dos índices de suas isoietas sucessivas.

O mapa foi confeccionado utilizando-se o método de *kriging* (krigagem) com o software *Surfer* 8.0, uma técnica de média ponderada para a interpolação dos valores médios obtidos em cada estação pluviométrica. As áreas pertencentes a cada intervalo de precipitação foram calculadas no programa MAPVIEWER 7.0.

Uma vez que o mapa de isoietas é construído, a área A_i entre cada par de isoietas, dentro da bacia, é medida e multiplicada pela média aritmética P_i das alturas de precipitação representadas pelas isoietas fronteiras desta área. Dessa forma, a precipitação média P da bacia é calculada utilizando a equação 4.1 abaixo:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \bar{P}_i}{A} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Onde p é a precipitação média na bacia (mm);

P_i é a precipitação no posto i (mm);

A_i é a área do respectivo polígono, dentro da bacia (km²);

A é a área total da bacia.

4.1.3. Balanço Hídrico Climatológico

A equação do balanço hídrico de uma bacia obedece ao princípio da conservação da massa ou princípio da continuidade segundo o qual, em um sistema qualquer, a diferença entre as entradas e as saídas é igual à variação do armazenamento dentro do sistema (FEITOSA & MANOEL FILHO, 2000).

Na definição do balanço hídrico climatológico, foram utilizados os dados de 2 estações meteorológicas (IGAM) e 2 estações climatológicas (INMET), distribuídas na bacia. Os dados utilizados referem-se a médias diárias de temperatura e somatório da pluviometria em intervalos decendiais (10 dias) de cada mês, para cada ano de monitoramento, já descritas no item 4.1.1.

Os balanços hídricos para a bacia do rio Verde Grande foram calculados em planilha EXCEL elaborada para tal finalidade por Rolim *et al.* (1998), adotando-se o método de Thornthwaite & Mather (1955) para uma capacidade de água disponível (CAD) de 100mm,

com a evapotranspiração potencial (ETP) sendo estimada pelo método de Thornthwaite (1948). Os dados decendiais de temperatura média mensal do ar (TMED) e chuva total média decendial (P) utilizados neste banco de dados são pertencentes às redes do IGAM e INMET. Como resultados, as planilhas apresentam as estimativas da evapotranspiração real (ETR), armazenamento de água no solo (ARM), deficiência hídrica (DEF) e excedente hídrico (EXC), na escala decendial, além de diversos gráficos envolvendo essas variáveis.

4.1.4. Índice de aridez

Para o cálculo do Índice de Aridez, utilizam-se os valores da razão da Precipitação média anual (P) sobre Evapotranspiração (ETP) e podem-se adotar dois critérios:

- O critério estabelecido pelas Nações Unidas (UNESCO, 1979 *in* CONAMA, 1997), segundo o qual o Índice de Aridez de uma região consiste na razão entre a Precipitação e Evapotranspiração Potencial, cujos limites variam em: (1) Hiperárido < 0,03; (2) Árido 0,03 – 0,2; (3) Semiárido 0,21 – 0,5; (4) Sub-úmido e seco 0,51 – 0,65; (5) Sub-úmido e úmido > 0,65.
- O segundo critério é definido por Rebouças *et al.* (2002), como índice de aridez bioclimático, representado também pela relação de precipitação média anual sobre a evapotranspiração (ETP), cujos limites variam de: (1) desértica <0,03; (2) árida 0,03 a 0,20; (3) semi-árida 0,20 a 0,50; (4) sub-úmida 0,50 a 0,75.

Foi utilizado o ambiente GIS (ArcGis 9.3) para interpolação, com o método do inverso do quadrado da distância para confecção das curvas de isolinhas e isoteores.

4.1.5. Cálculo do escoamento de base

Para o cálculo do escoamento de base da bacia, foi utilizado um método de separação de hidrógrafas, em 4 estações fluviométricas existentes. Tem-se uma ressalva para os períodos das estações que não compreendem o mesmo intervalo de tempo. Das estações utilizadas, com medições de vazões diárias em m³/s, estão as estações de Montes Claros (período de maio de 1969 a dezembro de 1975), Jaíba (período de julho de 1962 a fevereiro de 2010) e Matias Cardoso (período de maio de 1969 a dezembro de 2008), todas localizadas no rio Verde Grande e a estação de Janaúba (período de maio de 1969 a janeiro de 1988), no curso do rio Gortuba, afluente direito do rio Verde Grande.

Baseando-se no conceito de que os períodos de recessão das hidrógrafas de vazão de uma bacia refletem as características dos aquíferos, bem como o regime de fluxo e armazenamento subterrâneos, foi adotada a técnica de decomposição dos hidrogramas de escoamento total para separação do escoamento direto do escoamento de base. O procedimento foi automatizado com o uso do programa Baseflow (ARNOLD *et al.*, 1995)

- **Método Automatizado de Separação das Hidrógrafas**

Uma técnica automatizada para a determinação do escoamento de base a partir das hidrógrafas de vazão foi criada por Arnold *et al.* (1995) por meio da adaptação do método digital de filtragem recursiva. O programa foi denominado BASEFLOW, tendo utilizada a sua versão atualizada em 2006.

A técnica consiste da filtragem do escoamento superficial da hidrográfica de vazões (identificado como sinais de alta frequência) e do escoamento de base (sinais de baixa frequência). O cálculo da vazão de restituição dos aquíferos é feito a partir da diferença entre a vazão real do curso d'água e a vazão de escoamento superficial (Figura 4.1).

O filtro é aplicado até 3 vezes consecutivas aos dados de vazão promovendo uma progressiva redução do escoamento de base e permitindo que o usuário ajuste de forma mais precisa a separação da hidrógrafa às condições da bacia estudada. Finalizada essa primeira análise o programa efetua a determinação do coeficiente de escoamento de base valendo-se da equação 4.2 e da técnica denominada Curva de Recessão Principal (*MRC – Master Recession Curve*) que produz uma média para as curvas de recessão identificadas na série de vazões.

A curva de recessão, em uma hidrógrafa segue uma lei exponencial e caracteriza o período em que não há excesso de precipitação. Corresponde à descarga proveniente exclusivamente da restituição dos aquíferos – o escoamento de base. A equação para obtenção do coeficiente de esgotamento é descrita por Fetter (1994) como:

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Onde:

- Q_t é a vazão em um período de tempo t após o início da recessão (m^3/h);
- Q_0 é a vazão no início da recessão (m^3/h);
- α é a constante de recessão ou coeficiente de esgotamento ($1/t$; d^{-1}) e corresponde à declividade da reta de recessão no gráfico $\log Q$ versus tempo;

- t é o tempo decorrido desde o começo da recessão.

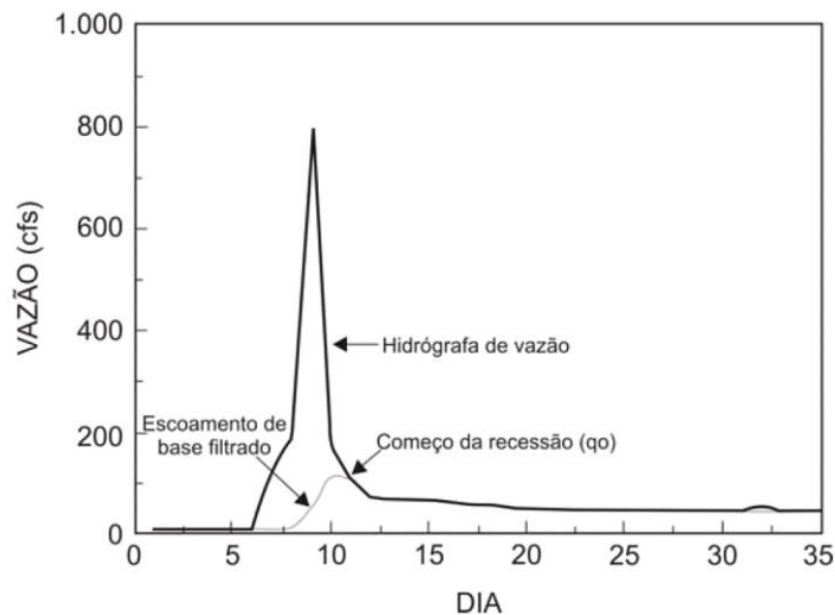


Figura 4.1: Determinação do escoamento de base pelo programa BASEFLOW. O filtro separa o escoamento superficial da descarga subterrânea.

Fonte: Modificado de Arnold *et al.* (1995).

Nota: O ponto onde a curva gerada pelo filtro junta-se ao hidrograma real corresponde ao início da recessão.

O cálculo do escoamento superficial da bacia (ES) foi extraído do OUTPUT do programa BASEFLOW, que calcula a vazão de escoamento total para cada interação realizada. Os dados de entrada no programa foram datas em formato AAAAMMDD, e a vazão em m^3/s , em formato texto separado por espaços.

Foi também calculada a vazão específica da bacia (vazão média anual/área drenada).

4.2. Caracterização Hidrogeológica

A caracterização hidrogeológica através de domínios hidrogeológicos da bacia do rio Verde Grande foi definida de acordo com os estudos do HIDROSSISTEMAS, demandada pela COPASA (SOUZA, 1995) com auxílio dos dados obtidos no CETEC (1981 e 1995), em Mourão *et al.* (2001), e com a base hidrogeológica utilizada pela CPRM, em escala 1:2.500.000.

4.2.1. Potencialidades dos aquíferos

Para a determinação dos parâmetros hidráulicos dos aquíferos da bacia do rio Verde Grande, foram utilizados dados provenientes dos bancos de dados:

- Dados de poços tubulares obtidos através do SIAGAS/CPRM até 2011 e;
- Banco de dados de Outorga do IGAM até 2009.

Os dados existentes obtidos de poços tubulares foram utilizados para determinação de parâmetros hidráulicos do aquífero, como capacidade específica, vazão média explotada, profundidade do poço, tipos de aquíferos dentre outros. Todos os dados existentes foram filtrados, excluindo-se os poços que não obtinham os dados, na seguinte ordem de relevância:

- Tipo: Poço tubular
- Bacia: São Francisco/Sub-bacia: Verde Grande
- Tipo de Formação: Existente
- Vazão estabilização: Existente
- Nível estático: Existente

A partir da ordenação dos dados dos poços, foi realizada a estatística como médias, mediana, máximos, mínimos e desvio padrão utilizando planilhas em Excel.

Quanto à transmissividade dos aquíferos, uma estimativa aproximada pode ser efetuada a partir dos dados de capacidade específica, segundo Galofré (1966, *in* CUSTODIO & LLAMAS, 1983). A equação (Eq. 4.3) é dada como:

$$T \text{ (m}^2\text{/dia)} = \frac{100 * Q \text{ (l/seg)}}{s \text{ (m)}} \quad \text{(Eq. 4.3)}$$

Onde T é a transmissividade equivalente; Q é a vazão bombeada; s é o rebaixamento (ou ND-NE). A razão entre a transmissividade estimada e a real por esse método é de 1,16.

4.2.1.1. Potenciometria

Para a confecção da potenciometria das águas subterrâneas foram utilizados os dados de níveis d'água de poços tubulares profundos dos bancos de dados de outorga do IGAM e da CPRM (SIAGAS). Os dados de entrada foram interpolados no ambiente do software *ArcMap 9.3*, pelo método do Peso do Inverso da Distância Ponderada (IDW – Inverse Distance Weight), que assume que cada ponto medido tem uma influência local e que diminui com a distância. Os pesos diminuem à medida que as células se distanciam do ponto, ficando os maiores valores próximos ao ponto.

Foi utilizado o arquivo de SRTM, corrigido pela EMBRAPA, para filtragem das cotas topográficas, através do cruzamento dos arquivos de entrada de níveis d'água e da imagem em SRTM pela ferramenta **Spatial Analyst Tools – Extractions – Extract Values to Points**. Após esse tratamento, gerou-se um mapa com os pontos de níveis d'água corrigidos para a cota original.

4.2.1.2. Avaliação da Recarga

Para o cálculo do Valor de Recarga na bacia, foram utilizados 3 métodos diferenciados, descritos abaixo. A partir dos valores de recarga obtidos pelos diferentes métodos, foram elaborados mapas de recarga para a região.

- **Método do balanço hídrico-climático**

A técnica de balanço hídrico usada é a definida por Thornthwaite (1948). O estudo da recarga por meio do balanço climático envolve vários parâmetros a serem analisados: precipitação, escoamento superficial, evapotranspiração e parâmetros de infiltração associados às características do solo-subsolo.

Segundo Feitosa e Manoel Filho (2000), a equação básica do balanço hídrico pode ser escrita considerando precipitação (P), evapotranspiração real (ETR), escoamento superficial (ES) e infiltração (I), como:

$$P - ETR - ES - I = \Delta S, \quad (\text{Eq. 4.4})$$

onde ΔS é a variação do armazenamento dentro do sistema.

Em uma escala regional ΔS é a variação do armazenamento dentro do sistema. Considerando que não há variação do armazenamento, ou seja, o volume de água que entra é igual ao volume de água que sai do sistema, dada as incertezas quanto às variações de longo termo da evapotranspiração, considerou-se como pouco significativo. Assim, a equação anterior pode ser simplificada para:

$$P = ETR + ES + I$$

Então $I = P - ETR - ES$ (Eq. 4.5)

A recarga do sistema subterrâneo da bacia seria o valor equivalente a I, utilizando os valores de evapotranspiração real (ETR) obtidos no Balanço Hídrico Climatológico, os valores de escoamento superficial (ES) são obtidos pelo método Automatizado de Separação

de Hidrogramas, correspondente a porcentagem das vazões medidas em um intervalo de tempo dentro da bacia. P é referente à precipitação média na bacia toda, considerando os cálculos pelo Método de Isoietas.

- **Método da análise de curvas de recessão (Método de Maillet)**

Na análise de curvas de recessão de cursos d'água, em muitas situações, principalmente em regiões úmidas, a presença de rios e riachos perenes é indicativa de interações entre águas subterrâneas e as águas de superfície. Isto significa que parte da recarga natural do aquífero é restituída à rede hidrográfica. As variações das descargas superficiais com o tempo, registradas nos períodos de estiagem, conhecidas com curvas de recessão (FEITOSA *et al.* 2008).

A análise de curvas de recessão inicia pela confecção de hidrogramas em gráficos *semilog*. As curvas obtidas em cada ciclo de recessão do hidrograma obedecem à fórmula exponencial de Maillet (CUSTODIO & LAMAS 1983):

$$Q = Q_0 e^{-\alpha(t-t_0)} \quad (\text{Eq. 4.6})$$

sendo, α a constante característica chamada coeficiente de restituição ou recessão [1/T], Q_0 a descarga inicial de recessão, correspondente ao instante em que o armazenamento no aquífero tem o seu máximo valor [L^3/T], e $t-t_0 = \Delta t$ o intervalo de tempo [T] entre as descargas $Q = Q(t_0)$ e $Q = Q(t)$.

Para obter o volume restituído (em m^3), que representa os recursos renováveis, a equação usada é a seguinte:

$$V = \frac{86400 * Q_0}{\alpha} \quad (\text{Eq. 4.7})$$

O coeficiente de recessão α é geralmente estimado a partir da curva de depleção na qual o tempo é expresso em dias e a descarga em m^3/s . Assim α tem dimensão de [L/dia].

- **Método de Meyboom**

O método de Meyboom (1961) é um método simples para estimar a recarga em uma bacia. Este método assume que não há a presença de barragens ou outros fatores que regulem a vazão dos rios. Ao eixo da vazão é atribuída uma escala logarítmica. Inicia-se quando o nível do rio declina para um valor inferior ao lençol freático adjacente e se encerra quando o primeiro evento de inundação ocorre.

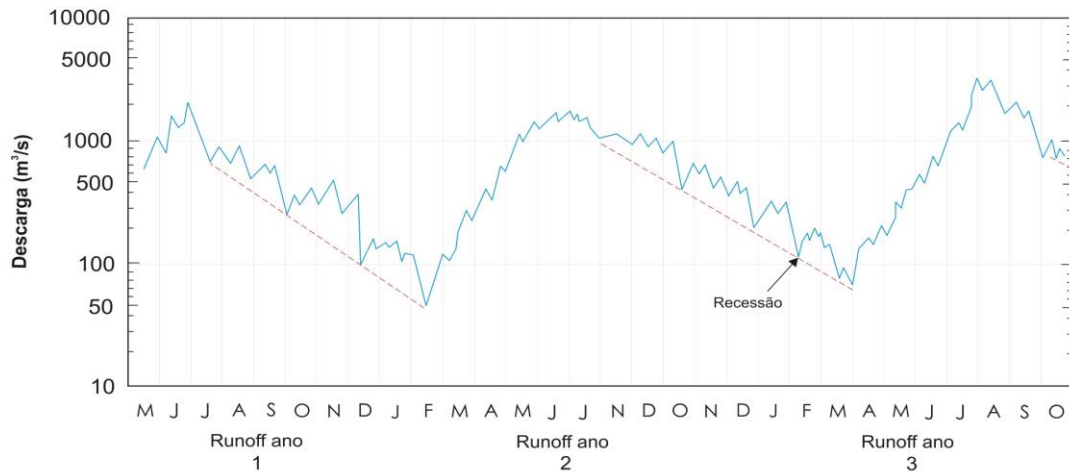


Figura 4.2: Exemplo de hidrograma *semilog*

- Volume potencial total de água descarregada pelo aquífero:

$$V_{tp} = \frac{Q_0 t_1}{2,3026} \quad \text{Eq. 4.8}$$

Onde:

V_{tp} é o potencial volume de água subterrânea descarregada (L^3)

Q_0 é o fluxo de base no início da recessão (L^3/T)

t_1 é o tempo para que o fluxo de base decline para $0,1 * Q_0$ (T)

- Volume de água remanescente:

$$V_t = \frac{V_{tp}}{10^{(t/t_1)}} \quad \text{Eq. 4.9}$$

Onde: t é período de recessão

O princípio para o cálculo da recarga de um aquífero utilizando-se o método de Meyboom, também conhecido como método de recessão sazonal (*Seasonal Recession Method – SRM*), consiste na plotagem das vazões médias diárias em gráfico *semilog* de um período representativo de 2 anos ou mais. Considera-se que a descarga de um rio durante um grande período de recessão será inteiramente devido à contribuição da água subterrânea. Dessa forma, a recarga total de água subterrânea é calculada utilizando o volume total potencial de água subterrânea no início da recessão (V_{tp}) menos o volume de descarga potencial de água subterrânea (V_t) deixada no fim da recessão. Sendo que Q_0 corresponde ao fluxo de base no início da recessão e t_1 é o tempo que leva o fluxo de base ir de Q_0 a $0,1Q_0$.

4.3. Caracterização Hidroquímica

A caracterização qualitativa das águas subterrâneas é um aspecto tão importante quanto sua quantidade em termos de gestão de recursos hídricos. Diversos fatores modificadores influem na característica química das águas subterrâneas tais como, composição mineralógica das rochas, condições climáticas, qualidade da água de recarga, tempo de residência, distancia de percolação, grau de areação e permeabilidade, que são inerentes ao meio, ou atividades antrópicas associadas etc. Sendo assim, cada sistema aquífero desenvolve características particulares que permitem diferenciá-los quimicamente.

Em terrenos hidrogeológicos de grande heterogeneidade e anisotropia, em que se somam os fatores primários, relativos aos ambientes de formação das sequências sedimentares, aos aspectos secundários, derivados da evolução tectono-metamórfica e de processos de alteração meteórica, prevê-se que a hidrogeoquímica reflita em parte essa complexidade (MOURÃO, 2007).

A campanha para reconhecimento e determinação dos poços que integrariam a rede de amostragem de água subterrânea foi realizada em março de 2011, cujo reconhecimento em campo foi de 40 poços tubulares (Tabela 7.28). A primeira amostragem de água subterrânea resultou em 40 análises químicas, que se realizou em março de 2011, relativo ao fim da estação chuvosa. A segunda amostragem foi realizada entre agosto e setembro de 2011, relativo ao fim da estação seca, e resultou em 36 análises químicas, devido a impossibilidade de coleta em 4 pontos amostrados anteriormente. Foram utilizadas as amostras da última campanha, realizada entre março e abril de 2011. Algumas amostras perdidas (por quebras de vasilhames e derramamento) durante a análise foram substituídas por amostras da campanha anterior, realizada em outubro de 2010.

A avaliação e tratamento dos dados mostraram que, salvo alguns poucos casos, não há variações químicas expressivas entre as amostras dessas duas campanhas coletadas em períodos sazonais distintos. Dessa forma, para a caracterização hidroquímica da bacia do rio Verde Grande, foram utilizadas as análises da última amostragem, preenchendo os 4 pontos perdidos na última amostragem, com os dados da análise da primeira campanha de amostragem.

As técnicas de coleta e preservação das amostras hídricas seguiram especificações da NBR 9896, da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, ou, na sua ausência, as Normas do *Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater* APHA-

AWWA-WPCF. Utilizaram-se equipamentos instalados nos poços para a coleta. Antes da realização da mesma, o poço foi bombeado para permitir a renovação de sua água.

A coleta de água foi realizada diretamente do poço tubular, ou o mais próximo possível do mesmo, antes da tubulação atingir o reservatório, quando existente, por meio de frascos limpos e desinfetados fornecidos pelo laboratório do CETEC, responsável pela realização das análises laboratoriais. O transporte das amostras seguiu a recomendação de preservação por meio da refrigeração até 4°C em caixas térmicas, e entregues ao laboratório no prazo máximo de 24hs.

Para a medição de níveis estáticos da água presente nos poços e cisternas, utilizou-se um Medidor de Nível Elétrico. A nivelção da base do poço foi realizada com o auxílio do GPS geodésico, podendo obter, assim, a altitude do nível d'água.

Os parâmetros analisados *in loco* e em laboratório foram: Condutividade Elétrica, pH, temperatura da água, Eh e sólidos totais dissolvidos (STD). Para os parâmetros testados *in loco* foi utilizada uma sonda multiparamétrica portátil com sensores internos da marca HACH modelo MP-6p (Figura 4.3). Os demais parâmetros foram analisados em laboratório.



Figura 4.3: Sonda multiparamétrica utilizada.

Fonte: Foto tirada em campo (12/03/2011).

As análises laboratoriais foram realizadas no laboratório do CETEC (Fundação Centro de Tecnológico do Estado de Minas Gerais) e atenderam às normas aprovadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e na sua ausência, aos métodos indicados no *Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater APHA AWWA-WPCH*.

Na Tabela 4.1 são apresentados os métodos analíticos e seus respectivos limites de detecção para os parâmetros físico-químicos e microbiológicos monitorados.

Tabela 4.1: Métodos de Ensaio, Referência e Limite de Detecção.

| Ensaio | Tipo de ensaio | Referência | Limite de detecção (mg/L) |
|------------------------|--|--|----------------------------------|
| Agrotóxicos | Cromatografia a gás | APHA 2320 B | Diversos |
| Alcalinidade | Potenciometria | APHA 2320 B | 1,0 |
| Alumínio Total | Espectrometria de AA -Plasma | APHA 3120 B | 0,1 |
| Bário | Espectrometria de AA -Plasma | APHA 3120 B | 0,005 |
| Cádmio | Espectrometria de AA -Forno de Grafite | APHA 3113 B | 0,0005 |
| Cálcio | Espectrometria de AA -Plasma | APHA 3120 B | 0,05 |
| Chumbo | Espectrometria de AA -Forno de Grafite | APHA 3113 B | 0,005 |
| Cloreto | Espectrofotometria | USGS -I -1187 78 | 0,30 |
| Cobre | Espectrometria de AA -Plasma | APHA 3120 B | 0,004 |
| Coliformes Fecais | Tubos Múltiplos | APHA 9221 E | 2 |
| Condutividade Elétrica | Condutimetria | APHA 2510 B | 0,1 |
| Cor Real | Colorimetria | APHA 2120 B | 5 |
| Dureza cálcio | Titulometria | APHA 3500 | 1,0 |
| Dureza magnésio | Titulometria | APHA 3500 | 1,0 |
| Dureza de Total | Titulometria | APHA 3500 | 1,0 |
| Estreptococos | Tubos Múltiplos | APHA 9230 B | 2 |
| Ferro Solúvel | Espectrometria de AA -Plasma | APHA 3120 B | 0,03 |
| Ferro Total | Espectrometria de AA -Plasma | APHA 3120 B | 0,03 |
| Fósforo | Espectrofotometria | APHA 4500-P C | 0,01 |
| Índice de Fenóis | Espectrofotometria | ABNT NBR 10740/1989 | 0,001 |
| Manganês | Espectrometria de AA -Plasma | APHA 3120 B | 0,003 |
| Mercúrio | Espectrometria de AA -Vapor Frio | APHA 3112 B | 0,0002 |
| Amônia | Espectrofotometria | ABNT NBR 10560/1988 | 0,1 |
| Arsênio | Espectrofotometria de Absorção Atômica | APHA 3120 B | 0,5 |
| Nitrato | Espectrofotometria | APHA 4500-NO ₃ ⁻ - E | 0,01 |
| Nitrito | Espectrofotometria | ABNT NBR 12619 | 0,001 |

| | | | |
|-------------------------|------------------------------|--|-------|
| Oxigênio Dissolvido | Tímulometria | ABNT NBR 10559/1988 | 0,5 |
| pH | Potenciometria | APHA 5520 B | 0,1 |
| Sódio | Espectrometria de AA -Plasma | APHA 3120 B | 0,05 |
| Sólidos Dissolvidos | Gravimetria | ABNT NBR 10664/1989 | 1 |
| Sólidos em Suspensão | Gravimetria | ABNT NBR 10664/1989 | 1 |
| Sulfatos | Turbidimetria | APHA 4500 SO ₄ ²⁻ -E | 1,0 |
| Temperatura da Água /Ar | Termometria | APHA 2550 B | 0,1 |
| Turbidez | Turbidimetria | APHA 2130 B | 0,1 |
| Molibidênio | Espectrometria de AA -Plasma | APHA 3120 B | 0,04 |
| Selênio e Lítio | Espectrometria de AA -Plasma | APHA 3120 B | 0,001 |
| Vanádio, Zinco | Espectrometria de AA -Plasma | APHA 3120 B | 0,01 |

4.3.1. Tratamento dos dados

A maioria das substâncias dissolvidas nas águas se encontra em estado iônico. As características físico-químicas das águas subterrâneas relacionam-se basicamente com a concentração de íons maiores nas águas, como o cloreto (Cl⁻), o sulfato (SO₄²⁻), o bicarbonato (HCO₃⁻), o sódio (Na⁺), o cálcio (Ca²⁺) e o magnésio (Mg²⁺).

Os íons presentes em quantidades pequenas, normalmente menores que 1% do conteúdo iônico, são denominados íons menores, e os mais importantes são o Nitrato (NO₃), o carbonato (CO₃²⁻), potássio (K⁺), ferro (Fe²⁺), fluoreto (F⁻) e amônia (NH₄⁺). No estado coloidal, têm-se os ácidos e os ânions derivados da sílica (SiO₂), como substâncias pouco ionizadas. Na fração gasosa, consideram-se como fundamentais o gás anídrico carbônico (CO₂) e o oxigênio dissolvido (O₂), sendo este pouco frequente em água subterrânea (CUSTODIO & LLAMAS, 1983).

Com os resultados das 40 amostras analisadas para 60 parâmetros, dentre físico-químicos, metais e bacteriológicos, elaborou-se uma planilha no programa Excel. Não foram incluídos na caracterização das águas os elementos que apresentaram, para quase todas ou todas as amostras, valores abaixo do limite de detecção de modo que, para o tratamento estatístico foram considerados os seguintes cátions e ânions: Al, B³⁺, Ba²⁺, Cu, Fe²⁺, Li⁺, Mn²⁺, Sr²⁺, Zn²⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, SiO₂, F⁻, Cl⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻ e CO₃²⁻, Se e V. Apesar das análises dos agrotóxicos terem sido realizadas, esses parâmetros não foram tratados nesse estudo devido a não detecção de nenhum deles em nenhuma campanha realizada.

Numa análise hidroquímica completa, a concentração total dos íons positivos (cátions) deve ser aproximadamente igual à concentração total dos íons negativos (ânions). O desvio percentual desta igualdade é determinado pelo coeficiente de erro do balanço iônico da análise (e%).

Para o cálculo do balanço iônico e do coeficiente de erro das análises hidroquímicas utilizou-se o método de Logan (1965). Segundo este autor o erro prático é calculado da seguinte forma:

$$\text{Erro prático: } E_p (\%) = \frac{I(r\Sigma_n - r\Sigma_p)}{I(r\Sigma_p + r\Sigma_n)} \times 100 \quad (\text{Eq. 4.10})$$

onde: $r\Sigma_n$: concentração total de ânions em meq/L; $r\Sigma_p$: concentração total de cátions em meq/L;

O erro teórico é o erro prático máximo permitido levando em consideração a somatória de ânions ou cátions de acordo com a relação apresentada a seguir:

| | | | | | | | |
|----------------------------------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|
| Σ_n ou Σ_p (meq/L) | < 1,0 | 1,00 | 2,00 | 6,00 | 10,00 | 30,00 | >30 |
| E_p (%) | 15,00 | 10,00 | 6,00 | 4,00 | 3,00 | 2,00 | 1,00 |

Outra forma de validação de resultados consiste na comparação entre o valor de sólidos dissolvidos totais (STD) medidos e o valor obtido pelo seu cálculo. Os sólidos totais dissolvidos em uma amostra de água são calculados através da soma das concentrações expressas em *mg/L* dos constituintes, como segue abaixo (CLESCERI *et al.* 2005):

$$\text{STD} = 0,6 \times (\text{alcalinidade}) + \text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{SiO}_3^{2-} + \text{NO}_3^- + \text{F}^- \quad (\text{Eq. 4.11})$$

A concentração medida de sólidos dissolvidos totais deve ser mais alta que a concentração calculada, já que algum constituinte de contribuição significativa pode não estar incluído no cálculo. Se o valor medido é menor que o calculado, a soma de íons mais elevada (cátions ou ânions), bem como o valor medido de STD, são considerados suspeitos, indicando a necessidade de nova análise da amostra. Por outro lado, se a concentração medida de sólidos é superior em 20% ou mais que a calculada, o resultado da soma mais baixa de íons é suspeito, e os constituintes selecionados devem ser analisados novamente. A inequação abaixo apresenta a aceitabilidade para o teste de STD, segundo Clesceri *et al.* (2005):

$$1,0 < \frac{\text{STD medidos}}{\text{STD calculados}} < 1,2 \quad (\text{Eq.4.12})$$

Um teste adicional que pode ser aplicado às análises envolve o cálculo da condutividade. Clesceri *et al.* (2005) sugere que se a condutividade elétrica calculada for superior à medida, deve-se reavaliar a soma de íons mais elevada (cátions ou ânions). No caso contrário, se a condutividade calculada for menor do que a medida, a soma mais baixa de íons deve ser analisada novamente. O critério de aceitabilidade, baseado na razão entre a condutividade calculada e medida é:

$$0,9 < \frac{\text{Condutividade medidos}}{\text{Condutividade calculados}} < 1,1 \quad (\text{Eq. 4.13})$$

No caso das amostras que se mostraram muito acima dos erros exemplificados acima, foi utilizada a ferramenta do programa AquaChem 3.7 para diminuição do erro do balanço iônico, por meio da correção do íon bicarbonato relacionada com a concentração de sólidos totais dissolvidos de cada amostra. Optou-se por manter as amostras com coeficiente de erro de até 5% após a correção realizada pelo programa.

A representação gráfica foi usada para a classificação da tipologia química da água e para verificar a abundância relativa dos elementos maiores. É um método rápido de avaliar a evolução química da água, indicando diferenças e similaridades entre amostras ou processos e reações químicas. Contudo o tratamento das diferentes populações de amostras relacionadas a distintas origens ou fácies minerais exige a aplicação de métodos estatísticos. Os diagramas de Piper (1944), Stiff (1951) e Schoeller (1962) ilustram características das águas associadas a diferentes tipos litológicos. Para a execução dos diagramas utilizou-se o software Aquachem 3.7 (WATERLOO HYDROGEOLOGIC, 2003).

A classificação hidroquímica das águas subterrâneas é feita com base nas espécies mais abundantes – Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- e CO_3^{2-} que representam mais de 99% dos sólidos dissolvidos em águas subterrâneas.

Utilizou-se o diagrama de Piper para classificar por fácies químicas e comparar distintos tipos de águas quanto aos íons dominantes. No estudo foi utilizado para determinar a fácies predominantes em cada domínio hidrogeológico estudado.

O diagrama de Schoeller (CUSTODIO & LLAMAS, 1983) é uma classificação proposta em 1955 que se utiliza dos valores absolutos das concentrações dos íons Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Mg^+ , Ca^{2+} e $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ dispostos em um gráfico de concentrações miliequivalentes por litro. A classificação em si é bem complicada, atribuindo símbolos a cada valor de concentração do

íon, mas graficamente é útil na comparação dos valores em meq/L de várias amostras entre si. Foi utilizado para demonstrar os íons predominantes de cada domínio hidrogeológico estudado.

Foi utilizado na representação dos dados estatísticos das análises químicas o diagrama de Box-Whisker, mais conhecido como diagrama Box-plot. Foram plotados nesses diagramas valores médios, medianas, intervalo de ocorrência de 25-75% dos parâmetros e mínimos e máximos.

- Comportamento espacial Íons Principais

Para observar a distribuição das concentrações dos íons maiores nas águas subterrâneas da bacia do rio Verde Grande, foram confeccionados mapas em ambiente GIS utilizando os valores de análise química interpolados pelo inverso do quadrado da distância.

O diagrama de Stiff (1951) pode ser usado juntamente com mapas hidrogeológicos e representa quais íons estão em maiores concentrações formando figuras geométricas distorcidas. São muito úteis para a análise de dados distribuídos espacialmente. Facilmente detectam-se águas de mesma família (homogêneas). Foram utilizados para demonstrar a distribuição espacial em mapa dos tipos hidroquímicos na bacia.

O estudo de relações iônicas, também chamado de índice hidrogeoquímico é muito importante para a classificação e interpretação hidrogeoquímica das águas subterrâneas. Alguns valores estudados por Hem (1985) são característicos de ambientes hidroquímicos (Tabela 4.2). Foram utilizadas essas relações iônicas nesse estudo para determinar a origem de zonas de recarga, onde ocorre salinização das águas, predominância de fácies química e correspondência com os tipos litológicos das águas em circulação. Foram interpolados os valores dessas relações iônicas para demonstrar e correlacionar a distribuição espacial dessas concentrações com o clima e a geologia.

Tabela 4.2: Principais razões iônicas e seus significados.

| Relação Iônica | Variações Teóricas | Significado |
|----------------------|--------------------|--|
| rMg^{+2}/rCa^{+2} | 0,25-0,33 | -água de circulação em rocha de composição Granítica |
| | 0,33-1,5 | -águas continentais |
| | >0,9 | -contato com água do mar ou fluxo através de rocha básica; possível influência de terrenos dolomíticos |
| | >1 | -relações com litotipos ricos em silicatos magnesianos |
| | ±5 | -água do mar |
| rSO_4^{-2}/rCl^{-} | > 2,75 | - Em águas meteóricas |
| rNa^{+}/rCl^{-} | <0,0876 | -água do mar - substituição de Na^{+} por Ca^{+2} e Mg^{+2} |
| | <0,7 | -precipitação de sais de Na^{+} |
| | >0,7 | -fluxo através de rochas cristalinas ou vulcânicas |
| $rCl^{-}/rHCO_3^{-}$ | 0,5 | -fluxo normal para rochas cristalinas |
| | 0,1-0,5 | -águas continentais |
| | 20-50 | -água do mar |

Em virtude da diversidade de tipos de águas que poderiam aparecer, foi efetuado um agrupamento de amostras semelhantes utilizando-se do diagrama de Chadha (1999). O diagrama é baseado na construção de um gráfico, em que os valores plotados no eixo X correspondem à diferença em miliequivalentes entre as terras alcalinas e os metais alcalinos, e no eixo Y se coloca a diferença (também em miliequivalentes) entre ânions fracos e ânions fortes. As diferenças entre ambas coordenadas se transladam para o campo do diagrama que define o caráter global de uma água. O Diagrama original de Chadha (Figura 4.4) é representado em porcentagem equivalente, mas nesse estudo será modificado para se manter os valores absolutos em meq/L nos eixos do diagrama.

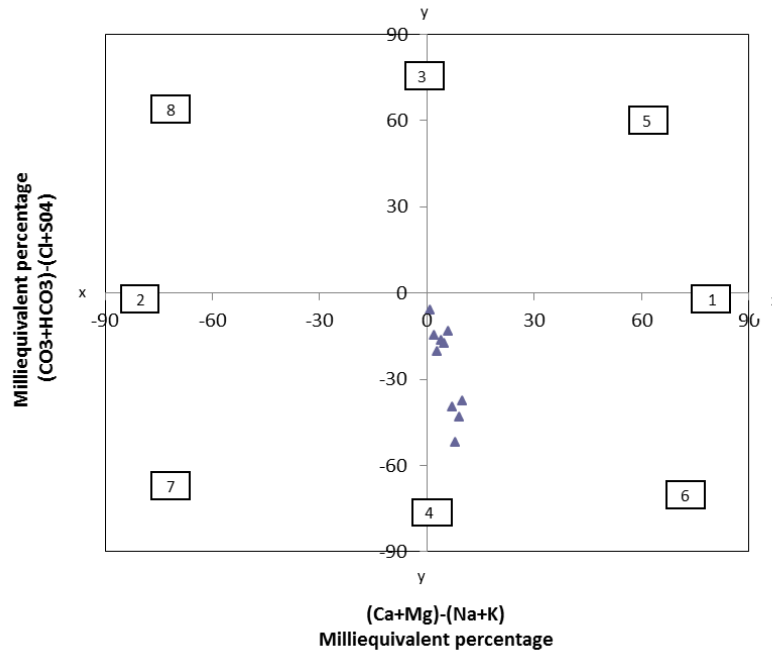


Figura 4.4: Diagrama de Chadha (1999)

Na Figura 4.4, observam-se regiões numeradas que significam alguns parâmetros geoquímicos e hidroquímicos das águas subterrâneas, que são:

- 1- Alcalinos terrosos excedem metais alcalinos
- 2- Metais alcalinos excedem alcalinos terrosos
- 3- Ânions ácidos fracos excedem ânions ácidos fortes
- 4- Ânions ácidos fortes excedem ânions ácidos fracos
- 5- Ca^{2+} - Mg^{2+} - HCO_3^- - tipo de água com dureza temporária
- 6- Ca^{2+} - Mg^{2+} - Cl^- - tipo de água com dureza permanente
- 7- Na^+ - Cl^- - tipo de água com problemas de salinidade tanto para usos domésticos e irrigação
- 8- Na^+ - HCO_3^- - Tipo de água que causa muitos problemas no uso doméstico

Chama-se "índice de troca de íons ou bases", proposta por SCHOELLER (1962), a relação entre os íons trocados e os íons de mesma natureza que existiam primitivamente. Existem 3 formas de obter índice de troca de bases (itb):

$$itb_1 = r(Ca^{+2} + Mg^{+2}) - rHCO_3^-$$

$$itb_2 = \frac{rCl^- - r(Na^+ + K^+)}{rCl^-}$$

$$itb_3 = \frac{rCl^- - r(Na^+ + K^+)}{r(SO_4^{+2} + HCO_3^- + NO_3^-)}$$

(Eq. 4.14)

As águas que circulam em rochas cristalinas alteradas têm i.t.b. negativo porque entra mais metal alcalino que Cl^- em solução. Quando o terreno fornece os metais alcalinos o i.t.b. é negativo. Quando a água fornece os metais alcalinos o i.t.b. é positivo. Estas relações são úteis na complementação da determinação de velocidade de circulação da água e foram utilizados nesse estudo para determinar as proporções de trocas de bases que podem ocorrer dentro dos domínios aquíferos estudados.

Se admitirmos que na água exista primitivamente tanto $r\text{Cl}^-$ como $r\text{Na}^+ + r\text{K}^+$ e que foram trocados os $r\text{Na}^+ + r\text{K}^+$ contra os metais alcalino-terrosos, então é o itb 2, o que significa a troca de metais alcalinos da água por metais alcalino-terrosos da rocha. Para a composição inicial de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} = \text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{NO}_3^-$ usa-se o itb 3, que significa que os metais alcalino-terrosos da água foram trocados por metais alcalinos da rocha.

Para a análise dos índices de saturação mineral (IS) o valor igual à zero indica que a solução está em equilíbrio com o mineral, e valores menores ou maiores que zero indicam, respectivamente, subsaturação ou sobressaturação. Como ressaltado por Appelo e Postma (1994), raramente a água subterrânea encontra-se em equilíbrio químico e, portanto, o índice de saturação deve ser compreendido como um indicativo da direção do processo reativo, ou seja, para a subsaturação a dissolução é esperada, enquanto que a sobressaturação sugere precipitação.

Foram calculados também Índices de saturação para as amostras referentes à calcita, dolomita, gipsita e fluorita, obtidos a partir do programa PHREEQC, modulado ao programa AquaChem 3.7 e de forma a determinar a predominância em solução de minerais mais abundantes. O índice de saturação é definido como a diferença entre o logaritmo do produto da atividade dos íons na água ($\log\text{PAI}$) e o logaritmo da constante de solubilidade do mineral em equilíbrio ($\log\text{K}$), tal que:

$$\text{IS} = \log(\text{PAI} / \text{K}) \quad (\text{Eq. 4.15})$$

Onde:

IS = Índice de saturação;

PAI = Produto da atividade do íon;

K= constante de solubilidade do mineral.

- Usos das águas subterrâneas

Para a avaliação da qualidade da água subterrânea em relação aos seus usos, foi definido como critério de avaliação para Consumo Humano, os valores de concentrações de parâmetros físico-químicos estabelecidos pela Portaria do Ministério da Saúde n° 518 de 2004 (BRASIL, 2004).

O potencial das águas subterrâneas para irrigação foi avaliado conforme definido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (RICHARDS, 1954), o *United State Salinity Laboratory* – USSL baseados na razão de adsorção de sódio (RAS, ou SAR em inglês) e na condutividade elétrica da água (C.E.) utilizada para caracterizar o perigo de salinização do solo. O RAS indica a porcentagem de sódio contido numa água que pode ser adsorvido pelo solo, enquanto que a condutividade elétrica é associada à salinidade das águas, conforme equação 2. Por essa classificação, quanto maior RAS menos a água é apropriada para a irrigação. As classes S1, S2, S3 e S4 representam baixo a alto risco de sódio e, analogamente as classes C1, C2, C3 e C4 representam baixa a alta salinidade. As águas que representam condições ideais para irrigação são da classe C1-S1 e as de pior qualidade são do tipo C4-S4.

$$RAS^{\circ} = \frac{Na}{\sqrt{\frac{(Ca^{\circ} + Mg)}{2}}} \quad (4.16)$$

Sendo:

Na⁺ - Concentração de sódio na água, em mmol/L;

Ca^o - Concentração de cálcio na água, corrigida pela relação HCO₃⁻/Ca (mmol/L) e C.E. (dS/m);

Mg²⁺ - Concentração de Magnésio na água, em mmol/L.

Para tratamento dos dados amostrados, o programa Qualigraf, desenvolvido pela FUNCEME, foi utilizado para cálculo e plotagem dos dados em gráfico diagrama.

5. GEOLOGIA REGIONAL

A bacia do rio Verde Grande está inserida nos domínios do Cráton do São Francisco (CSF), entidade tectônica do Ciclo Brasileiro (ALMEIDA, 1977), ou seja, é uma das porções da Plataforma Sul-americana que não foram envolvidas nos processos orogênicos durante o Neoproterozóico (ALKMIM & MARTINS-NETO, 2001). O CSF e os demais núcleos cratônicos da Plataforma Sul-americana representam porções interiores e relativamente estáveis de paleoplacas continentais que, aglutinadas ao final do Proterozóico, vieram a constituir a parte ocidental do supercontinente de Gondwana (ALKMIM & MARTINS-NETO, 2001).

As principais unidades supracrustais do Cráton do São Francisco são o Supergrupo Espinhaço de idade paleo/mesoproterozóica e unidades correlatas, o Supergrupo São Francisco de idade neoproterozóica, o Grupo Santa Fé de idade permocarbonífera, além dos Grupos Areado, Mata da Corda e Urucuia, de idade cretácea (ALKMIM & MARTINS-NETO, 2001).

Os limites do cráton são definidos pelos cinturões orogênicos neoproterozóicos que possuem vergência para o interior do cráton. Estes cinturões são denominados da seguinte forma: a leste, Cinturão Araçuaí; a oeste e sul, a Faixa Brasília; a noroeste a Faixa Rio Preto e, a norte, as Faixas Riacho do Pontal e Sergipana (Figura 5.1).

As unidades pré-cambrianas da bacia sanfranciscana foram atingidas pelas frentes orogênicas brasileiras. Formaram-se, ao longo dos seus limites, excetuando-se o sul, cinturões epidérmicos de antepaís, cuja vergência é centrípeta em relação ao cráton (ALKMIM *et al.*, 1996) (Figura 5.1). Caracterizam-se, desta forma, três compartimentos estruturais na bacia: i) um compartimento oeste (W), que corresponde à porção externa das faixas Brasília e Rio Preto; ii) um compartimento central (C) no qual os sedimentos do Supergrupo São Francisco encontram-se indeformados; iii) um compartimento leste (E), que corresponde à porção externa da Faixa Araçuaí.

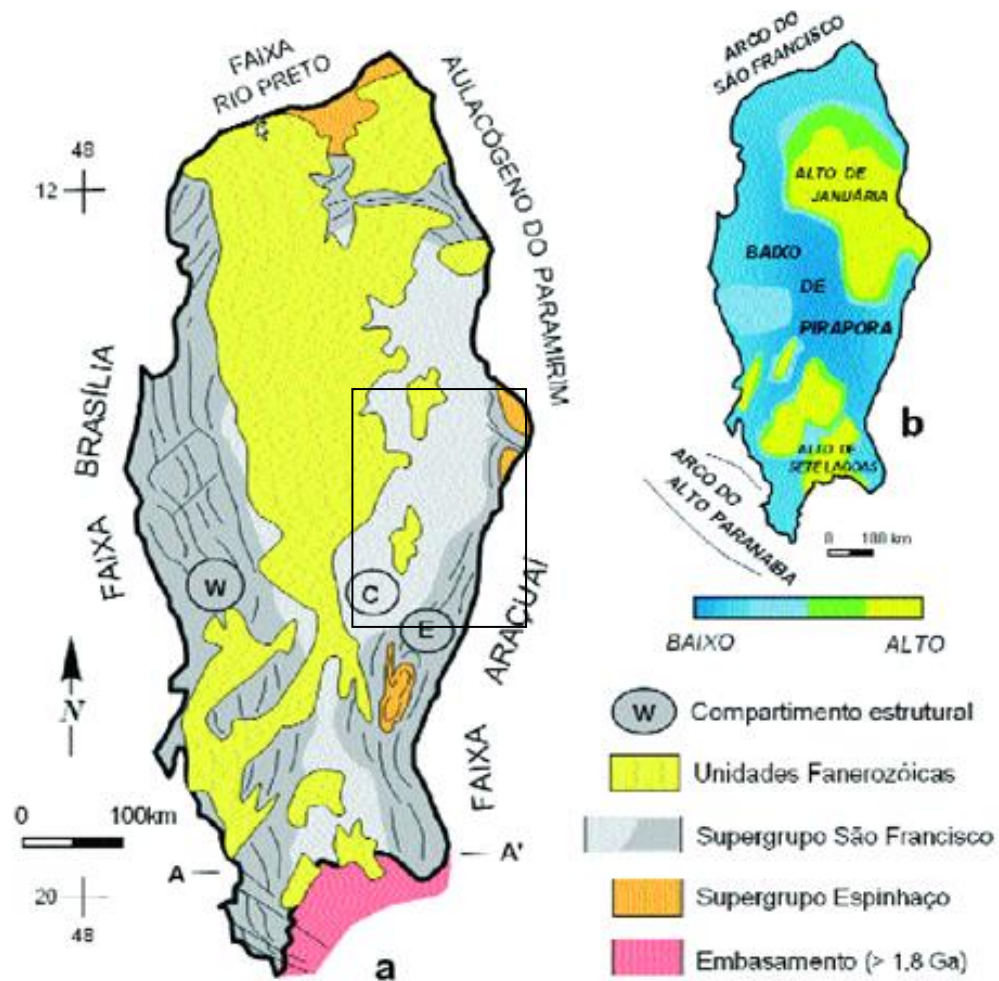


Figura 5.1: Mapa esquemático das principais feições estruturais do embasamento da bacia SF, com indicação da localização da bacia do rio verde Grande.

Fonte: Modificado de Alkmim & Martins-Neto, 2001.

Os cinturões de antepaís dos compartimentos W e E, tipicamente formados por uma associação de falhas de empurrão e dobras, envolvem somente as unidades pré-cambrianas da cobertura. Este seu caráter epidérmico é comprovado pelas muitas exposições do descolamento basal na porção sudeste do compartimento E (MAGALHÃES 1988, D'ARRIGO 1995), e pela sísmica, como mostram Fugita & Clark Fo (2001), para o compartimento W. Os cinturões de antepaís dos compartimentos W e E exibem diferenças significativas. Dentre as mais importantes têm-se a ausência de metamorfismo e clivagem penetrativa no compartimento W. Além disso, zonas transcorrentes desempenham um papel importante neste compartimento.

5.1. Compartimento Oeste (W - Faixa Brasília e Rio Preto)

Este compartimento representa um cinturão de dobramentos e cavalgamentos de antepaís (ALKMIM & MARTINS-NETO, 2001) subdividido em dois segmentos, sul e norte, com arcabouços estruturais e história tectônica distintos. O segmento sul foi acomodado na forma de dobras, falhas de empurrão e falhas transcorrentes, sendo que estas se orientam preferencialmente segundo NNE – SSW e vergem para direção N60°W que também afetam o embasamento na porção sul do cráton e datam tardiamente do Evento Brasileiro, por produzir uma rotação anti-horária de dobras e falhas originalmente orientadas NNE – SSW. As estruturas dominantes do segmento norte do Compartimento Oeste formam um típico cinturão epidérmico de antepaís, envolvendo dobras de todas as escalas, falhas de empurrão e falhas transcorrentes dextrais de orientação NE – SW (DARDENNE 1978a; FONSECA & DARDENNE 1993).

A Faixa Rio Preto bordeja o Cráton do São Francisco em sua margem noroeste, na região limítrofe entre os estados da Bahia e Piauí. Nessa área, o Grupo Rio Preto aflora nas escarpas de regressão entre o Chapadão do Urucuia, a oeste, e a Planície do Rio São Francisco, a leste. Sua influência estrutural não é identificada na área de estudo da bacia rio do Verde Grande.

5.2. Compartimento Central (C)

As rochas que se encontram nesta porção pertencem exclusivamente ao Supergrupo São Francisco, sendo que a característica marcante é a deformação insignificativa das rochas (ALKMIM & MARTINS-NETO, 2001). Os elementos estruturais presentes neste compartimento são influenciados pelo tectonismo dos cinturões orogênicos Araçuaí, a leste, e Brasília a oeste. Estas faixas provocaram esforços que geraram estruturas de vergências, preferencialmente, nas direções NE-SW (Faixa Brasília) e NW-SE (Faixa Araçuaí). Este mosaico estrutural gerou em cada tipo de litologia deformações próprias, que variam em função da composição das rochas e sua distância em relação ao evento tectônico. Assim, observam-se estruturas como dobras e falhas nas regiões de borda do cráton, sendo que nas regiões mais centrais as estruturas estão horizontalizadas, com descolamento basal das unidades, marcando uma deformação menos intensa em relação à zona periférica da bacia.

5.3. Compartimento Leste (E - porção externa a Faixa Araçuaí)

As rochas pertencentes a este compartimento estrutural fazem parte dos Supergrupos Espinhaço e São Francisco, os quais estão envolvidos em um cinturão epidérmico de antepaís, vergentes para oeste. Essa cobertura pré-cambriana é isolada estruturalmente em relação ao embasamento por um deslocamento basal. Nesta porção, o regime compressional da deformação gerou um metamorfismo de baixo grau nas regiões mais afastadas do limite do Cráton São Francisco e na fácies xisto verde junto a Cordilheira do Espinhaço, onde também é verificada a marcante presença de fluídos hidrotermais (ALKMIM & MARTINS-NETO, 2001).

5.4. Unidades litoestratigráficas

A área em estudo faz parte do Cráton São Francisco, sendo limitada a leste pela Serra do Espinhaço e a oeste pela Faixa Brasília. As rochas mais antigas ocorrem a leste, com sequências metavulcânicas e complexos granito-gnáissicos arqueanos, seguidos de suítes plutônicas ácidas e básicas, complexos graníticos e sienitóides do paleoproterozóico. Sequências metassedimentares compostas por metadiamicritos, quartzitos e filitos precedem as sequências paleomesoproterozóicas do Supergrupo Espinhaço. A parte central é formada basicamente por sequências neoproterozóicas de tilitos e conglomerados do Grupo Macaúbas e, principalmente, por rochas do Grupo Bambuí (calcários, dolomitos, arenitos, meta-pelitos e margas), capeadas na porção oeste pelos arenitos cretáceos do Grupo Urucuia, coberturas lateríticas do Cenozóico e depósitos aluvionares do Terciário/Quaternário.

Descreve-se a seguir as unidades litoestratigráficas ocorrentes na da bacia do rio Verde Grande de acordo com a cronoestratigrafia. A representação cartográfica dessas unidades consta do Mapa Geológico da bacia do rio Verde Grande, apresentado na escala 1:500.000 (Figura 5.2).

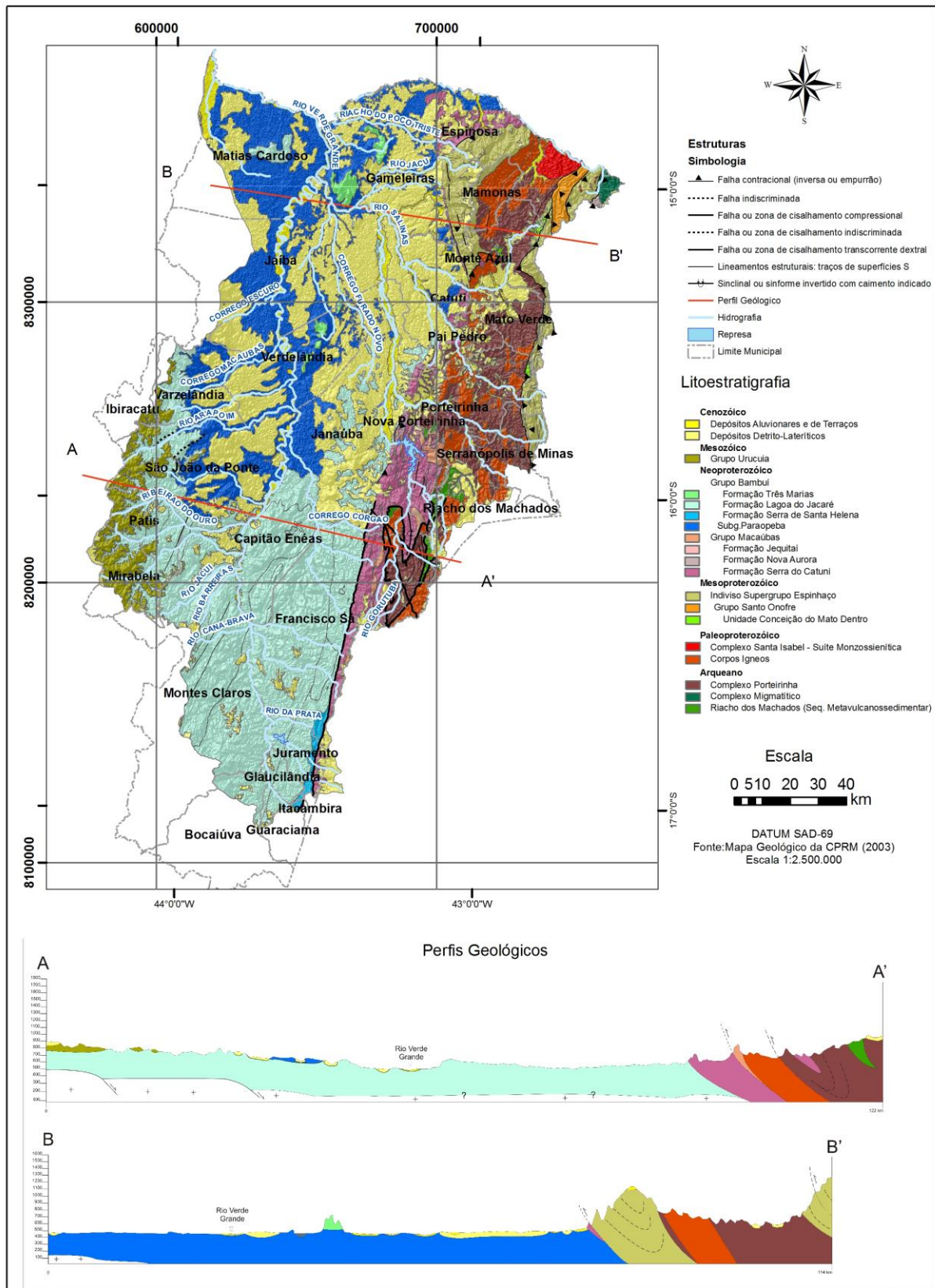


Figura 5.2: Mapa Geológico da bacia do Rio Verde Grande, MG – (A3)

Fonte: Mapa Geológico da CPRM, 2003.

5.4.1. Arqueano

O embasamento do cráton é constituído por rochas e traços tectônicos mais velhos que 1,8 Ga. Estudos recentes determinaram a discriminação de duas feições tectônicas no embasamento (ALKMIM 2004), sendo uma referente ao Cinturão Mineiro (TEIXEIRA *et al.* 1996), situado no extremo sul do cráton, abarcando o Quadrilátero Ferrífero e adjacências e outra ao norte do cráton, envolvendo parte do substrato do Aulacógeno do Paramirim.

Sequências Metavulcanossedimentares - Riacho dos Machados

A sequência metavulcanossedimentar de Riacho dos Machados está inserida em rochas da Faixa de Dobramentos Araçuaí, borda leste do Cráton São Francisco (LOBATO & PEDROSA-SOARES 1993). Esta sequência é composta por rochas máficas e ultramáficas, xistos aluminosos e por rochas quartzo feldspáticas, estas se destacando como hospedeiras de depósitos auríferos associados a zonas de cisalhamento dúcteis. Características texturais, mineralógicas e geoquímicas levam a sugerir um folhelho como protótipo da unidade de xistos aluminosos e para as rochas quartzo feldspáticas uma provável filiação vulcânica ácida (FONSECA & LOBATO 1991). A sequência Riacho dos Machados localiza-se nas proximidades do município homônimo, a leste da bacia do Rio Verde Grande.

Complexo Porteirinha

Ocupa a parte central da estrutura antiformal da Serra do Espinhaço na região do município de Serranópolis/MG, sendo flanqueado pelos metassedimentos dos Supergrupos Espinhaço e São Francisco. É composto por gnaisses bandados com composição predominantemente granodiorítica, localmente migmatizados, que contêm intercalações concordantes de anfíbolitos e de rochas metaultramáficas (serpentinó, clorita xisto e actinolita xisto). Os gnaisses bandados/migmatitos são injetados por plutons de composição granodiorítica, granítica e sienítica, sendo observadas texturas magmáticas bem preservadas nos gnaisses de composição granítica e sienítica.

Ocorre também sequência metavulcano-sedimentar constituída por xistos aluminosos, xistos quartzo-feldspáticos, anfíbolitos e metaultramáficas (NOCE *et al.* 2007). Essas rochas encontram-se na parte oriental da bacia, empurradas pelas sequências de quartzitos, estendendo-se direção norte-sul.

5.4.2. Paleoproterozóico

Complexo Santa Isabel

Este complexo ocorre ao longo de uma faixa norte-sul bordejando a Serra do Espinhaço Ocidental, sendo constituído por gnaisses e migmatitos com inclusões paleossomáticas de rochas básicas e ultrabásicas e bolsões neossomáticos de composição granítica e sienítica. Brito Neves *et al.* (1980) sugerem a interpretação do Complexo Santa Isabel como uma zona de raiz de um antigo greenstonebelt, metamorfozido ao final do Arqueano na fácies granulito. Este complexo encontra-se na parte nordeste da bacia do rio Verde Grande, próximo aos municípios de Espinosa, Mamonas e Monte Azul.

Corpos Ígneos

Esses corpos são rochas intrusivas do Paleoproterozóico até o início do Neoproterozóico, constituídos em sua maioria por rochas claras de composição granítica, gnaissificadas, localmente milonitizadas e foliadas, seguidas de monzogranitos até sienitos e granitóides porfiroclásticos milonitizados e rochas intrusivas básicas metamorfozadas (CPRM, 2007). São encontrados distribuídos na porção oriental da bacia nos municípios de Francisco Sá, passando por Porteirinha, Riacho dos Machados, Serranópolis de Minas, Mato Verde, Monte Azul, Mamonas, até o extremo norte de Espinosa.

5.4.3. Mesoproterozóico

Supergrupo Espinhaço

O nome Supergrupo Espinhaço é adotado para as sequências predominantemente quartzíticas que constituem a cordilheira homônima. O cinturão orogénico que contém a Serra do Espinhaço Meridional delimita o sudeste do Cráton do São Francisco e funde-se, para nordeste, com a Faixa Araçuaí. Trata-se de uma faixa orogênica que se destaca em relação às suas margens devido ao seu conjunto de rochas soergidas a 1,85 Ga (MACHADO *et al.*, 1989) e ao seu alinhamento estrutural na direção norte-sul.

O Supergrupo Espinhaço é dividido em dois segmentos geográficos relacionados com a sua geologia: a Serra do Espinhaço Meridional, que se estende por cerca de 300 km, desde o Quadrilátero Ferrífero até a região de Olhos (SCHOBENHAUS, 1996), e o Supergrupo Espinhaço Setentrional- MPses, com limite traçado ao longo do Orógeno Araçuaí, na região de Oliveira dos Brejinhos.

Supergrupo Espinhaço Meridional – MPsem

Este segmento é objeto de discussão por diversos autores. Pflug (1968) subdividiu o Supergrupo Espinhaço em oito formações, as quais foram reunidas nos Grupos Diamantina e

Conselheiro Mata (DUSSIN *et al.* 1984). Destes, apenas o Grupo Diamantina tem ocorrência individualizada na área em estudo, sendo descrito a seguir. Este grupo ocorre na parte oriental da bacia, a leste dos municípios Serranópolis de Minas e Mato Verde (Minas Gerais). Engloba as seguintes formações:

- Formação São João da Chapada (SCHÖL & FOGAÇA, 1979): sequência de metabrechas de quartzitos, metaconglomerados, filitos hematíticos e quartzitos de granulação média a grossa;
- Formação Sopa-Brumadinho (SCHÖLL & FOGAÇA, *op. cit.*): constituída por filitos, quartzitos micáceos, metaconglomerados polimíticos, intercalados com quartzitos de granulação grosseira;
- Formação Galho do Miguel (PFLUG, *op. cit.*): sequência monótona de quartzitos puros, de granulação fina a média.

Todo esse conjunto litoestratigráfico, metamorfozizado em fácies xisto verde, mostra um padrão de deformação bastante irregular, caracterizando uma sucessão de dobras assimétricas com eixo mergulhando para N-NNE e vergência para W, além de frequentes falhamentos E-W e N-S.

Supergrupo Espinhaço Setentrional- MPses

Este segmento é caracterizado por dois paleoambientes deposicionais, um continental e outro marinho de origem tafrogênica. Essas unidades são caracterizadas por rochas vulcânicas, sedimentares arenosas e pelíticas, além de rochas carbonáticas. A estratigrafia adotada segue a divisão em dois grupos: Grupo Oliveira dos Brejinhos, continental e Grupo Santo Onofre, passagem de continental para marinho (SCHOBENHAUS, 1996). Esse último grupo compreende sequências de quartzitos e filitos com raras lentes de calcários. Os filitos têm proporções variadas de hematita, grafita e mais raramente óxidos de manganês. É representado por uma faixa entre duas falhas de empurrão, situada no extremo nordeste da bacia do Rio Verde Grande.

5.4.4. Neoproterozóico

Supergrupo São Francisco

Conforme Pflug e Renger (1973), este supergrupo é constituído pelas seguintes sequências do Proterozóico Superior (Neoproterozóico): Formação Jequitá e Grupos

Macaúbas e Bambuí em Minas Gerais. O Supergrupo São Francisco recobre quase todo o segmento centro-sul do cráton homônimo, delimitando o que alguns autores denominam “Bacia Sedimentar do São Francisco” (MARTINS-NETO & PINTO, 2001).

Grupo Macaúbas

Essa unidade representa essencialmente um conjunto de rochas de origem glacial (metadiamicítos). Possui espessura variável, comumente da ordem de centenas de metros, sendo litologicamente caracterizado por metadiamicítos, geralmente maciços, com raras intercalações de quartzito e filito e quartzitos (NOCE *et al.*, 1997). As feições estruturais principais estão representadas por dobramentos abertos, assimétricos, com eixo variando de N10°W a N30°E e clivagem espaçada ou de crenulação segundo o plano axial. Também é observada crenulação N-S sub-horizontal.

A litologia do Grupo Macaúbas é representada por um conjunto de metassedimentos elásticos com ligeiro metamorfismo e deformações segundo a direção NNE, na região sul da bacia, com variações para NW na região norte desta. As rochas predominantes são paraconglomerados (diamictitos) apresentando cor cinza quando fresca e castanha a avermelhada, quando alteradas. Esses conglomerados têm matriz arcoseana de estrutura xistosa, onde os clastos são suportados pela matriz. Sua natureza polimítica exhibe clastos que variam de grânulos a matações de uma grande diversidade de rochas, sendo mais frequentes os de gnaisses e quartzitos; subordinadamente aparecem clastos de granitos, siltitos, calcários dolomíticos, argilitos, rochas básicas e xistos. Sob o ponto de vista estratigráfico, a sequência do Grupo Macaúbas se situa imediatamente abaixo do Grupo Bambuí, e com este compõe o denominado Supergrupo São Francisco, referido ao Pré-cambriano Superior.

Na área de estudo, na região sul da bacia do rio Verde Grande, as rochas do Macaúbas se assentam diretamente sobre o embasamento cristalino e seu contato superior, que normalmente se daria com rochas do Bambuí, acha-se invertido por falhamentos inversos, de modo que ao longo de toda a borda oeste dessa área de ocorrência encontram-se sobrepostas à sequência Bambuí. Nas exposições da região norte da bacia, as relações de contato são normais, isto é, se dão com rochas do Grupo Bambuí na capa e rochas do Grupo Macaúbas na lapa.

Ao Grupo Macaúbas foram atribuídas as designações proposta por Noce *et al.* (1993), sendo reconhecidas as formações Serra do Catuní e Nova Aurora para a região de estudo. A

região sudeste da bacia está marcada pela ocorrência da formação Serra do Catuní (metadiamicititos maciços com intercalações de quartzitos e filitos), enquanto que a ocorrência da formação Nova Aurora (metadiamicititos gradados ou não, com intercalações de quartzitos e raros filitos, VIVEIROS *et al.* 1979) está representada por uma pequena expressão no nordeste do município de Espinosa.

Grupo Bambuí

O Grupo Bambuí é caracterizado por uma sequência de rochas carbonáticas alternadas com terrígenos, possuindo ambiente de sedimentação exclusivamente marinho. A idade para o Grupo Bambuí ainda é discutida. Estudos de geoquímica isotópica fornecem idades de deposição, deformação e insipiente metamorfismo no intervalo compreendido entre 750 e 600 Ma (BABINSKI & KAUFMAN 2005). Representa associação de litofácies siliciclásticas e bioquímicas, na forma de sedimentos plataformais depositados em extenso mar epicontinental. Regionalmente, foram identificadas as formações clássicas do Grupo Bambuí, conforme definido no Projeto Radambrasil (1982), tendo por base, com modificações, a estratigrafia proposta por Branco & Costa (1961) e Dardenne (1978b). Na área, o Grupo Bambuí é constituído por duas (02) sucessões principais; a basal, marinha, composta da base para o topo, pelas formações Sete Lagoas (carbonática), Serra de Santa Helena (pelítico-carbonática), Lagoa do Jacaré (carbonática) e Serra da Saudade (pelítica), as quais compõem o Subgrupo Paraopeba; a sucessão de topo é marinho-continental e está representada pela Formação Três Marias, predominantemente psamítica.

Estruturalmente, este grupo apresenta uma baixa deformação relacionada ao evento brasileiro, gerando estruturas de vergência NE-SW, com camadas horizontais a sub-horizontais de 5° a 20° de inclinação. Para este estudo, utiliza-se a divisão estratigráfica proposta por Alkmim e Martins- Neto (2001), sendo a sequência Bambuí dividida nas seguintes formações, da base para o topo:

- Formação Sete Lagoas: A Formação Sete Lagoas (Branco & Costa 1961) representa a unidade basal do Grupo Bambuí na área, sendo constituída por uma sucessão carbonática composta por uma sucessão de calcários e dolomitos. Localmente, para o topo dessa unidade, aparecem níveis detríticos finos, representando contato gradual com os pelitos da formação superior. Não é individualizada na área de estudo e sim agrupada ao Subgrupo Paraopeba.

- Formação Serra de Santa Helena: definida por Branco e Costa (1961), é representada por uma sucessão monótona de ritmitos silto-argilosos cinza esverdeados com laminação plano-paralela, apresentando marcas onduladas de pequeno porte. Em sua porção basal, encontram-se intercalações métricas de margas ou calcários impuros. Afloram com maior expressão na parte sudoeste da bacia, nas proximidades dos municípios de São João da Ponte, Varzelândia e Patis;
- Formação Lagoa do Jacaré: Branco e Costa (1961) caracterizam-na como um pacote de intercalações cíclicas de calcarenitos oolíticos grossos com estratificação cruzada de médio porte e estruturas do tipo *hummochy*, calcarenitos impuros finos, siltitos calcíferos, calciruditos e doloruditos. Esta formação ocorre principalmente na parte sudoeste da bacia, a leste de Montes Claros e Capitão Enéas;
- Formação Serra da Saudade: A Formação Serra da Saudade (BRANCO & COSTA 1961, DARDENNE, 1978b) sobrepõe-se em contato concordante e gradacional à Formação Lagoa do Jacaré. Esta unidade é representada por conjunto predominantemente pelítico. A distribuição da Fm. Serra da Saudade na área é restrita, concentrando-se principalmente na margem direita do rio Verde Grande, próximo à cidade de Verdelândia, na encosta inferior da Serra do Jaíba, onde apresenta espessura de 100 m.
- Formação Três Marias: Schöll (1976) caracterizou esta formação como um conjunto de siltitos e arcóseos de cores verde a cinza esverdeado, sendo frequentes pequenas lentes de margas e calcários. Esta sequência não apresenta metamorfismo, em geral possui acamamento sub-horizontal, adquirindo forte inclinação quando afetada por falhamentos (LIMA 2005). Essa formação é pouco aflorante na bacia, ocorrendo a leste de Jaíba e nas proximidades da confluência dos rios Verde Grande e Gorutuba.

Subgrupo Paraopeba

Branco & Costa (1961) foram os primeiros que propuseram uma subdivisão litoestratigráfica para o Grupo Bambuí. Estes autores propuseram a subdivisão da “série Bambuí” em três formações: Carrancas (unidade basal), Sete Lagoas (unidade intermediária) e Rio Paraopeba (unidade superior). Esta última constituída de quatro membros, a saber: Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Três Marias e, finalmente, Serra da Saudade.

De acordo com Braun (1968), o Subgrupo Paraopeba na região de estudo é constituído por uma sequência basal, marinha, composta da base para o topo, pelas formações Sete Lagoas (carbonática), Serra de Santa Helena (pelítico-carbonática), Lagoa do Jacaré (carbonática) e Serra da Saudade (pelítica) O Subgrupo é apresentado indiviso em grandes extensões da bacia do rio Verde Grande, estendendo-se do curso médio do rio Verde Grande até a jusante em Matias Cardoso, extremo norte da bacia, ocupando quase 30% da área da bacia.

Litologicamente o Subgrupo Paraopeba é composto por rochas de baixo grau de metamorfismo, características de uma sedimentação cíclica. Siltitos, por vezes calcíferos, são as rochas predominantes; margas e ardósias menos frequentes, a exemplo dos siltitos, quando frescas são rochas bem compactas e de cor quase sempre cinza, variando de claro a escuro. Quando intemperizadas assumem coloração creme a avermelhada. Os calcários, assim denominados genericamente, são compostos por calcarenitos muito finos, calcilutitos e calcários oolíticos, com variados teores de magnésio, assumindo muitas vezes o caráter de calcários dolomíticos e muito raramente o de dolomitos típicos. Essas rochas têm invariavelmente cor cinza, com predomínio de tons mais escuros; são compactas, maciças e comumente contêm pirita disseminada. Onde ocorrem mais extensivamente, se distribuem em bancos relativamente espessos - em geral superiores a 1m; ocorrem também, de modo mais restrito, como lentes de espessuras variadas, por vezes com dezenas de metros, intercaladas nos metapelitos.

5.4.5. Fanerozóico - Mesozóico

Grupo Urucua

Essa unidade é constituída por uma sequência de arenitos eólicos e argilosos, com lentes de conglomerado e níveis intercalados de argila, formados em ambientes áridos, fluvial e lacustre, marcando um máximo de aridez seguido por condições de crescente umidade (SCHOBENHAUS *et al.* 1984). Alguns autores destacam esse grupo como uma formação componente do Grupo Areado (SGARBI 2000). Entretanto, os últimos mapeamentos efetuados na área descrevem apenas o Grupo Urucua na região da bacia do rio Verde Grande - Mapa Geológico de Minas Gerais, (CPRM 2003). Os sedimentos cretáceos do Grupo Urucua estão localizados na parte sudoeste da bacia, tendo sua distribuição controlada por um sistema de falhas de orientação NE-SW.

5.4.6. Cenozóico

Depósitos Detríticos-lateríticos

As coberturas detríticas cenozóicas de idade indiscriminada, encontradas sobre superfícies de aplainamento correspondentes à superfície Sul-Americana (King, 1956), são eluviões e coluviões eventualmente associados a sedimentos aluvionares de canais suspensos, que se apresentam em graus variados de laterização. Trata-se de uma sucessão de arenitos argilosos e lamitos arenosos, intercalados com camadas de argilito, folhelho orgânico e linhito de grau de pureza muito variável. Localmente ocorrem camadas pouco espessas de arenito ferruginoso e brechas intraformais argilosas. As coberturas detríticas cenozóicas podem ser observadas em toda a bacia, principalmente na sua parte central. São descritas concreções ferruginosas preenchendo fraturas e cobertura detrito-laterítica na forma de solo laterítico residual. Material areno-argiloso, concreções ferruginosas e fragmentos de quartzo revestem estas coberturas como concentrações supergênicas de óxidos de ferro (ANA, 2009).

Depósitos Aluvionares

Os depósitos aluvionares, encontrados margeando os principais cursos d'água da região (rios Verde Grande e Gorutuba), são compostos por areias, cascalhos, siltes argilas e termos mistos, com ou sem contribuição orgânica, depositados em ambiente fluvial ao longo de calhas, planícies de inundação e terraços. Localmente, ocorrem depósitos de turfa. Nos depósitos de paleocanais recentes predominam areia com intercalações de argila e cascalho e restos de matéria orgânica. Nos depósitos residuais, associados à paleocanais fluviais, predominam areia e cascalho. Como depósitos colúvio-aluvionares recentes, recobrimo encostas resultantes da gênese da morfologia atual, estão as coberturas coluvionares. São compostas por areias silto-argilosas, com grânulos e seixos, geralmente de quartzo, quartzito e canga limonítica, com linhas de seixos (*stoneline*) na base (ANA, 2009).

6. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

6.1. Domínios Hidrogeológicos

A individualização das unidades hidrogeológicas para esse estudo foi feita com base na sua natureza litológica, permeabilidade e compartimentação geomorfológica. Foi utilizado como referências as descrições dos sistemas aquíferos em Minas Gerais segundo Souza (1995) na escala 1:3.500.000, utilizando também a compilação das descrições destes sistemas nos trabalhos de CETEC (1981 e 1995) e Mourão *et al.* (2001).

De posse dessas características foi possível delimitar quatro grandes domínios hidrogeológicos:

- i) Domínio Cárstico - composto por calcários com termos pelíticos subordinados, encontrados ao sul da parte oriental da bacia;
- ii) Domínio Fissurado-Cárstico - de natureza pelito-carbonatada, ocorre em toda a porção ocidental ao norte da área da bacia;
- iii) Domínio Fissurado – ocorre na parte extrema oriental da bacia, de norte a sul, onde estão as rochas do embasamento, corpos granitóides, sequências metavulcanossedimentares e litotipos do Grupo Macaúbas e Supergrupo Espinhaço; e
- iv) Domínio Granular – esse domínio é constituído pelos arenitos do Grupo Urucuia e os sedimentos detríticos de cobertura.

As relações entre os sistemas e as unidades geológicas associadas, assim como os tipos de rochas dominantes, de acordo com o tipo de porosidade, constam na Tabela 6.1.

A distribuição geográfica e os grandes traços estruturais das diversas unidades aquíferas acham-se ilustrados no mapa de sistemas aquíferos (Figura 6.1), compilado a partir da Base Cartográfica do Projeto Domínios Hidrogeológicos do Brasil (CPRM, 2007). A ocorrência, distribuição e principais características litológicas e estruturais de cada sistema são descritas a seguir.

Tabela 6.1: Domínios hidrogeológicos da bacia do rio Verde Grande.

| Domínios Hidrogeológicos | Litologia Predominante e Unidades Geológicas Associadas |
|---|--|
| <i>DOMÍNIO AQUÍFERO FISSURADO</i> | |
| Sistema Aquífero Granítico-gnáissico | Associação de Gnaisses e Granitos Diversos |
| Sistema Aquífero Xistoso | Xistos do Grupo Macaúbas |
| Sistema Aquífero Quartzítico | Quartzitos do Supergrupo Espinhaço - e Arcóseos do Grupo Bambuí |
| <i>DOMÍNIO AQUÍFERO CÁRSTICO</i> | |
| Sistema Aquífero Carbonático | Calcários do Grupo Bambuí |
| <i>DOMÍNIO AQUÍFERO FISSURADO-CÁRSTICO</i> | |
| Sistema Aquífero Pelítico - Carbonático | Ardósias, Siltitos, calcários e Margas do Grupo Bambuí |
| Sistema Aquífero Pelítico | Ardósias, siltitos e arcósios do Subgrupo Paraopeba e Formação Três Marias |
| <i>DOMÍNIO AQUÍFERO GRANULAR</i> | |
| Sistema Aquífero Arenítico | Arenitos, Grupo Urucuaia |
| Sistema Aquífero Cobertura Detrítica | Areias, Siltes e Argilas de sedimentos de cobertura do Cenozóico |
| Sistema Aquífero Aluvial | Areias de depósitos aluviais - Cenozóico |

Evitou-se o termo Sistema Aquífero como definido por Souza (1995), preferindo-se o termo “Domínios Aquíferos”, dada a regionalidade do estudo e às marcantes variações litológicas observadas. O termo Sistema Aquífero foi adotado para as unidades geológicas aquíferas similares, embora possam ocorrer de forma descontínua. Foram identificados 9 sistemas aquíferos definidos segundo suas características litológicas e comportamento hidrogeológico.

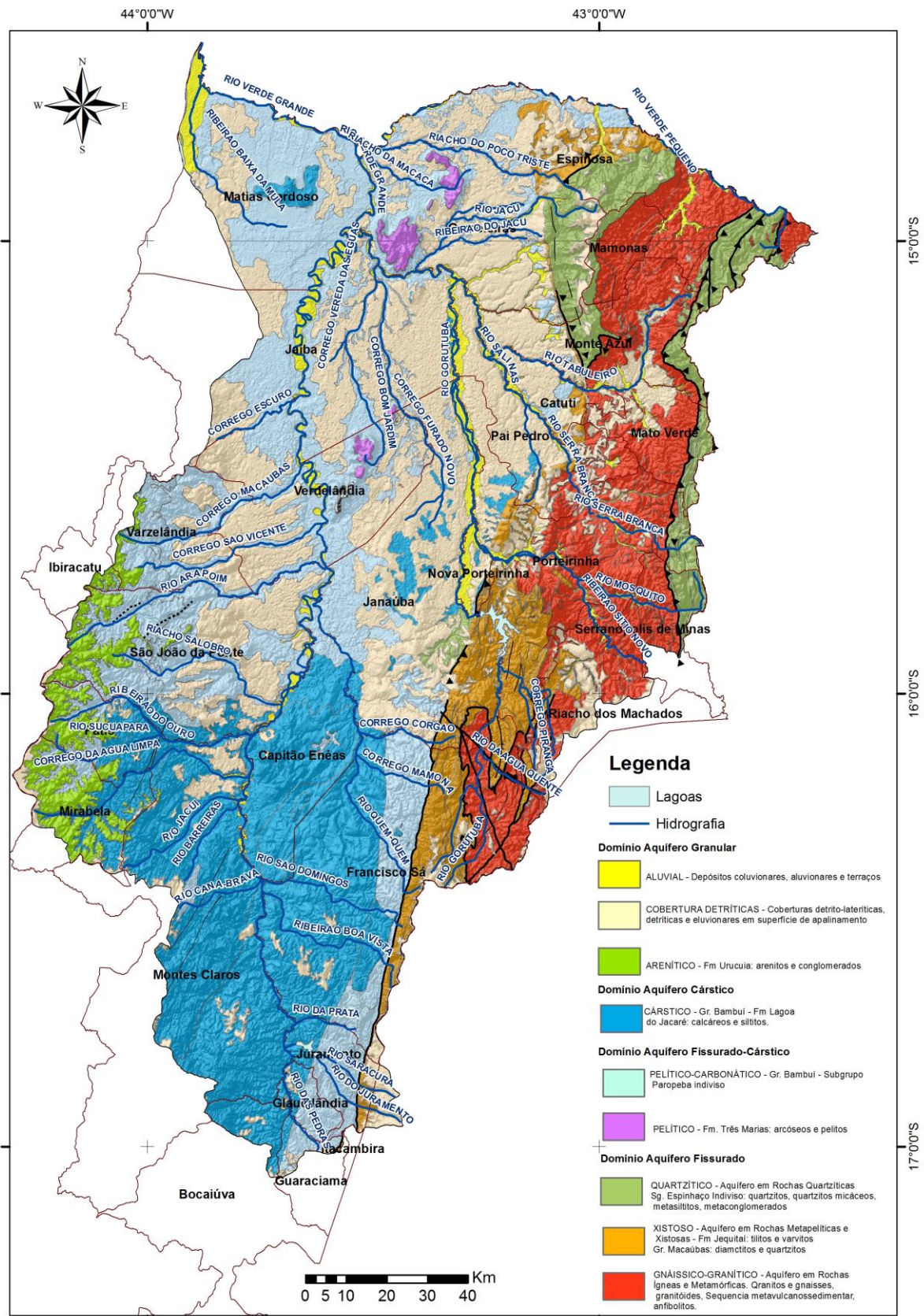


Figura 6.1: Mapa dos domínios hidrogeológicos da Bacia do rio Verde Grande.

Fonte: Modificado de CPRM, 2007.

6.1.1. Domínio Aquífero Fissurado

O Domínio Aquífero Fissurado representa o sistema em que a porosidade está relacionada à presença de falhas, fraturas, juntas, diaclases e outras superfícies de descontinuidade, resultantes de esforço tectônico. Corresponde a meio altamente heterogêneo e anisotrópico em que a condutividade hidráulica é basicamente função de diversos aspectos relacionados ao faturamento (MOURÃO *et al.*, 2001). É subdividido nos Sistemas Aquíferos: Gnáissico-Granítico, Xistoso e Quartzítico.

O Sistema Aquífero Granítico-Gnáissico é constituído por rochas ígneas e metamórficas com graus variados de metamorfismo e corpos granitóides, enquanto sua estrutura apresenta grande complexidade, tais como granitos, tonalitos, gnaisses, granitóides, migmatitos que refletem na grande variabilidade dos parâmetros hidráulicos, sugerindo fases superpostas de deformação (MOURÃO *et al.*, 2001).

Esse sistema engloba rochas cristalinas de idade arqueana, agrupadas sob a denominação de Gnaisses e Granitos diversos. Sua área de ocorrência na bacia é bem extensa e se distribui numa faixa oriental de direção geral N-S, com cerca de 220 km de comprimento e largura média de 20 km, que inclui as cidades de Riacho dos Machados, Porteirinha, Mato Verde, Monte Azul, Espinosa e Urandi (CETEC, 1995).

A morfologia se destaca pelo relevo arrasado, com cristas orientadas segundo as estruturas regionais, em contraste com o relevo montanhoso das serras do Espinhaço e outras que lhe servem de limite a leste e a oeste (CETEC, 1995).

A recarga se dá principalmente através dos cursos d'água encaixados em sistemas de fraturamento e por drenança a partir do manto de cobertura colúvio-eluvionar. A descarga ocorre através de fontes pontuais e difusas em fraturas ou no contato entre o saprólito e a rocha, atuando como reguladores de escoamento superficial (MOURÃO *et al.* 2001).

Os valores médios de transmissividade e armazenamento específico são de 25 m²/dia e 175,5 mm, respectivamente. A capacidade específica varia de 0,0014 a 7,99 m³/h.m, com média de 0,61 m³/h.m (RURALMINAS, 1999 e SILVA *et al.* 1995).

Alguns rios possuem suas nascentes nesse sistema aquífero, dentre os quais o rio da Água Quente, córrego Piranga e Ribeirão Sítio Novo, na região sul e o rio Tabuleiro, na região norte oriental.

O Sistema Aquífero Xistoso é representado por rochas xistosas que ocorrem na bacia predominantemente nos flancos da Serra do Espinhaço como os tilitos e metadiamicictitos de matriz pelítica do Grupo Macaúbas, que foram incluídos nessa unidade.

As litologias representativas desse sistema pertencem ao Grupo Macaúbas, quais sejam: micaxistos, diamictitos, filitos, metaconglomerados, calco-xistos, meta-grauvacas e quartzitos. No flanco ocidental da Serra do Espinhaço as rochas se apresentam falhadas e fraturadas, enquanto que no flanco oriental se encontram ainda dobradas. (SOUZA, 1995).

As rochas xistosas podem ser encontradas em duas áreas distintas. Na região norte da bacia, as ocorrências se situam no trecho médio-alto da bacia do rio Verde Pequeno, constituindo os flancos noroeste e norte da serra Central. O relevo montanhoso, com cotas em geral superiores a 500m e vales encaixados em fraturas e desenvolvimento de gargantas e "canyons", caracteriza a morfologia dessas ocorrências. Algumas nascentes são marcadas nesse sistema, como a do rio Quem-quem, córregos Mamona e Corgão e a nascente do Rio Gorutuba (CETEC, 1995).

Na região sul da bacia, a sequência do Grupo Macaúbas ocorre na faixa alongada na direção NNE, com cerca de 160 km de comprimento e largura máxima de 20 km na altura da cidade de Janaúba. Essa ocorrência, que se inicia na extremidade sudeste da bacia e se prolonga até o vale do rio Pacuí, é caracterizada por um relevo de colinas alinhadas na direção geral das estruturas (NNE), onde se registram cotas superiores a 600 m, que podem atingir 1000 m. Esse relevo montanhoso e alongado apresenta grande similaridade morfológica com as ocorrências da região norte; é conhecido pelo nome genérico de serra do Espinhaço, mas compreende várias serras com denominações locais, a saber: serra do Catuni, a leste de Juramento; serra de São Calisto, a nordeste de Francisco Sá; e serras do Taquaral e do Cerrado, a leste e nordeste de Janaúba (CETEC, 1995).

O Sistema Aquífero Quartzítico é formado por rochas quartzíticas saturadas associadas a várias unidades geológicas. As principais áreas de ocorrência localizam-se no domínio do Supergrupo Espinhaço (Formações Córrego dos Borges, Córrego Pereira e Galho do Miguel) (MOURÃO *et al.* 2001).

As rochas do Supergrupo Espinhaço são encontradas numa estreita faixa de direção geral N-S, na borda oriental da bacia do rio Verde Grande incluída na Serra do Espinhaço, que constitui o divisor de águas das bacias dos rios Jequitinhonha e Pardo com a bacia do rio

São Francisco. Aham-se representadas também a leste da cidade de Espinosa, na serra Central.

A grande resistência à erosão das rochas que compõem essa unidade faz com que se sobressaiam no relevo regional, conformando serras com cotas que atingem 800 m na serra Central, e de 800m a pouco mais de 1000 m na serra do Espinhaço (CETEC,1995).

As litologias se compõem fundamentalmente de espessos pacotes de quartzitos finos e grosseiros, intercalados com filitos, com ocorrências locais de metavulcânicas básicas. A base desse pacote é apoiada em discordância sobre rochas arqueanas compostas por gnaisses e granitos; sua relação de contato com rochas arqueanas e com a sequência do Grupo Macaúbas como ocorre na serra Central é complexa e marcada por falhamentos inversos e de empurrão. Sua estrutura é caracterizada por amplos dobramentos, falhas e fraturas diversas nas direções NW e ENE (CETEC, 1995).

A recarga se dá de forma direta pelos sistemas de fratura, percolação pelo manto de intemperismo e drenança dos sistemas granulares sobrepostos. As nascentes difusas ocorrem de forma generalizada e respondem pelos níveis de base dos rios Serra Branca e Mosquito, que cortam os terrenos quartzíticos na porção oriental. Dados referentes à potencialidade desse sistema são escassos e restringem-se à região do Quadrilátero Ferrífero (MOURÃO *et al.* 2001).

6.1.2. Domínio Fissurado-Cárstico

Este domínio é constituído por dois tipos de sistemas aquíferos: o sistema aquífero pelítico-carbonático, descrito por fácies ou unidades de rochas metassedimentares pelíticas - siltitos e ardósias - e carbonáticas - calcários, dolomitos e margas - de idade pré-cambriana (Proterozóico - Superior), com denominação estratigráfica de Grupo Bambuí; e o sistema aquífero pelítico, descrito por rochas do subgrupo Paraopeba e da Formação Três Marias, composta por arcósios, siltitos, ardósias e arenitos finos (CETEC, 1995).

Morfologicamente, identifica-se (1) uma unidade denominada Depressão Sanfranciscana, cujo relevo se caracteriza por extensas áreas rebaixadas, com altitudes próximas de 500m e rede de drenagem comandada pelos baixos cursos dos rios Verde Grande, Verde Pequeno e Gorutuba, observando uma predominância do aquífero pelítico-carbonático (2) e outra área de relevo mais acidentado com cotas entre 500 e 900 m,

representada por planaltos dissecados, que caracteriza os altos e médios cursos dos referidos rios, onde o aquífero pelítico é predominante a oeste da bacia (CETEC, 1995).

O Sistema Aquífero Pelítico é caracterizado por armazenamentos em rochas pelíticas e psamíticas, caracterizando um sistema do tipo fissurado. É constituído por litologias pertencentes ao subgrupo Paraopeba e Formação Três Marias. É constituído por ardósias, siltitos, arcósios e finas intercalações de arenito, margas e calcários. Suas principais áreas de ocorrência são na banda oriental da Bacia, junto a Serra do Espinhaço (SOUZA, 1995), e na vertente ocidental do rio Verde Grande na altura de Verdelânida e São João da Chapada.

A fácies pelítica representa a quase totalidade das rochas do Bambuí, que compõem o meio cárstico-fissurado, sendo encontrada nas bacias dos rios Verde Grande, Gorutuba e Verde Pequeno. Suas intercalações, nem sempre aflorantes de margas e calcários, notadamente destes últimos, exercem um importante papel no comportamento hidrogeológico do sistema. A distribuição dessas intercalações nos pelitos não é uniforme; a elevada frequência de ocorrências em algumas regiões, como por exemplo, em toda a vertente ocidental do rio Verde Grande, contrasta com as raras intercalações em outras, tais como na região do alto curso do rio Verde Pequeno, em toda a vertente oriental do rio Gorutuba e na região das cabeceiras do rio Verde Grande, na extremidade meridional da bacia (CETEC, 1995).

A recarga, assim como para o sistema pelítico-carbonático, ocorre diretamente de água de chuva nas áreas de afloramento ou pela água superficial através das drenagens com controle estrutural e pela infiltração de aquíferos granulares superiores (MOURÃO *et al.*, 2001).

O Sistema Aquífero Pelítico-Carbonático é caracterizado como meio cárstico fissurado, representado pelas litologias pertencentes ao Subgrupo Paraopeba e Formação Três Marias, sendo formado por intercalações de calcários e ardósias ou calcário e siltitos.

As relações de contato do sistema são bem definidas: repousa em discordância sobre o embasamento cristalino e seu limite a leste, na quase totalidade, é determinado por falhas inversas de direção geral NE, que colocam suas rochas em contato com as do Grupo Macaúbas e eventualmente, com as do Supergrupo Espinhaço e do embasamento cristalino. Em sua superfície, são encontradas com frequência coberturas detríticas do Terciário-Quaternário, aluviões quaternárias e sedimentos cretácicos da Formação Areado. Localmente, como ocorre nas Serras da Jaíba, do Gorutuba e Rompe-Jibão, é recoberto por

um pacote pouco espesso de arcóseos do Grupo Bambuí, pertencente à Formação Três Marias (CETEC, 1995).

Devido a sua constituição litológica e diferenciação estrutural, a recarga se dá pela infiltração direta de água de chuva nas áreas de afloramento ou pela água superficial através das drenagens com controle estrutural e pela infiltração de aquíferos granulares superiores, encontrados no extremo oeste da bacia do rio Verde Grande (MOURÃO *et al.*, 2001).

Em relação à distribuição desse conjunto de rochas, que corresponde a aproximadamente um terço da bacia (Figura 6.1), predomina uma faixa estreita desde Glaucilândia, sul da bacia e se distribui amplamente nas faixas centro e ocidental a partir de São João da Ponte e Janaúba, até o limite norte com a Bahia.

Os valores de transmissividade situam-se entre 2,3 a 506 m²/dia, com média de 109 m²/dia. A capacidade específica mostra média de 2,23 m³/h.m. O armazenamento específico médio obtido na avaliação feita para o Plano Diretor de Bacias de Afluentes do Rio São Francisco em Minas Gerais é de 82,3 mm, valor esse superior ao das rochas carbonáticas e de rochas metapelíticas e xistosas (MOURÃO *et al.*, 2001). Valor bem mais alto (385 mm) foi determinado em estudo mais regional realizado pela COPASA/Hidrossistemas (SOUZA, 1995).

6.1.3. Domínio Cárstico

O Domínio Cárstico é representado pelo Sistema Aquífero Carbonático, o qual é constituído por aquíferos essencialmente cársticos, cujo armazenamento ocorre em rochas calcárias e dolomíticas onde a porosidade é predominantemente secundária resultante do alargamento, por dissolução, de superfícies de descontinuidade tais como fraturas, planos de acamamento e falhas, gerando meio de circulação altamente anisotrópico e heterogêneo formado por uma rede intrincada de condutos (MOURÃO *et al.*, 2001). É representado principalmente por calcários e dolomitos do Grupo Bambuí, Subgrupo Paraopeba (Formações Sete Lagoas, Serra de Santa Helena e Lagoa do Jacaré), constituído ainda por margas, ardósias, siltitos, argilitos, quartzitos e arcósios (SOUZA, 1995).

As condições de recarga são efetivas em áreas de afloramento, a partir da drenança vertical de aquíferos granulares sobrejacentes e em pontos de aporte dos cursos d'água superficiais, nas zonas de absorção cárstica de águas subterrâneas, condicionadas por estruturas de dissolução. Os níveis de base são representados pelos grandes rios que

mostram, em alguns trechos, significativas situações de influência (perda para o aquífero) ou efluência (restituição ao aquífero) (MOURÃO *et al.*, 2001).

Representa o sistema de maior capacidade de produção e apresenta grande variedade de parâmetros hidráulicos que reflete a sua heterogeneidade. A transmissividade varia de 233m²/dia a 7700 m²/dia (CETEC, 1984), a capacidade específica média está em torno de 12,4 m³/h.m (MOURÃO *et al.*, 2001). No entanto, valor bem baixo de armazenamento específico (66 mm) foi obtido no estudo de sub-bacias que drenam os sistemas carbonáticos no estudo do Plano Diretor de Bacias de Afluentes do Rio São Francisco em Minas Gerais (RURALMINAS, 1999). No estudo regional realizado pela COPASA/Hidrossistemas (SOUZA, 1995), o armazenamento específico médio ficou em torno de 458 mm.

6.1.4. Sistema Aquífero Granular

O Domínio Aquífero Granular é constituído pelos aquíferos areníticos e de cobertura detrítica e aluvial.

O Aquífero Arenítico é representado na área pelos arenitos cretácicos do Grupo Urucuia. Sua ocorrência é restrita à borda ocidental da bacia, no trecho entre Varzelândia e Montes Claros, onde formam chapadões de superfície plana a suave ondulada, com cotas entre 800 e 1000m. São encontrados invariavelmente sobre rochas do Grupo Bambuí, sejam calcários, como na região de Varzelândia, São João da Ponte e Montes Claros, sejam sobre pelitos diversos, como em Mirabela. Sua espessura na área da bacia estudada, de acordo com CETEC (1995), não ultrapassa 50 m e é muito variável em função do relevo do substrato, constituído por superfície de erosão de rochas do Grupo Bambuí.

A litologia é caracterizada por arenitos médios a finos, de matriz síltica, com cor rosa-avermelhada e amarela esbranquiçada. Afloramentos desse arenito são raros porquanto normalmente, encontram-se desagregados e transformados em cobertura arenosa. Nas raras áreas de exposição pode-se observar o seu acamamento horizontal e a estratificação cruzada a plano-paralela (CETEC, 1995).

Segundo Mourão *et al.* (2001), o sistema possui alta permeabilidade, evidenciada pela baixa densidade de drenagem. O coeficiente de infiltração é elevado variando entre 9 e 15%. Apresenta potencial hidrogeológico mediano refletido pelos parâmetros hidrogeológicos: porosidade eficaz próxima a 0,10; transmissividade variando entre 7 e 233 m²/dia com valor

médio de 58 m²/dia (CETEC, 1981 e 1984) e capacidade específica média de 2,09 m³/h.m (RURALMINAS, 1999).

A recarga se dá pela infiltração da água de chuva nas regiões de afloramento ou através do aquífero subjacente, por toda a área de chapada. A descarga principalmente por surgências no sopé das elevações, no contato com o substrato impermeável formado por rochas do Grupo Bambuí. A formação de veredas é típica na área de sua ocorrência. É de grande importância a contribuição desses aquíferos para a manutenção do nível de base dos rios, garantindo o seu caráter permanente, com uma contribuição em torno de 4,87 x 10⁹ m³/ano (RURALMINAS 1999).

O Aquífero de Cobertura Detrítica, compreende todos os níveis aquíferos superficiais relacionados ao manto de alteração das rochas, correspondendo às coberturas detríticas encontradas sobre as superfícies de aplainamento Sul- americana. Elúvios e colúvios, por vezes associados a sedimentos aluvionares de canais suspensos. São constituídos por sedimentos arenosos ou argilosos podendo ainda apresentar níveis de cascalheiras basais. Localmente podem apresentar-se limonitizados formando cangas (RAMOS & PAIXÃO, 2009).

De acordo com Ramos & Paixão (2009), os aquíferos associados ao manto de alteração ocorrem generalizadamente ao longo de toda bacia, apresentando bastante variado em composição e espessura, que irão refletir a rocha originária, condições paleoclimáticas e condicionamento morfo-tectônico. Embora sejam potencialmente fracos, podem ser importantes no processo da recarga de aquíferos subjacentes através da infiltração vertical nas zonas mais úmidas.

Na bacia do rio Verde Grande são encontrados, basicamente, em duas condições distintas. No primeiro caso, ocorrem nas porções mais elevadas do relevo regional, em cotas que oscilam entre 800 e 1000m. Frequentemente constituem superfícies planas a levemente onduladas, com rede de drenagem escassa a inexistente, conformando platôs, chapadas ou pediplanos limitados muitas vezes por escarpas resultantes de processos erosivos atuais. Esses depósitos são constituídos predominantemente por sedimentos finos - areias, siltes e argilas - por vezes conglomeráticos. Frequentemente sua parte basal é marcada por níveis de cascalheira com seixos de quartzo e concreções ferruginosas. Localmente acham-se lateritizados, dando origem à formação de crostas superficiais de limonita ou níveis de canga. As espessuras são muito variáveis e controladas pela superfície de erosão do

Terciário Superior, que serve de nível de base. Normalmente essas espessuras não ultrapassam 10m, embora, excepcionalmente, possam ser encontrados pacotes com mais de 30m (CETEC, 1995). Essas ocorrências relacionadas às cotas mais elevadas - superiores a 800m - se distribuem restritamente em áreas situadas principalmente sobre a serra do Espinhaço, ao longo do divisor de águas oriental da bacia, como, por exemplo, a oeste de Juramento e na área do divisor de águas da região de Francisco Sá e de Riacho dos Machados. Além dessas ocorrências cita-se uma extensa mancha localizada na serra Central, a leste de Espinosa (Figura 6.1).

No segundo caso se distribuem nas porções deprimidas do relevo regional, em cotas que variam de 450 a 700m. Essas ocorrências se situam, na grande maioria, sobre rochas pelíticas e carbonáticas do Grupo Bambuí, constituindo superfícies planas a onduladas, com espessuras que, em geral, não ultrapassam 5m. Espessuras maiores, da ordem de 30m, podem ser encontradas em algumas áreas como na planície situada entre os vales do Córrego Fundo e Rio Gorutuba. As ocorrências do vale do rio Verde Grande, a jusante de Verdelândia, que se estendem até a região da confluência com o rio São Francisco, assim como as manchas situadas a leste, nos vales dos córregos Vereda das Éguas e Furado Novo, e dos rios Gorutuba e Pacuí, constituem uma vasta planície, quase contínua, com cotas que variam entre 450 e 500 m. As ocorrências ao sul de Verdelândia, no vale do rio Verde Grande e as demais, localizadas na bacia do rio Verde Pequeno, se distribuem numa superfície ondulada cujas cotas mais frequente variam entre 500 e 600 m. Sob o ponto de vista litológico, esses depósitos são pouco diferenciados; predominam os termos silto-argilosos de cores avermelhadas, não raro com cascalheiras e concreções ferruginosas basais (CETEC, 1995).

O potencial de produção de poços tubulares é pequeno devido às dimensões normalmente restritas da zona saturada. A heterogeneidade dos sedimentos denota grande variabilidade de valores de porosidade eficaz e transmissividade. Estimativas indicam valor médio de porosidade eficaz de 0,10 (CETEC, 1981) e de transmissividade de 33 m³/h (RURALMINAS, 1999). A capacidade específica varia de 0,009 a 4,2 m³/h.m com média de 1,19 m³/h.m (Mourão *et al.*, 2001).

Os Aquíferos Aluviais são constituídos por aquíferos existentes nos sedimentos aluviais ou depósitos recentes, distribuídos ao longo das calhas dos cursos d'água, dos terraços e planícies de inundação. São constituídos por areias, siltes, argilas e cascalhos, sendo que,

junto às calhas fluviais, vales abandonados e paleo-canais são encontrados os materiais de granulometria mais grosseira (cascalho e areia grossa), enquanto o material mais fino (areia, silte e argila) predomina nas planícies de inundação. Sua ocorrência é generalizada ao longo dos principais cursos de água. Contudo, por limitações de escala apenas as manchas de maior expressão foram representadas na Figura 6.1.

As ocorrências mapeáveis de aluviões na bacia do rio Verde Grande se distribuem restritamente nas planícies de inundação do próprio rio Verde Grande, do Gorutuba e seus principais afluentes, como os rios Pacuí, Mosquito, Tabuleiro e Furado Novo; e, do Verde Pequeno e seu contribuinte rio São Domingos. As manchas mais expressivas são encontradas nas planícies do médio e baixo Gorutuba e baixo rio Verde Grande, sobretudo nas proximidades das confluências com os rios Gorutuba e São Francisco (CETEC, 1995).

Os aluviões dos trechos de rios situados nas áreas de domínio de rochas quartzíticas e granito-gnáissicas, ou seja, dos rios cujos cursos se desenvolvem na região oriental da bacia do rio Verde Grande, são em geral mais grosseiras, com predominância dos termos arenosos. Entre outras manchas aluviais que apresentam essa característica, como as dos rios São Domingos e Verde Pequeno, há que se destacarem os depósitos dos rios Gorutuba desde a barragem de Bico da Pedra até alguns quilômetros ao norte de Janaúba, e os depósitos do rio Mosquito, desde Porteirinha até a confluência com o rio Gorutuba. Essas aluviões são particularmente arenosas e chegam a atingir espessuras próximas de 10m. (CETEC, 1995).

No restante da bacia, isto é, em sua região central e ocidental, área de ocorrência de metapelitos e calcários do Grupo Bambuí, os depósitos são essencialmente finos, predominando os termos argilosos e siltosos, onde, não raro, se encontram estratos de calcários e margas de cor creme, resultantes de precipitações. Nessas áreas as espessuras quase nunca ultrapassam 5m (CETEC, 1995).

De acordo com Mourão *et al.* (2001), os aquíferos aluviais apresentam comportamento hidráulico sazonal devido sua conexão hidráulica com as águas superficiais, recebendo contribuição dos rios nos períodos chuvosos e para a manutenção do fluxo de base nos períodos de baixa precipitação e têm na evapotranspiração um importante exultório devido à pequena profundidade do nível d'água, geralmente não superior a 5-10 metros.

É um sistema importante do ponto de vista do aproveitamento por ser constituído de material fácil de escavar ou perfurar, apresentam níveis de água subterrânea rasos possibilitando bombeamento com pequenos recalques.

A espessura média saturada deste aquífero varia de 5 a 10 m, podendo alcançar 30 m. Valores de condutividade hidráulica variam de 0,28 a 23 m/dia para os depósitos de granulometria entre areia fina a muito grossa e 0,02 a 0,11 m/dia para níveis siltsos. Os pacotes de espessura superior a 10 metros e constituídos de frações mais grossas podem fornecer vazões elevadas. A capacidade específica está em torno de 1,64 m³/h.m (MOURÃO *et al.*, 2001).

6.2. Modelo Hidrogeológico para a bacia do rio Verde Grande

Após a análise da distribuição dos sistemas aquíferos, as condições geomorfológicas, a configuração do escoamento superficial e subterrâneo das águas subterrâneas, pode-se delinear um modelo hidrogeológico conceitual regional para a bacia do rio Verde Grande, baseando-se no modelo descrito por CETEC (1995). Divide-se a bacia em dois grandes domínios hidrogeológicos:

- **Faixa oriental** – Dominam nessa faixa os sistemas aquíferos fissurados associados a rochas granito-gnáissicas, xistosas e quartzíticas. A recarga desses aquíferos processa-se principalmente através de sistemas de fraturas que controlam a drenagem superficial ou através de filtração vertical descendente, a partir de lençóis freáticos das coberturas detríticas ou do manto de alteração, quando existentes. São sistemas em geral localizados, de extensão restrita, cujas áreas de descarga ocorrem em fundos de vales, geralmente mascaradas pelos depósitos aluviais. Excetuando-se os aquíferos associados aos quartzitos da Serra do Espinhaço, os demais têm em geral pequeno potencial hidrogeológico.
- **Faixas central e ocidental** - Domínio dos sistemas aquíferos cárstico-fissurados, constituem zonas de maior potencial hidrogeológico, onde a acumulação de água subterrânea é comandada pelas feições estruturais e pelo desenvolvimento dos fenômenos de carstificação.

Nesta ampla faixa central e ocidental da bacia, distinguem-se duas zonas com condições bem diferenciadas quanto ao modelo hidrogeológico prevalecente: a zona sul, a montante de Verdelândia, em região do Sistema aquífero cárstico, e a zona norte, a jusante, até a confluência com o rio São Francisco, com influência do Sistema aquífero fissurado-cárstico.

No trecho superior sul, as zonas de recarga principais localizam-se nas cabeceiras e nos altos cursos dos afluentes da margem esquerda, e, ao sul da bacia, na área mais acidentada e

de maior elevação do relevo. Nesta área, os depósitos de cobertura e os capeamentos de arenitos cretácicos têm papel importante na recarga dos sistemas cárstico-fissurados inferiores, uma vez que estes sedimentos têm alta permeabilidade e grande capacidade de infiltração. Esta contribuição processa-se ou diretamente por filtração vertical descendente, ou seja, através de fontes de encostas que alimentam a drenagem superficial nos altos cursos, onde o desenvolvimento de feições cársticas assume maior expressão, com a presença de sumidouros, trechos de rios subterrâneos, condutos, grutas e cavernas. O escoamento das águas subterrâneas, neste trecho, é influenciado por fortes gradientes hidráulicos e as linhas de fluxo convergem para o vale do rio Verde Grande, indicando o caráter efluente do rio. As áreas de descarga localizam-se principalmente ao longo desse vale e as contribuições subterrâneas responsáveis pela manutenção do fluxo de base do rio são muito importantes neste trecho.

A jusante de Verdelândia, no trecho norte do rio Verde Grande, onde o relevo caracteriza-se por uma superfície peneplanizada (Depressão Sanfranciscana), as condições de recarga e escoamento das águas subterrâneas são bem diferenciadas. Os sedimentos de cobertura ou o próprio manto de alteração das rochas pelíticas e carbonáticas são mais argilosos e impermeáveis; a infiltração e recarga são mais efetivas somente em depressões associadas a dolinas; em muitas áreas não ocorre a presença de um lençol freático nessas coberturas que favoreça uma alimentação do sistema cárstico-fissurado inferior. O escoamento das águas em direção ao vale do rio Verde Grande é influenciado por menor permeabilidade e baixos gradientes hidráulicos, indicando reduzida contribuição subterrânea ao rio, neste trecho. Há possibilidades, nesta zona, de ocorrerem perdas do rio para o aquífero, em determinados locais, devido a níveis de água excessivamente deprimidos em função da ocorrência de períodos secos prolongados (CETEC, 1995).

7. RESULTADOS

7.1. CARACTERIZAÇÃO HIDROCLIMATOLÓGICA

A área de estudo está inserida em grande parte na Depressão Sanfranciscana, a norte de Minas Gerais, cujas condições climáticas relativas ao seu posicionamento geográfico são influenciadas pelos processos atmosféricos e termodinâmicos de larga e média escala, como toda a região tropical brasileira.

Apresenta-se durante todo o ano sob o domínio misto de sistemas atmosféricos atuantes, com predominância do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) na região sul da bacia (REBOITA *et al.*, 2010) e predominância de precipitações orográficas que favorecem a permanência de ventos secos na região a norte da Depressão Sanfranciscana.

O Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) é um sistema de alta pressão atmosférica com centro localizado entre os continentes sul-americano e africano. Sua origem está associada à circulação geral da atmosfera, conforme modelos defendidos por Hadley e Ferrel. O ASAS possui grande importância para o clima da América do Sul, seja no verão ou inverno (BASTOS & FERREIRA, 2000). Maia (1986) considera o sistema determinante na definição das condições de tempo no continente sul-americano. Embora seu centro esteja mais afastado do continente durante o verão, o ASAS costuma avançar sobre a porção centro-oriental do Brasil em plena estação chuvosa. Nesses períodos, a atividade convectiva é inibida, o que causa redução da precipitação e elevação das temperaturas (CUPOLILLO, 2008).

Para a caracterização do clima na bacia do rio Verde Grande, foram adotadas medições de temperatura, pluviometria e fluviometria obtidas a partir de dados monitorados e coletados pela ANA, CPRM, INMET e IGAM. Foram selecionadas 2 estações meteorológicas do INMET (cód. 83338 e 83395) e 2 estações climatológicas do IGAM (cód. 32503 e 32501), ambas dentro da bacia, dos quais os valores diários de temperatura e pluviometria foram adquiridos para o mesmo período. Para caracterização da pluviometria na bacia, foram adotadas 14 estações pluviométricas, com aquisição de dados diários.

Na caracterização fluviométrica, os dados de medições de vazões foram adquiridos em 4 estações fluviométricas compostas por régua linimétrica, sendo 3 estações locadas no leito de drenagem do rio Verde Grande e uma locada no leito de drenagem do rio Gorutuba,

afluente principal do rio Verde Grande. A Figura 7.1 mostra a distribuição espacial dos pontos de monitoramento adotados para o estudo.

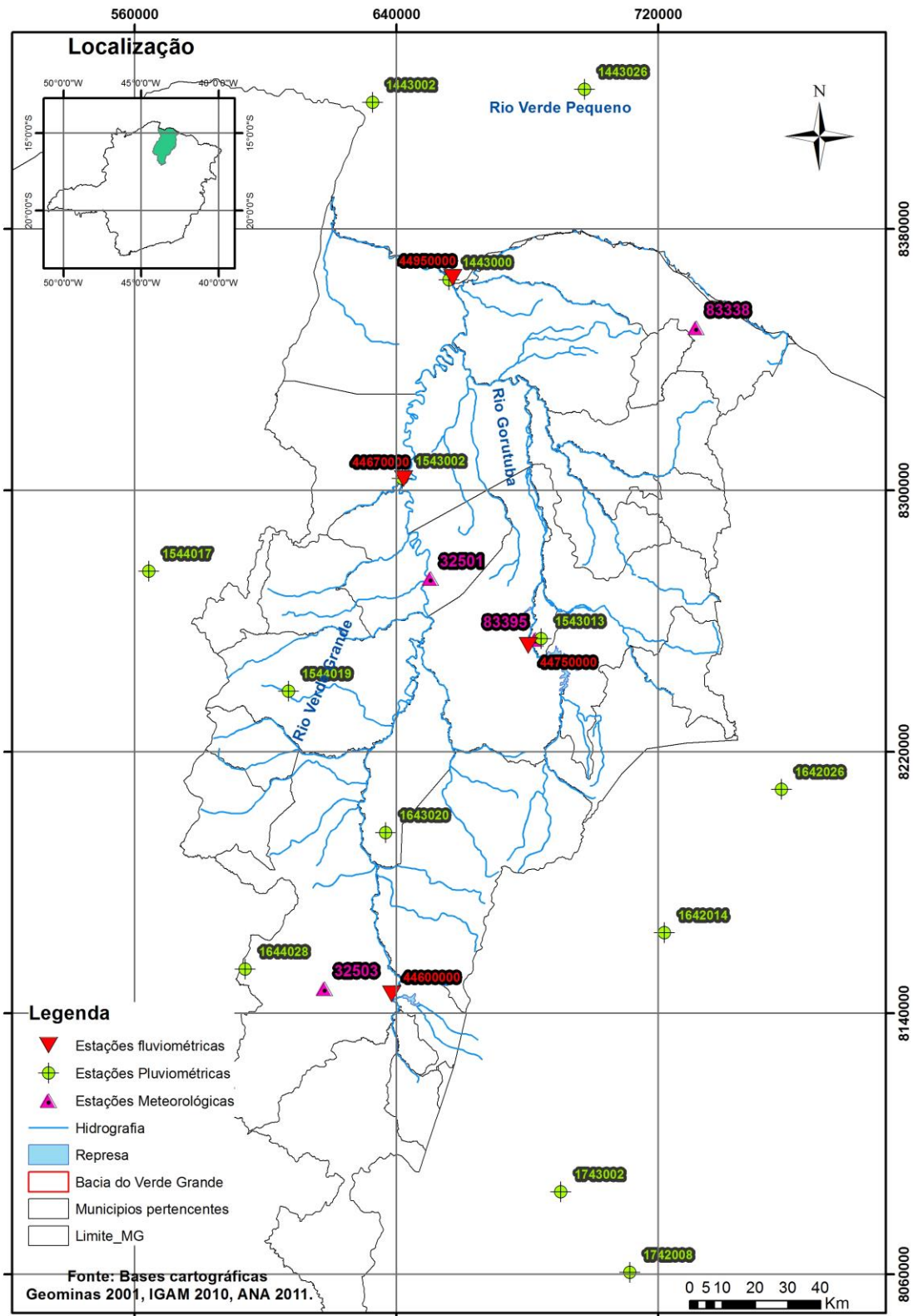


Figura 7.1: Localização das estações climatológicas e meteorológicas, pluviométricas e fluviométricas utilizadas nesse estudo.

7.1.1. Clima

Foram utilizados dados consistidos e contínuos por pelo menos 2 anos consecutivos. As estações cujos dados foram adotados para esse estudo são descritas na Tabela 7.1, e mostradas na Figura 7.1

Tabela 7.1: Estações Climatológicas na bacia do Rio Verde Grande

| Estações Climatológicas | | | | | | | | |
|-------------------------|--------|---------------|------------|---------------|--------|---------|----------|----------------|
| Estações | Código | Tipo Estação | Manutenção | Cidade | UTM X | UTM Y | Altitude | Período medido |
| Montes Claros | 32503 | Meteorológica | IGAM | Montes Claros | 617750 | 8147521 | 642 | 1998 a 2010 |
| Jaíba | 32501 | Meteorológica | IGAM | Jaíba | 650084 | 8272963 | 496 | 1998 a 2002 |
| Espinosa | 83338 | Climatológica | INMET | Espinosa | 731278 | 8349731 | 570 | 1975 a 1978 |
| Janaúba | 83395 | Climatológica | INMET | Janaúba | 682104 | 8254327 | 516 | 1975 a 1976 |

As temperaturas médias anuais na bacia variam de 21,6°C em Montes Claros, a 25,6°C em Espinosa, com um valor médio para toda a bacia de 23,8°C (Tabela 7.2). O período mais quente compreende os meses de outubro a março, enquanto, que as temperaturas mínimas ocorrem entre junho e julho. As médias de temperatura são maiores à medida que decresce a latitude. Os valores médios de Temperatura podem ser observados na Figura 7.2.

Tabela 7.2: Variáveis Climáticas na bacia do Rio Verde Grande

| Variável Climática | Estação | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|----------------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| Evapotranspiração (mm/mês) | Espinosa | 146,3 | 118,6 | 141,2 | 112,3 | 92,0 | 72,9 | 75,5 | 93,3 | 118,1 | 135,3 | 132,5 | 140,2 |
| | Montes Claros | 116,1 | 104,0 | 101,0 | 84,3 | 69,9 | 54,1 | 59,6 | 67,6 | 88,8 | 113,2 | 102,0 | 112,7 |
| | Jaíba | 135,6 | 127,7 | 116,4 | 117,7 | 97,2 | 76,8 | 79,7 | 94,0 | 125,8 | 154,1 | 122,1 | 130,3 |
| | Janaúba | 133,2 | 116,3 | 117,5 | 94,2 | 79,9 | 66,4 | 79,0 | 91,8 | 106,8 | 132,7 | 137,8 | 138,6 |
| Temperatura Média (°C) | Espinosa | 30,9 | 30,2 | 32,0 | 30,1 | 29,3 | 28,3 | 28,2 | 30,3 | 30,7 | 30,7 | 30,2 | 30,5 |
| | Montes Claros | 23,3 | 23,5 | 22,9 | 22,1 | 20,3 | 18,6 | 18,7 | 20,1 | 22,3 | 24,0 | 23,2 | 23,0 |
| | Jaíba | 25,2 | 25,7 | 25,5 | 26,1 | 24,3 | 22,4 | 23,1 | 23,8 | 25,6 | 26,3 | 24,8 | 24,9 |
| | Janaúba | 23,8 | 24,1 | 26,5 | 22,5 | 20,8 | 20,4 | 21,1 | 22,0 | 22,9 | 24,1 | 24,8 | 24,2 |

Fonte: Estações Climatológicas e Meteorológicas vide Tabela 7.1.

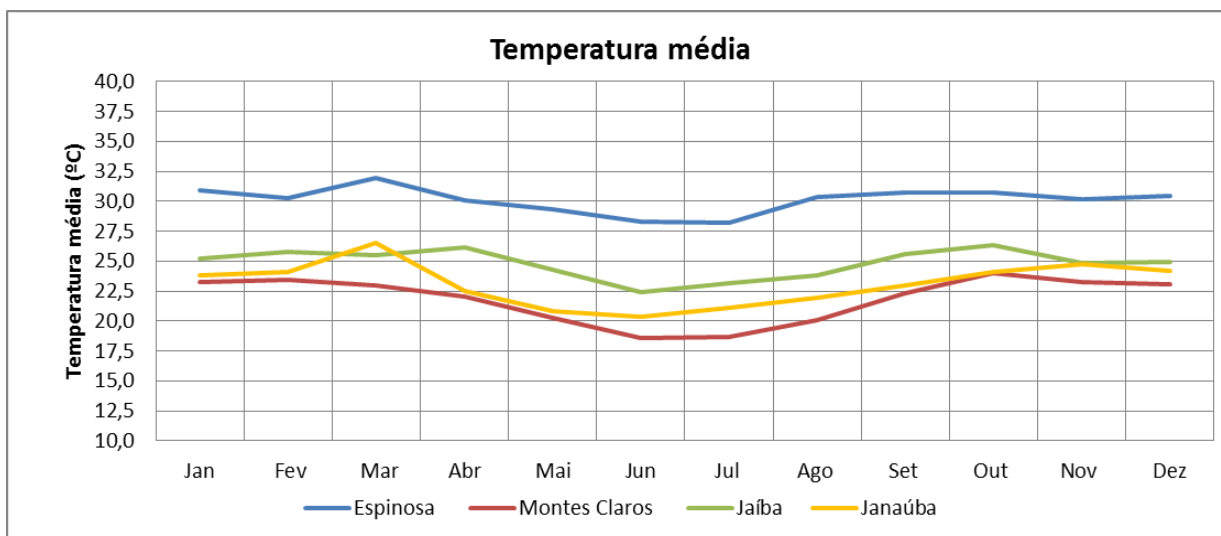


Figura 7.2: Temperatura média mensal em cada estação climatológica

A evapotranspiração real medida na região da bacia varia de mínimo de 54,1 mm/mês em Montes Claros e máxima de 154,1 mm/mês em Jaíba. As médias anuais ficaram entre os valores de 90 e 115 mm/mês. Os valores maiores de Evapotranspiração real são observados nas estações de Jaíba e Espinosa (Figura 7.3), localizadas ao norte da bacia.

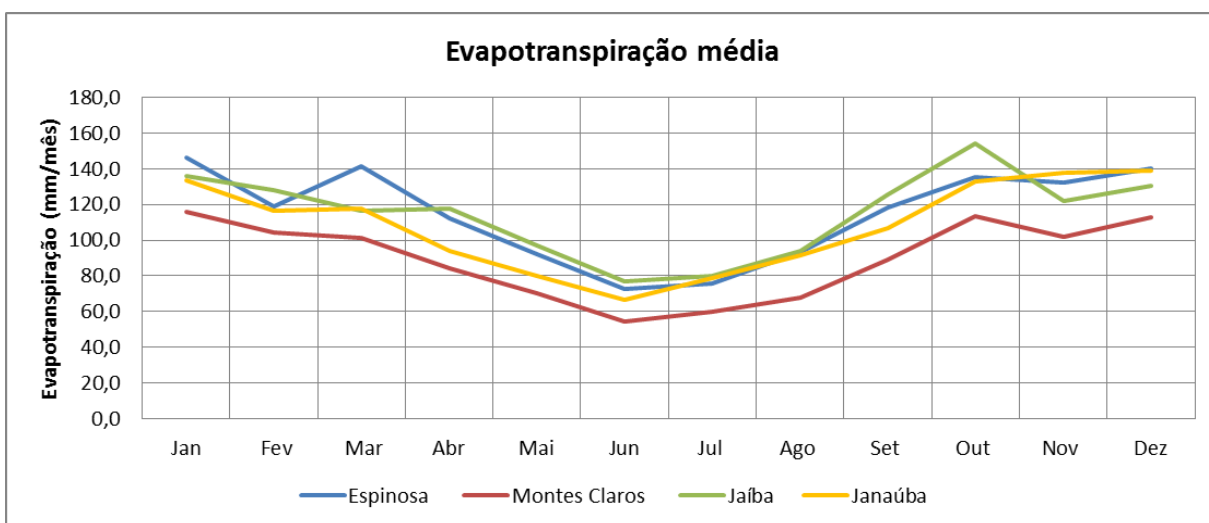


Figura 7.3: Evapotranspiração real média mensal em cada estação climatológica.

7.1.2. Pluviometria

O regime pluviométrico na bacia foi caracterizado por dois períodos bem distintos. O período chuvoso que se estende de outubro a março, quando ocorrem 93% da chuva anual e período seco estende-se dos meses de abril a setembro. As 14 estações pluviométricas existentes no banco de dados do HidroWeb e utilizadas para o cálculo da média pluviométrica na bacia são mostradas na Tabela 7.3. Foi feita uma filtragem dos valores

anômalos contidos nas medições das estações, excluindo-se aqueles que apresentaram valores fora do desvio padrão para aquele período. Os valores discrepantes foram preenchidos por valores medianos correspondentes ao mesmo período anual. A localização das estações pluviométricas é representada na Figura 7.4.

Tabela 7.3: Estações pluviométricas dentro e próximas a bacia do rio Verde Grande

| Código | Estação | Cidade | Altitude (m) | UTM X | UTM Y | Pluviometria média anual (mm) | Período de medição |
|---------|-------------------------|-------------------------|--------------|--------|---------|-------------------------------|---------------------------|
| 1443000 | Boca da Caatinga | Matias Cardoso | 425 | 656052 | 8364391 | 778,86 | 1969 a 2008 |
| 1443002 | Carinhanha | Carinhanha/BA | 440 | 632664 | 8418737 | 784,1 | 1940 a 2009 |
| 1443026 | Palmas de Monte Alto | Palmas de Monte Alto/BA | 569 | 697429 | 8422736 | 770,9 | 1984 a 2010 |
| 1543002 | Colônia do Jaíba | Jaíba | 450 | 641694 | 8303630 | 800,87 | 1963 a 2009 |
| 1543013 | Janaúba | Janaúba | 498 | 684250 | 8254642 | 781,94 | 1970 a 2009 |
| 1544012 | São Francisco | São Francisco | 448 | 513912 | 8236585 | 1054,2 | 1938 a 2009 |
| 1544017 | Pedras de Maria da Cruz | Januária | - | 564322 | 8275213 | 892 | 1973 a 2009 |
| 1544019 | São João da Ponte | São João da Ponte | - | 607034 | 8238545 | 977,75 | 1976 a 2009 |
| 1642014 | Grão Mogol | Grão Mogol | - | 721919 | 8164643 | 1047,5 | 1973 a 2009 |
| 1642026 | Ponte Vacaria | Salinas | - | 757670 | 8208530 | 1112,8 | 1993 a 2009 |
| 1643020 | Capitão Enéias | Capitão Enéias | - | 636739 | 8195232 | 911,7 | 1973 a 2009 |
| 1644028 | São João da Vereda | Montes Claros | - | 593821 | 8153418 | 1041,6 | 1976 a 1977 e 1980 a 2009 |
| 1742008 | Carbonita | Carbonita | 552 | 711253 | 8060700 | 1020,5 | 1992 a 2009 |
| 1743002 | Vila Terra Branca | Bocaiúva | 630 | 690244 | 8085260 | 1072,9 | 1972 a 2009 |

Fonte: Banco de dados HidroWeb.

A precipitação média anual da bacia do rio Verde Grande, obtida pela média aritmética, foi de 931,9 mm, sendo que os mais altos índices se concentram nas cabeceiras da bacia, atingindo valores anuais médios próximos a 1.070 mm. Esses índices vão diminuindo gradualmente em direção ao centro e à região nordeste da bacia, até atingir valores inferiores a 780 mm.

De acordo com o método das isoietas (Tabelas 7.4 e 7.5) o valor médio anual da precipitação na bacia do rio Verde Grande foi de 870,6 mm, cerca de 60 mm a menos que a média aritmética.

Tabela 7.4: Áreas calculadas pelo Método de Isoietas.

| Áreas | Km ² |
|--------------|------------------|
| A1 | 7.377,34 |
| A2 | 6.157,66 |
| A3 | 3.926,57 |
| A4 | 4.073,87 |
| A5 | 3.575,54 |
| A6 | 1.895,7 |
| TOTAL | 27.006,68 |

Tabela 7.5: Cálculo da Precipitação média na bacia pelo método das Isoietas.

| Valor das alturas de precipitação H, áreas A (km ²) e da média da precipitação (mm) | | | | | | |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| H0 | H1 | H2 | H3 | H4 | H5 | H6 |
| 772,00 | 800,00 | 850,00 | 900,00 | 950,00 | 1000,00 | 1050,00 |
| $P1=H0+H1/2$ | $P2=H1+H2/2$ | $P3=H2+H3/2$ | $P4=H3+H4/2$ | $P5=H4+H5/2$ | $P6=H5+H6/2$ | |
| 786,00 | 825,00 | 875,00 | 925,00 | 975,00 | 1025,00 | |
| A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | Área Total |
| 7377,34 | 6157,66 | 3926,57 | 4073,87 | 3575,54 | 1895,70 | 27006,68 |
| $P1.A1$ | $P2.A2$ | $P3.A3$ | $P4.A4$ | $P5.A5$ | $P6.A6$ | $P\ média$ |
| 5798589,24 | 5080069,50 | 3435748,75 | 3768329,75 | 3486151,50 | 1943092,50 | 870,60 |

Esse resultado foi adotado nesse estudo como valor de Precipitação Média Anual para os cálculos de recarga, devido à interpolação de dados das estações pluviométricas, tanto dentro como fora dos limites da bacia, reproduzindo uma melhor representatividade espacial.

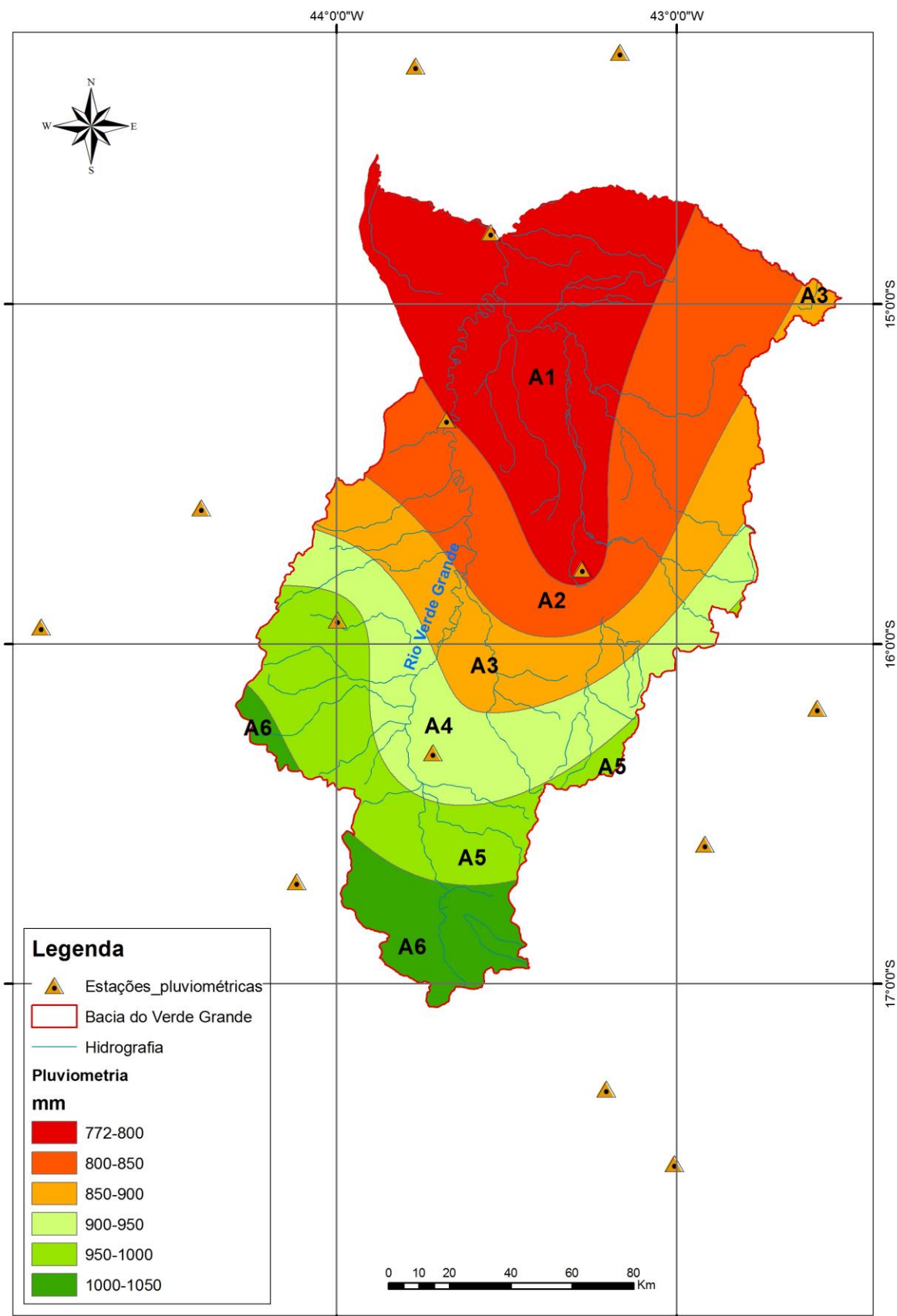


Figura 7.4: Áreas de isoietas de precipitação para a bacia do rio Verde Grande.

7.1.3. Fluviometria

Foram selecionadas 4 estações fluviométricas com série de dados tratados e consistidos, extraídos do banco de dados do HidroWeb (ANA, 2011) para o cálculo do escoamento superficial e subterrâneo da bacia do rio Verde Grande (Figura 7.1).

Três dessas estações fluviométricas estão localizadas no leito de drenagem do rio Verde Grande, sendo uma a montante próximo de Montes Claros, a segunda no médio-baixo curso de drenagem, em Jaíba e a terceira após o deságue do rio Verde Pequeno, em Matias Cardoso. A outra estação se localiza no alto-médio curso do rio Gorutuba, o maior afluente da margem direita do rio Verde Grande (Tabela 7.6).

A distribuição dessas estações é importante por se correlacionar com a distribuição das estações pluviométricas e das estações climatológicas e meteorológicas.

Os dados obtidos das séries históricas do HidroWeb não apresentaram as medições realizadas nos mesmos anos monitorados para cada estação, mas existe um intervalo de anos monitorado comum a todas as séries de vazões.

Tabela 7.6: Estações fluviométricas utilizadas.

| Código | Estação | Cidade | UTM X | UTM Y | Área de drenagem (km ²) | Altitude | Curso d' água | Período medido | Rede |
|----------|------------------|----------------|--------|---------|-------------------------------------|----------|------------------|----------------|------|
| 44600000 | Ponte de Rodagem | Montes Claros | 638556 | 8145797 | 1040 | 573 | Rio Verde Grande | 1969 a 1975 | ANA |
| 44670000 | Colônia do Jaíba | Jaíba | 642198 | 8303516 | 12200 | 450 | Rio Verde Grande | 1962 a 2010 | CPRM |
| 44750000 | Janaúba | Janaúba | 680303 | 8252472 | 2460 | 494 | Rio Gorutuba | 1969 a 1988 | ANA |
| 44950000 | Boca da Caatinga | Matias Cardoso | 657197 | 8365047 | 29400 | 414 | Rio Verde Grande | 1969 a 2008 | ANA |

Nas Figuras 7.5 a 7.8 são mostrados os hidrogramas representativos das estações fluviométricas desse estudo.

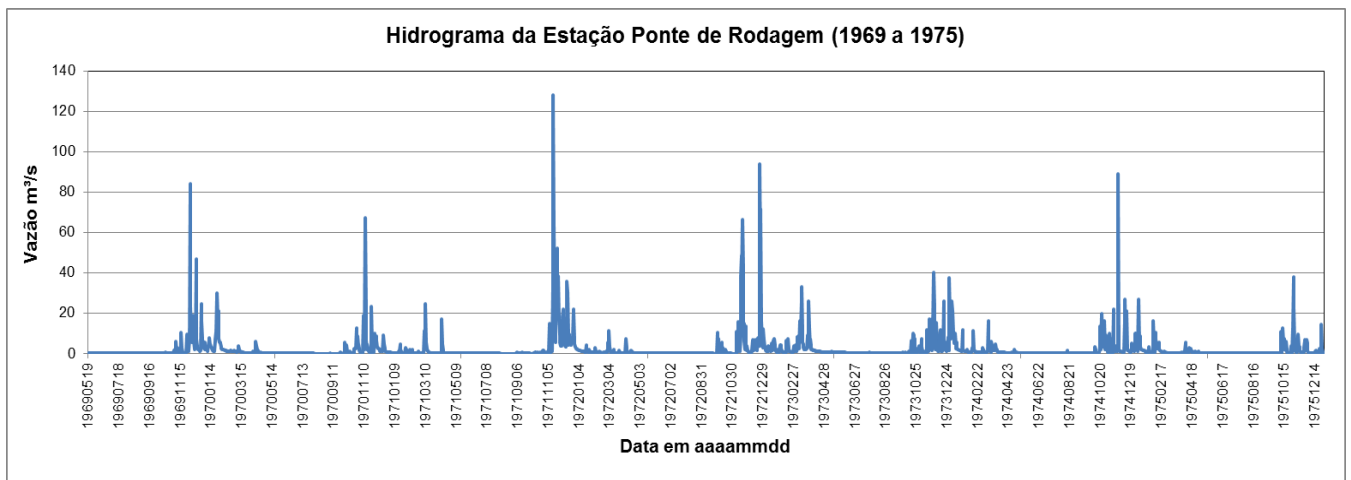


Figura 7.5: Hidrograma da Estação Ponte de Rodagem, início em maio/1969.

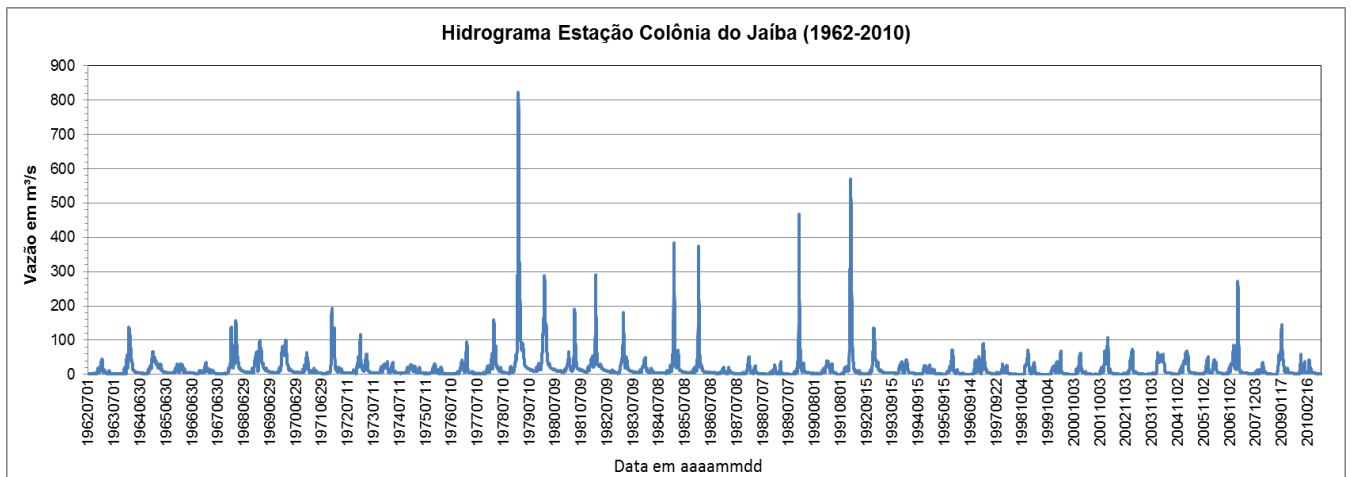


Figura 7.6: Hidrograma da Estação Colônia do Jaíba, início em setembro/1962.

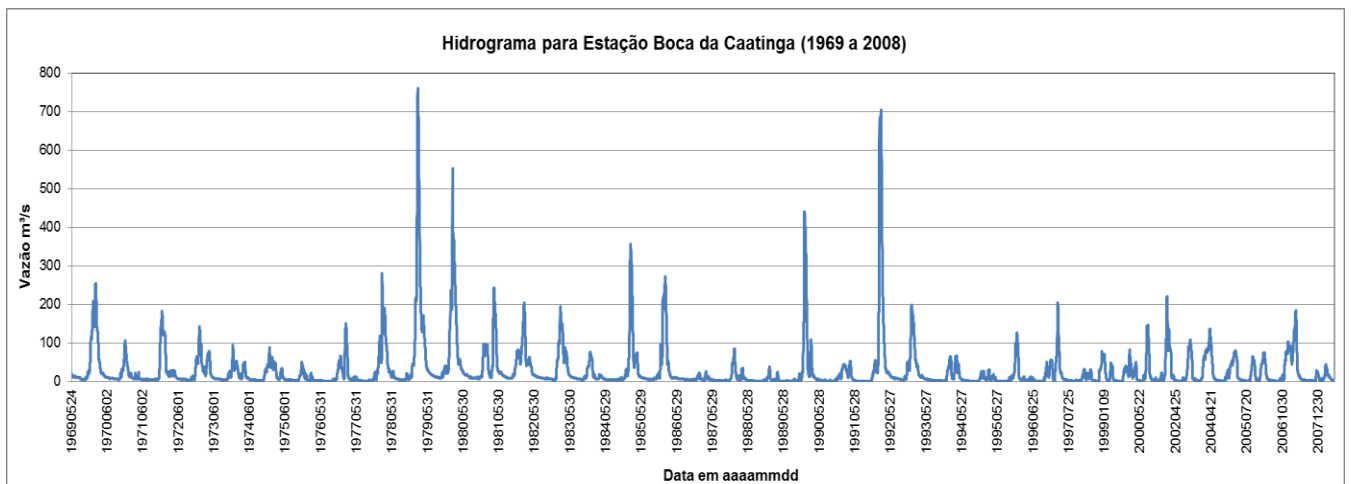


Figura 7.7: Hidrograma da Estação Boca da Caatinga, início em maio/1969.

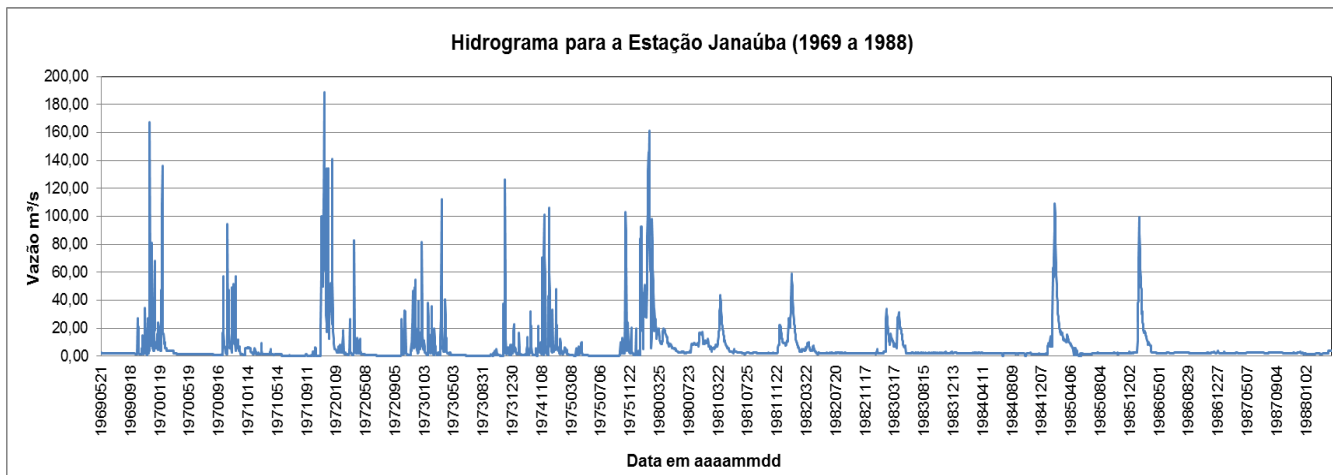


Figura 7.8: Hidrograma da Estação Janaúba, início em maio/1969.

Observando o padrão das curvas de vazão nas estações acima apresentadas, percebe-se que 3 delas possuem direta influência de exploração de águas para irrigação, conforme foi mencionado no histórico da bacia na Revisão Bibliográfica do Cap. 3.

A Estação Ponte de Rodagem, que está localizada no trecho alto do rio Verde Grande, aparenta não ter influências notáveis nas curvas de vazões ao longo do período amostrado, indicando que o uso da água do rio é mais restrito até esse trecho.

Para a Estação de Colônia do Jaíba e Boca da Caatinga, observa-se grandes períodos de alta vazão com picos bem elevados, entre os anos de 1978 a 1990, indicando que essas localizações apresentam influências bem próximas de escoamento hídrico. Mas a partir de 1992, os picos de vazões não são mais observados em ambas as estações e percebe-se a redução drástica de vazão e aumento dos períodos com fluxo superficial, o que indica que a intensificação de bombeamento para irrigações nesses trechos interferiu no escoamento do rio entre esses trechos.

O hidrogramas da estação Janaúba encontra-se no rio Gorutuba, a leste da calha do rio Verde Grande, e apresenta uma grande área de irrigação identificada a oeste dessa estação, na cidade de Janaúba, conforme se observa no mapa de Uso dos Solos, no Item 2.2.3, e isso é evidenciado pelas curvas de vazão que declinam drasticamente a partir dos anos 80, quando a exploração das águas superficiais se intensificaram com o aumento da demanda para cultivos irrigados da região.

7.1.4. Balanço Hídrico Climatológico

O balanço hídrico climatológico, desenvolvido por Thornthwaite & Mather (1955) é uma das várias maneiras de se monitorar a variação do armazenamento de água no solo. Através da contabilização do suprimento natural de água ao solo, pela chuva (P), e da demanda atmosférica, pela evapotranspiração potencial (ETP) e com um nível máximo de armazenamento ou capacidade de água disponível (CAD) apropriada ao estudo em questão, o balanço hídrico fornece estimativas da evapotranspiração real (ETR), da deficiência hídrica (DEF), do excedente hídrico (EXC) e do armazenamento de água no solo (ARM), podendo ser elaborado desde a escala diária até a mensal (CAMARGO, 1971; PEREIRA *et al.*, 1997).

A Tabela 7.7 apresenta os dados médios anuais de entrada (T – temperatura, P – Precipitação) e de saída (ETR – evapotranspiração real, DEF – déficit hídrico, EXC – excedente hídrico, ETP – evapotranspiração total) para as quatro estações climatológicas e seus respectivos anos, calculados pelo programa. O cálculo utilizado para cada estação foi o Balanço Hídrico Sequencial Decendial (períodos de 10 dias, sendo 3 períodos por mês, de janeiro a dezembro), de forma a se obter valores de ETP e ETR na representação de sub-climas presentes na bacia.

Tabela 7.7: Resultados do Balanço Hídrico Sequencial Decendial.

| Estações Climatológicas | Código | Ano | T média °C | P mm | ETP mm (Thornthwaite 1948) | P-ETP mm | ETR mm | DEF mm | EXC mm | ARM (100) mm |
|-------------------------|--------|--------------------|------------|--------|----------------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| MONTES CLAROS | 32503 | 1999 | 21,7 | 866,5 | 1051,0 | -184,5 | 595,4 | 455,6 | 171,1 | 35,8 |
| | | 2000 | 21,6 | 1125,8 | 1046,0 | 79,8 | 624,7 | 421,3 | 436,9 | 46,8 |
| | | 2001 | 22,1 | 669,5 | 1087,1 | -417,6 | 563,8 | 523,3 | 52,5 | 28,9 |
| | | 2002 | 22,3 | 1028,8 | 1109,2 | -80,5 | 751,4 | 357,9 | 206,3 | 48,7 |
| | | Média Anual | | | | 1073,3 | -150,7 | 633,8 | 439,5 | 216,7 |
| JAÍBA | 32501 | 1999 | 24,6 | 544,3 | 1358,8 | -814,6 | 401,6 | 957,2 | 49,9 | 13,0 |
| | | 2000 | 24,6 | 772,8 | 1354,6 | -581,9 | 725,7 | 629,0 | 136,3 | 35,6 |
| | | 2001 | 25,0 | 542,8 | 1418,4 | -875,7 | 584,4 | 834,1 | 0,0 | 18,0 |
| | | Média Anual | | | | 1377,3 | -757,4 | 570,5 | 806,8 | 62,0 |
| ESPINOSA | 83338 | 1975 | 24,2 | 626,7 | 1312,8 | -686,1 | 789,2 | 523,6 | 16,5 | 36,8 |
| | | 1976 | 25,6 | 485,0 | 1540,6 | -1055,6 | 467,8 | 1072,8 | 77,1 | 18,7 |
| | | 1977 | 24,9 | 559,6 | 1420,4 | -860,8 | 540,4 | 880,0 | 58,9 | 16,7 |
| | | 1978 | 23,8 | 1012,0 | 1238,9 | -226,9 | 812,0 | 426,9 | 146,1 | 51,3 |

| | | | | | | | | | | |
|---------|-------|--------------------|------|--------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| | | Média Anual | | | 1378,2 | -707,3 | 652,3 | 725,8 | 74,7 | 30,9 |
| JANAÚBA | 83395 | 1977 | 24,6 | 749,9 | 1359,6 | -609,7 | 666,2 | 693,4 | 155,4 | 26,0 |
| | | 1978 | 23,8 | 1017,0 | 1229,0 | -212,0 | 770,2 | 458,8 | 196,7 | 43,4 |
| | | Média Anual | | | 1294,3 | -410,8 | 718,2 | 576,1 | 176,0 | 34,7 |

Os resultados obtidos foram os valores de ETP, ETR, DEF, EXC e ARM e foi possível mostrar em representação gráfica o extrato do balanço hídrico, representado pelos valores de DEF e EXC, e o balanço hídrico decendial representado pelos valores de precipitação, ETR e ETP (**Anexo I**).

A evapotranspiração potencial anual média (ETP) da bacia foi calculada em 1271,3 mm, e a média anual da evapotranspiração real (ETR) foi de 637,9 mm. O déficit hídrico médio anual da bacia é de 633,3 mm e o excedente hídrico médio é de 131,0 mm. Na Figura 7.9 estão representados os gráficos das estações climatológicas, com os valores anuais obtidos no balanço hídrico de P, ETP, P-ETP, ETR, DEF e EXC.

Observa-se que somente no ano de 2000 na estação Montes Claros a precipitação supera a evapotranspiração potencial, enquanto nas demais estações os valores de evapotranspiração potencial é superior ao da precipitação monitorada. Isso indica um clima com grande potencial de evaporação, condicionando a região a períodos bastante secos ao longo do ano. Na mesma região da estação Montes Claros, o excedente hídrico é maior que nas demais estações.

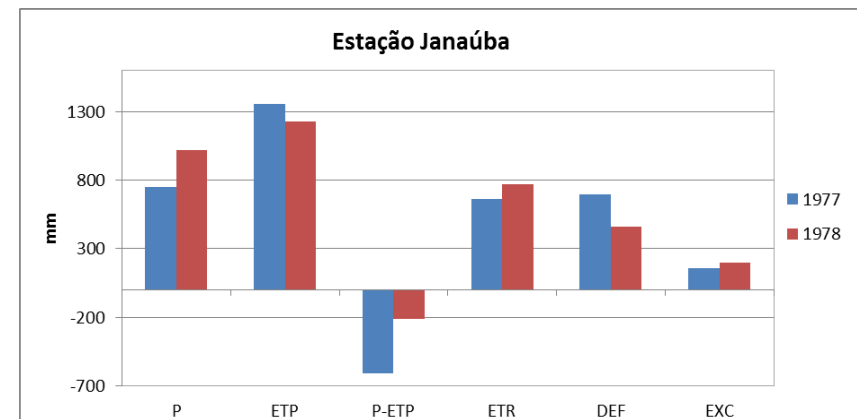
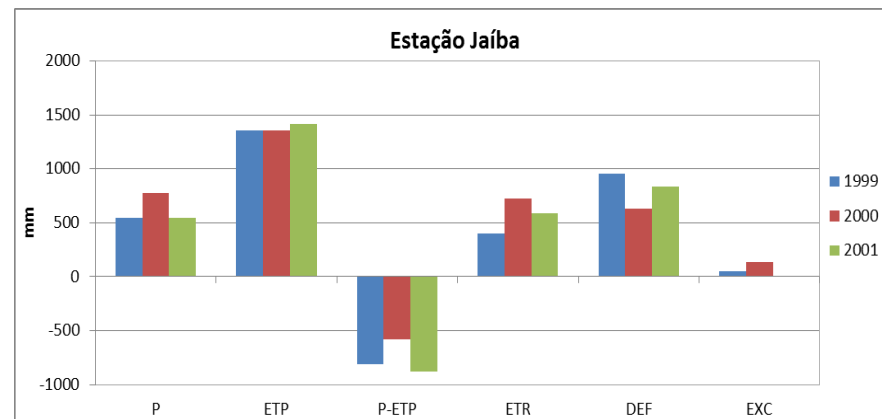
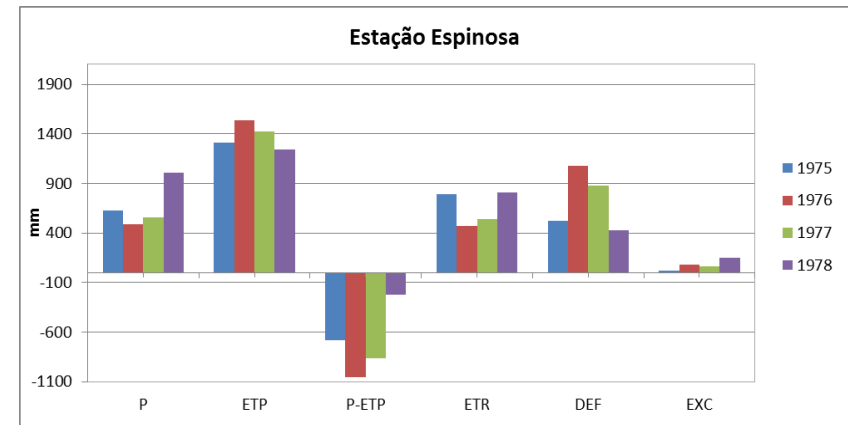
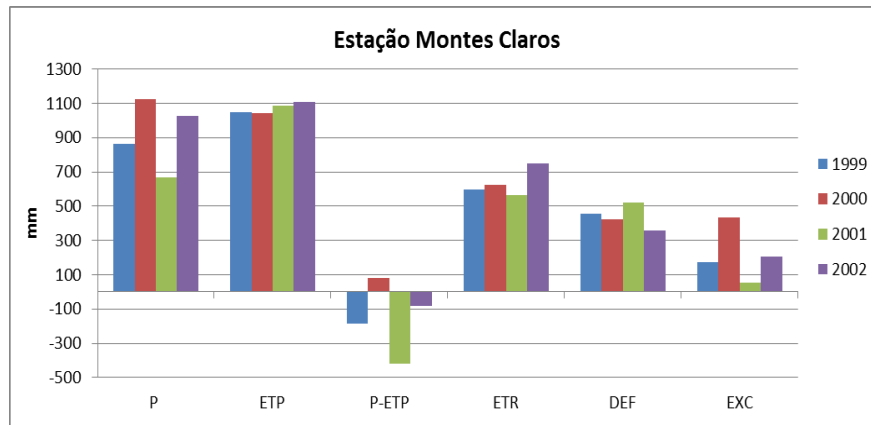


Figura 7.9: Valores anuais do balanço hídrico para cada estação climatológica.

7.1.5. Índice de Aridez e Domínio Climático

Baseado no fato de que a maioria dos valores de P-ETP é negativa para as séries climáticas calculadas no balanço hídrico, o Índice de Aridez foi adotado nesse estudo para identificar as zonas climáticas. O grau de aridez de uma região depende da quantidade de água advinda da chuva (P) e da perda máxima possível de água por meio da evaporação e transpiração (ETP) (MATALLO Jr., 2003).

A Tabela 7.8 apresenta a classificação climática para o índice de aridez, conforme critérios estabelecidos por Thornthwaite (1948), ajustados por Penman (1953, *in* CONAMA, 1997).

Tabela 7.8: Classes de clima de acordo com o Índice de Aridez, por Penman (1953, *in* CONAMA, 1997)

| Classe | Índice P/ETP |
|-------------------|--------------|
| Hiperárido | < 0,03 |
| Árido | 0,03 – 0,20 |
| Semiárido | 0,21 – 0,50 |
| Sub-úmido seco | 0,51 – 0,65 |
| Sub-úmido e úmido | > 0,65 |

O índice obtido representa a média das razões anuais de P/ETP, obtidos de cada Balanço Hídrico Sequencial Decendial, para cada estação climatológica.

O índice de aridez na bacia do rio Verde Grande foi classificado como semiárido nas regiões de Jaíba, a noroeste e Espinosa, a nordeste da bacia. Já na região sul da bacia, microrregião de Montes Claros, o clima foi classificado como sub-úmido a úmido e sub-úmido em Janaúba (Tabela 7.9).

Tabela 7.9: Índice de aridez para a Bacia do rio Verde Grande.

| Estações Climatológicas | Média P/ETP | Índice de aridez CONAMA |
|-------------------------|-------------|-------------------------|
| Montes Claros | 0,86 | Sub-úmido e úmido |
| Janaúba | 0,69 | Sub-úmido e úmido |
| Jaíba | 0,45 | Semiárido |
| Espinosa | 0,50 | Semiárido |

Ao sul da bacia concentra-se o domínio climático sub-úmido a úmido, com seu limite passando de oeste pelos municípios de Patis, Capitão Enéias, Janaúba e seguindo a leste até Mato Verde. No norte da bacia concentra-se o domínio climático semiárido, que se estende

até a divisa com o estado da Bahia, abrangendo os municípios de Espinosa, Matias Cardoso, Jaíba, Verdelândia, Gameleiras, Mamonas e Monte Azul.

No mapa da Figura 7.10 são mostradas as zonas de aridez calculadas e o limite dos dois Domínios climáticos, através de uma isolinha amarela.

De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger (*in* PEEL *et al.*, 2007), mais conhecida por classificação climática de Köppen, pode-se determinar os tipos de clima predominantes na região da bacia.

A partir desses condicionantes meteorológicos e geomorfológicos, a zona climática do semiárido, de acordo com a classificação de Köppen, é de clima BSh, na qual B significa que a evapotranspiração potencial média é maior que a precipitação média anual, e não havendo, portanto, excedente de água, daí o porquê de nenhum rio permanente originar-se no local; S indica estação seca de verão; e h refere-se à temperatura média anual superior a 18°C, ou seja, temperatura elevada.

A zona climática sub-úmida é de clima Aw', na qual A significa temperatura média do mês mais frio do ano > 18 C, estação invernal ausente e forte precipitação anual (superior à evapotranspiração potencial anual), e w' significa chuvas de verão-outono.

Os valores médios de P, ETP, ETR, DEF, EXC e ARM para os domínios climáticos são exibidos na Tabela 7.10, que é o cálculo da média dos valores hidroclimáticos das estações Jaíba e Espinosa representando o Domínio semiárido, e o das estações climatológicas de Janaína e Montes Claros representando o clima sub-úmido e úmido na bacia.

Tabela 7.10: Valores hidroclimáticos médios anuais para os domínios definidos.

| Domínio Climático | T °C | P mm | ETP mm (Thornthwaite 1948) | P-ETP mm | ETR mm | DEF mm | EXC mm | ARM (100) mm |
|-------------------|------|-------|----------------------------|----------|--------|--------|--------|--------------|
| Semiárido | 24,7 | 649 | 1377,7 | -732,4 | 611,4 | 766,3 | 68,4 | 26,5 |
| Sub-úmido e úmido | 22,7 | 909,6 | 1183,8 | -280,8 | 676 | 507,8 | 196,4 | 37,4 |

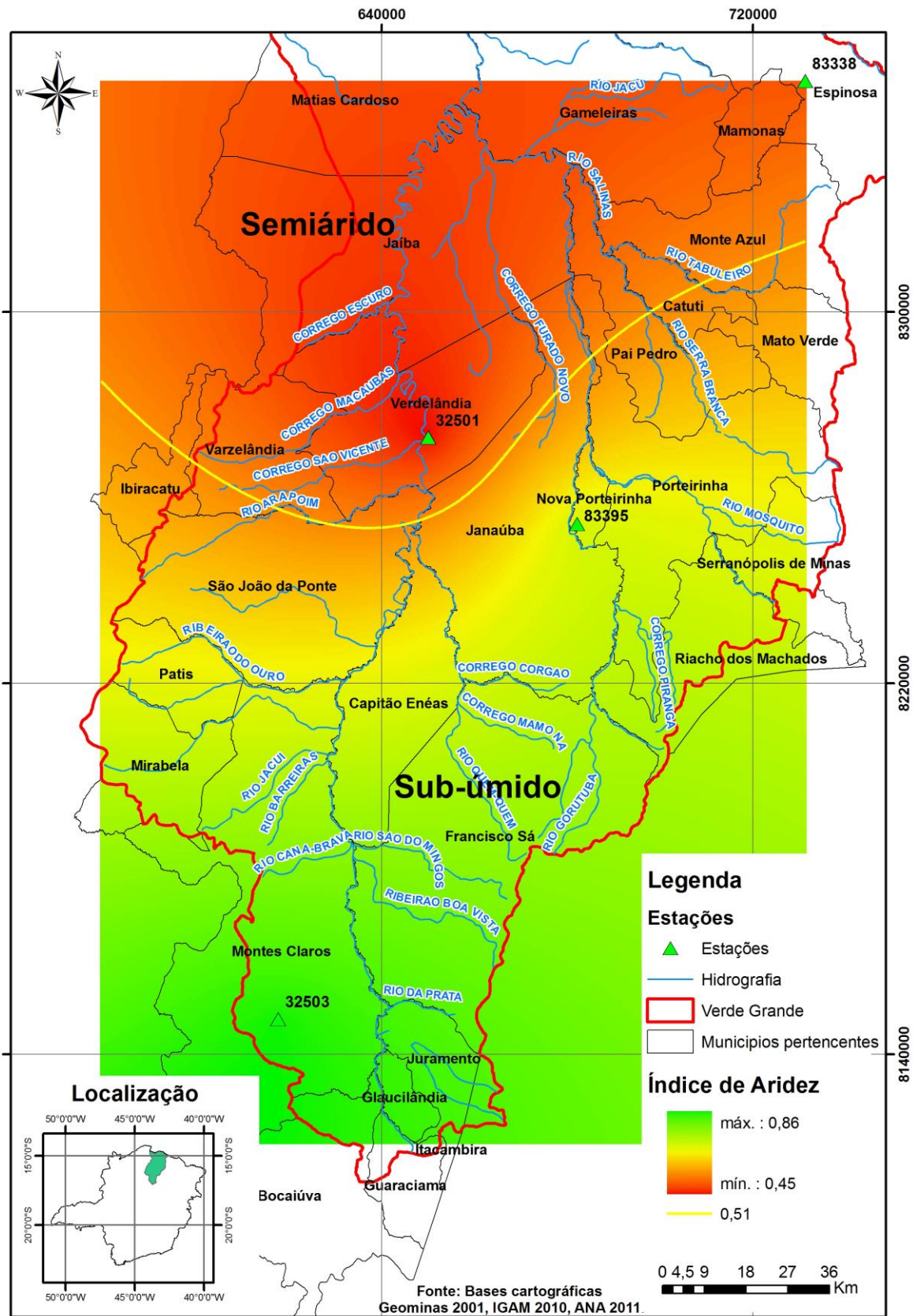


Figura 7.10: Mapa da bacia do rio Verde Grande com as zonas de aridez calculadas e o limite dos dois Domínios climáticos.

7.2. POTENCIOMETRIA

Foram utilizados dados da base do IGAM desde 1970 até 2009 de poços que continham outorgas ativas com litologias definidas e valores de níveis estáticos. O número de poços que possuía dados de nível estático de água subterrânea foi de 221, os quais foram selecionados para confecção dos níveis potenciométricos da bacia (Figura 7.11).

Do banco de dados do SIAGAS levantado até o ano de 2011, foram selecionados 1859 pontos de água subterrânea com existência de cota de nível d'água em poços tubulares profundos. Ressalta-se que a demonstração da superfície potenciométrica nesse estudo levou em conta os dados dos primeiros níveis de entrada de água em poços tubulares, não considerando as possíveis misturas de águas de litotipos distintos e/ou interconexão de aquíferos, nem cotas de nascentes cadastradas pelo SIAGAS.

O resultado do tratamento gráfico das cotas de NA pode ser observado na Figura 7.12. Como análise inicial, as áreas em branco e marrom são as áreas de maior nível potenciométrico na bacia, que correspondem às regiões de altos da bacia.

O mapa da Figura 7.12 fornece indicações gerais sobre as direções de escoamento das águas subterrâneas na bacia e sobre a magnitude e as variações dos gradientes hidráulicos permitindo efetuar estimativas sobre a vazão de escoamento natural. Entretanto, não deve ser utilizado para inferir com precisão a profundidade ou cota dos níveis de água numa determinada área ou local, devido ao baixo grau de detalhamento inerente à sua pequena escala e ao número de pontos cotados utilizados. As variações anuais e as diferenças de datas das medições de cotas dos níveis de água disponíveis podem também ser negligenciadas em uma análise regional em pequena escala.

A região da Depressão Sanfranciscana, que vai do centro da bacia a noroeste da área, apresenta os menores valores potenciométricos e gradientes hidráulicos acentuadamente menores, sendo caracterizada como região de descarga da bacia, bem referenciada pela foz dos principais rios, Gorutuba, Verde Pequeno e o Verde Grande. A superfície potenciométrica é regional e fortemente controlada pela topografia.

Na região da cabeceira do rio Verde Grande, a sul da bacia, o fluxo das águas subterrâneas seguem os talwegues de drenagem dos afluentes do rio Verde Grande, com um fluxo principal sentido norte.

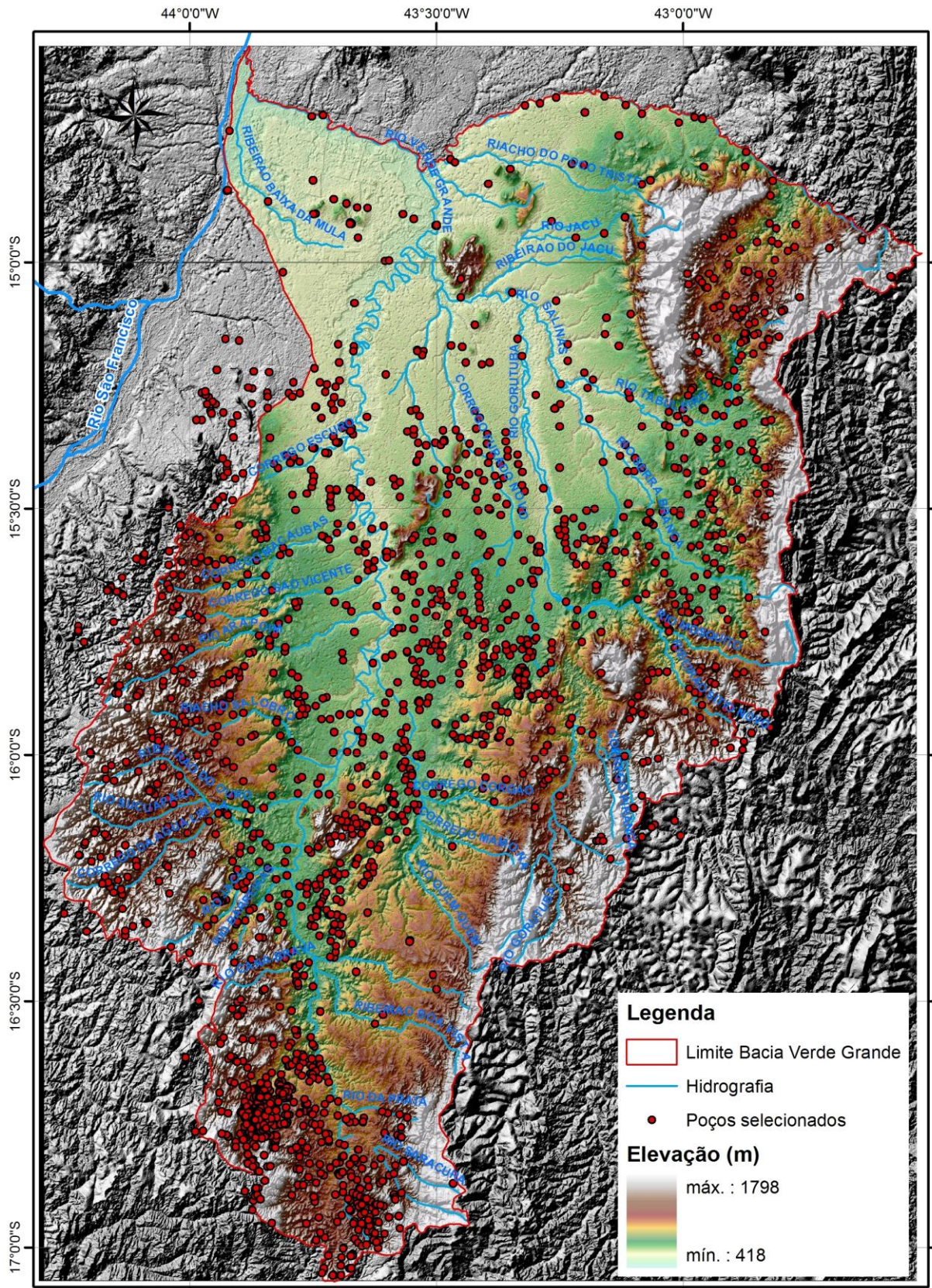


Figura 7.11: Localização dos pontos de cotas de nível d'água da Bacia do rio Verde Grande.

Fonte: Base SRTM Embrapa, Dados poços IGAM e SIAGAS.

Na área central da bacia observa-se um desvio dos fluxos subterrâneos, que vão compor as drenagens dos cursos do rio Verde Grande, à esquerda, e do rio Gorutuba, à direita. Nesse divisor é observada a presença de rochas do domínio cárstico da Formação Lagoa do Jacaré, recobertos por sedimentos detríticos e coluvionares, criando uma zona de recarga entre os rios Gorutuba e Verde Grande, justificando os valores elevados de níveis d'água.

Na borda leste, sobre o domínio fissurado, o comportamento das saídas de água está relacionado com as nascentes perenes nesse domínio, representando a maioria das vezes níveis rasos do aquífero e escoamento superficial. São representados por setas tracejadas na Figura 7.12.

Ao norte da bacia as setas de fluxo subterrâneo seguem em direção à drenagem do rio Verde Pequeno, na divisa do estado mineiro com a Bahia. Junto à foz do rio Verde grande encontram-se cotas potenciométrica da ordem de 420,0 metros, e o fluxo das águas subterrâneas nesse ponto segue o curso principal de drenagem do rio São Francisco, à esquerda da bacia.

As áreas principais de recarga coincidem com os altos cursos dos rios, ao longo dos divisores de águas superficiais. No mapa estão indicadas as principais direções de fluxo das águas subterrâneas, que convergem para as principais linhas de drenagem superficial - rios Verde Grande, Gorutuba e Verde Pequeno, evidenciando o caráter efluente desses cursos de água.

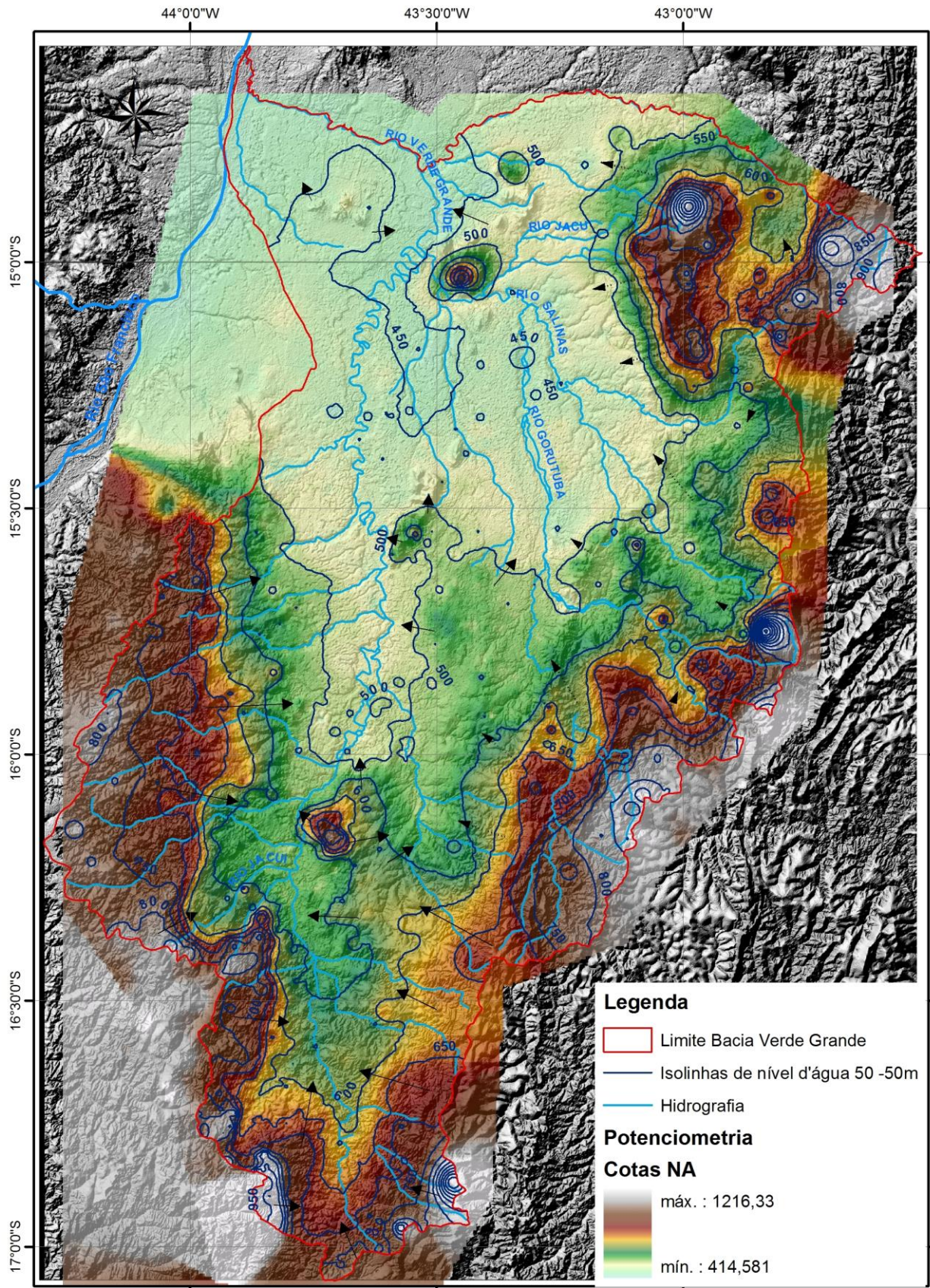


Figura 7.12: Mapa potenciométrico regional com isolinhas de 50 m.

Fonte: Base SRTM Embrapa, Dados de poços IGAM e SIAGAS.

7.3. POTENCIALIDADES DOS AQUÍFEROS

Os dados do cadastro de usos de águas subterrâneas, realizado pela CPRM, e armazenados em forma de consulta livre pelo SIAGAS (consultados em dezembro de 2011), foram utilizados como base para a determinação das potencialidades dos sistemas aquíferos definidos para a bacia do rio Verde Grande, por apresentarem uma maior distribuição na bacia. Os dados existentes de uso das águas subterrâneas na bacia registrou a presença de 4.227 pontos d'água, sendo 21 fontes naturais, 29 poços escavados (cacimba ou cisterna) e 4.176 poços tubulares. Como os poços tubulares representam a grande maioria dos pontos d'água cadastrados, esse diagnóstico foi restrito a esta categoria.

O conjunto dos dados levantados dos poços tubulares apresentou a seguinte distribuição: 68% apresentam valores de profundidade, 54% têm dados de vazão, 54% contêm informações de nível estático e 44% de nível dinâmico. Sobre a localização dos poços, 68% possuem informações sobre formação geológica.

Na Tabela 7.11 é mostrada a situação dos poços tubulares selecionados para estudo dos parâmetros, contendo uma estatística geral.

Tabela 7.11: Estatística dos parâmetros dos poços selecionados

| Estatística dos poços tubulares | Profundidade final (m) | Nível dinâmico (m) | Nível estático (m) | Capacidade específica m ³ /h. m | Vazão de estabilização (m ³ /h) | Condutividade elétrica (μS /cm) |
|-----------------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|--|--|---------------------------------|
| Média | 83,20 | 37,92 | 17,79 | 5,76 | 15,81 | 947,45 |
| Desvio padrão | 11,57 | 17,85 | 14,71 | 25,78 | 26,76 | 591,89 |
| Coefficiente de Variação % | 14% | 47% | 83% | 447% | 169% | 62% |
| Máximo | 101,00 | 52,30 | 50,00 | 600 | 360 | 8350 |
| Mínimo | 70,00 | 20,00 | 8,20 | 0,01 | 0,04 | 10 |
| Nº de poços com dados | 2876 | 1858 | 2292 | 1855 | 2295 | 2424 |

Objetivando verificar a forma de distribuição dos parâmetros hidráulicos por Domínios hidrogeológicos e climatológicos definidos, os dados dos poços tubulares foram caracterizados de acordo com a localização analisando a correlação entre os parâmetros e domínios.

7.3.1. Valores médios dos Parâmetros Hidrodinâmicas por Domínio climático

A plotagem de 1.668 poços tubulares selecionados no mapa de domínios climáticos resultou em 326 poços no Domínio semi-árido, e 1342 poços no Domínio sub-úmido. As Tabelas 7.12 e 7.13 mostram a variação dos parâmetros de profundidade do poço, níveis

d'água estático e dinâmico, vazão de estabilização durante o teste de bombeamento, e capacidade específica do aquífero. A transmissividade foi calculada de acordo com dados existentes, através da Equação 4.3.

Tabela 7.12: Estatística dos parâmetros dos poços no Domínio Semiárido

| | | Profundidade final (m) | Nível estático (m) | Nível dinâmico (m) | Vazão estabilização m ³ /h | Capacidade específica m ³ /h.m | Transmissividade m ² /dia |
|-----------|---------|------------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------------|---|--------------------------------------|
| semiárido | mín. | 35,00 | 0,00 | 3,60 | 0,00 | 0,14 | 0,05 |
| | máx. | 231,00 | 75,87 | 132,00 | 48,65 | 264,00 | 1351,35 |
| | mediana | 85,00 | 14,00 | 40,00 | 0,40 | 6,68 | 11,00 |
| | moda | 100,00 | 10,00 | 40,00 | 0,01 | 8,00 | 90,28 |
| | média | 90,85 | 17,07 | 43,82 | 2,31 | 11,11 | 64,24 |

Tabela 7.13: Estatística dos parâmetros dos poços no Domínio Sub-úmido

| | | Profundidade final (m) | Nível estático (m) | Nível dinâmico (m) | Vazão estabilização m ³ /h | Capacidade específica m ³ /h.m | Transmissividade m ² /dia |
|-----------|---------|------------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------------|---|--------------------------------------|
| sub-úmido | mín. | 21,70 | 0,00 | 1,80 | 0,00 | 0,04 | 0,01 |
| | máx. | 252,00 | 96,00 | 123,00 | 52,80 | 198,00 | 1466,67 |
| | mediana | 80,00 | 12,79 | 29,08 | 1,32 | 10,00 | 36,67 |
| | moda | 100,00 | 6,00 | 20,00 | 2,64 | 6,00 | 55,56 |
| | média | 83,37 | 17,26 | 33,59 | 3,88 | 16,78 | 107,82 |

No geral, os poços locados na zona do Domínio Sub-úmido apresentam valores mais elevados dos parâmetros para produção de água subterrânea, confirmando para região a importância da influência climática na produtividade dos poços.

7.3.2. Valores médios dos Parâmetros Hidrodinâmicas por Domínio hidrogeológico

Os 1.668 poços selecionados do banco de dados do SIAGAS com unidades litológicas foram associados aos Domínios hidrogeológicos definidos no capítulo 6. A relação das vazões de estabilização, capacidade específica dos poços por Domínio aquífero é observada na Tabela 7.14.

Os valores estatísticos dos dados dos poços tubulares permitem observar o comportamento hidrodinâmico em cada domínio hidrogeológico. Os valores de moda para cada domínio são os que representam melhor a faixa de frequência dos valores para aquele aquífero, com exceção do Domínio Granular, que obteve somente valor de moda para o nível estático dos poços.

Dentre os parâmetros hidrodinâmicos dos poços Capacidade específica, Vazão de estabilização e Transmissividade, o Domínio Cárstico obteve os maiores valores modais comparado aos Domínios fissurado-cárstico e fissurado.

Em outra direção, os valores de Nível Estático e Nível Dinâmico para o Domínio Cárstico foram menores, ou seja, de menor profundidade.

Os Domínios aquíferos granular e cárstico apresentaram maiores valores de capacidades específicas, o que demonstra a mais alta capacidade de produção dentre os demais Domínios. No domínio granular, a maioria dos poços se encontra no Grupo Urucua. Os Domínios aquíferos fissurado e fissurado-cárstico apresentaram ambos os valores de vazões bem menores que os demais sistemas, condizente com a sua mais baixa capacidade de armazenamento.

Tabela 7.14: Estatística dos parâmetros dos poços por Domínio aquífero na bacia do rio Verde Grande.

| Domínio hidrogeológico | | Profundidade final (m) | Nível estático (m) | Nível dinâmico (m) | Capacidade específica m ³ /h.m | Vazão estabilização m ³ /h | Transmissividade m ² /dia |
|--------------------------------|---------|------------------------|--------------------|--------------------|---|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Cárstico (911 poços) | min. | 27.00 | 0.00 | 1.80 | 0.00 | 0.20 | 0.06 |
| | máx. | 183.00 | 96.00 | 123.00 | 52.80 | 198.00 | 55.00 |
| | mediana | 80.00 | 11.00 | 25.00 | 1.76 | 13.20 | 3.67 |
| | moda | 100.00 | 6.00 | 15.00 | 4.40 | 17.60 | 4.89 |
| | média | 81.27 | 15.12 | 29.74 | 4.73 | 20.04 | 5.57 |
| Fissurado-cárstico (542 poços) | min. | 38.00 | 0.00 | 3.60 | 0.01 | 0.40 | 0.11 |
| | máx. | 252.00 | 94.00 | 132.00 | 48.65 | 264.00 | 73.33 |
| | mediana | 88.78 | 19.50 | 38.00 | 0.73 | 6.58 | 1.83 |
| | moda | 100.00 | 20.00 | 40.00 | 0.05 | 6.00 | 1.67 |
| | média | 91.94 | 22.84 | 41.65 | 2.73 | 11.43 | 3.18 |
| Fissurado (190 poços) | min. | 21.70 | 0.00 | 5.25 | 0.00 | 0.04 | 0.01 |
| | máx. | 150.00 | 80.00 | 101.00 | 6.00 | 41.08 | 11.41 |
| | mediana | 80.00 | 6.95 | 46.34 | 0.15 | 4.07 | 1.13 |
| | moda | 60.00 | 10.00 | 28.00 | 0.02 | 6.00 | 1.67 |
| | média | 81.21 | 12.14 | 46.48 | 0.47 | 6.32 | 1.76 |

| | | | | | | | |
|---------------------|---------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Granular (25 poços) | min. | 48.00 | 0.00 | 4.88 | 0.02 | 1.40 | 0.39 |
| | máx. | 178.00 | 50.00 | 82.50 | 13.47 | 72.00 | 20.00 |
| | mediana | 84.00 | 7.25 | 21.85 | 0.86 | 8.64 | 2.40 |
| | moda | 84.00 | 14.00 | N/D | N/D | N/D | N/D |
| | média | 88.08 | 10.69 | 34.60 | 3.35 | 19.41 | 5.39 |

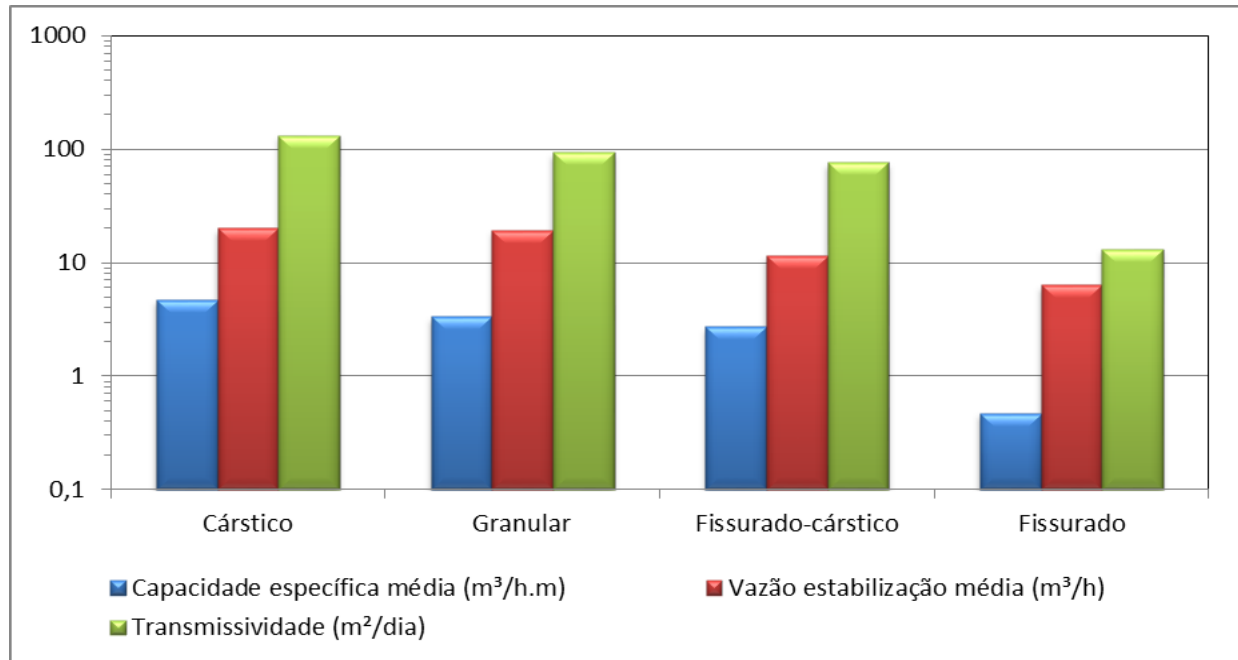


Figura 7.13: Valores médios dos Parâmetros hidráulicos por Domínio hidrogeológico

Os valores estatísticos refletiram o esperado, justificando o sucesso de aplicação do método estimativo de transmissividade. Os maiores valores médios de transmissividade estão no Domínio aquífero cárstico, seguido do Domínio granular, fissurado-cárstico e por último o fissurado.

Abaixo, são mostrados os valores dos parâmetros hidrodinâmicos de Capacidade Específica e de vazão de estabilização dos poços por domínios climáticos e separados por aquíferos (Figuras 7.14, 7.15 e 7.16). Os valores representados em gráfico Box-plot são os valores de máximo, 3º quartil (75%), Moda, Mediana, 1º quartil (25%) e mínimo. Nota-se que, pela não existência de valores repetidos, o Domínio aquífero granular não foi demonstrado em moda no gráfico.

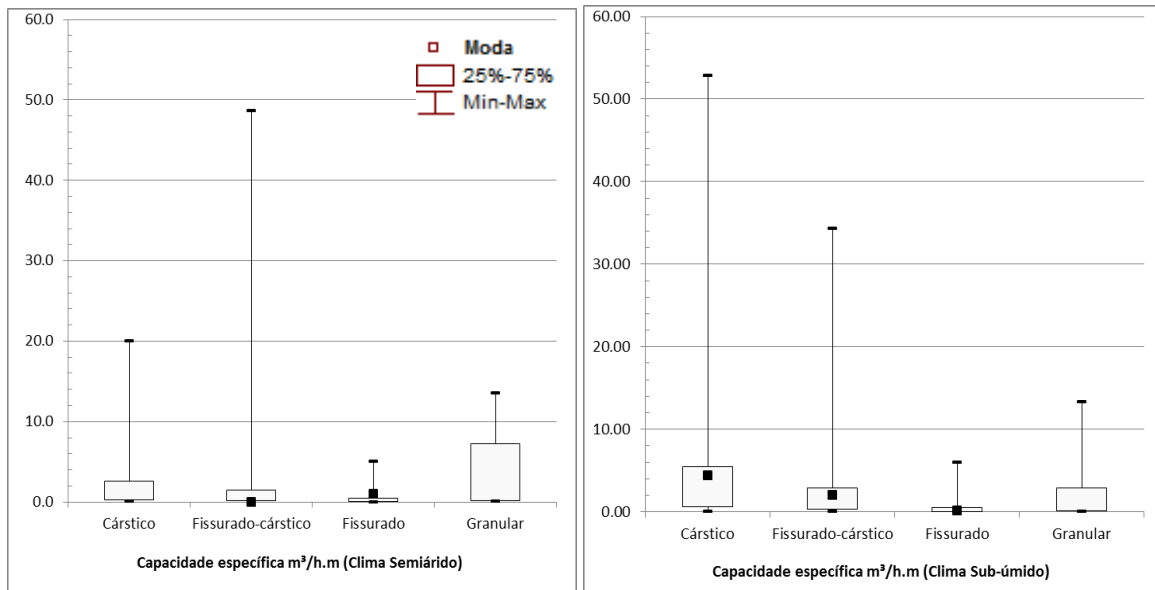


Figura 7.14: Gráfico Box-plot para Capacidade específica dos poços em cada domínio climático

Os valores médios e de moda de capacidade específica dos poços analisados são maiores no clima sub-úmido para os domínios cársticos, fissurados e fissurado-cárstico. No domínio granular observa-se que os únicos dois poços localizados em depósitos detríticos/lateríticos se encontram em domínio semiárido e possuem vazões altas (por se localizarem nas margens dos rios), o que ocasionou elevação das médias para esse grupo.

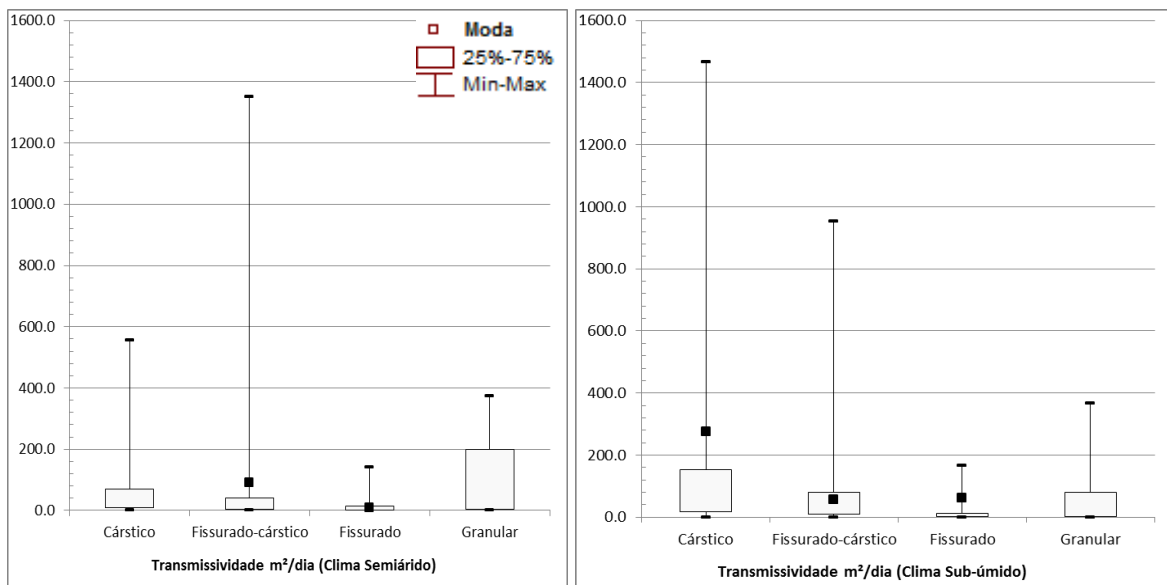


Figura 7.15: Gráfico Box-plot para Transmissividade dos poços em cada domínio climático

A transmissividade média para o Domínio cárstico mostrou-se mais elevada para o domínio sub-úmido, o que era esperado. O Domínio aquífero fissurado-cárstico possui média de valores de transmissividade maiores no clima sub-úmido, porém alguns valores maiores foram observados no clima semiárido que são representados pela moda, e esses

valores são relacionados a poços de maiores profundidades e de espessura. O valor máximo representado no gráfico Boxplot para esse domínio no clima semiárido é referente a um poço com vazão de 269 m³/h, ou seja, um poço perfurado em uma cavidade cárstica de grande transmissividade.

Para o fissurado, os valores médios foram muito próximos nos dois domínios climáticos, porém a moda está mais representativa no clima sub-úmido, condizendo com a influência do clima sob esse domínio aquífero.

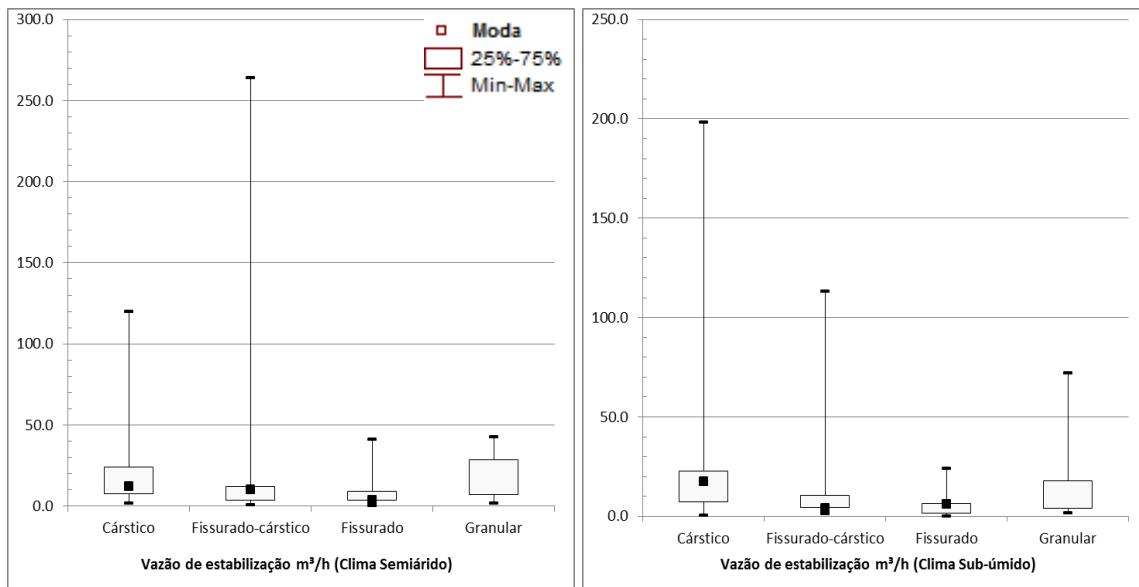
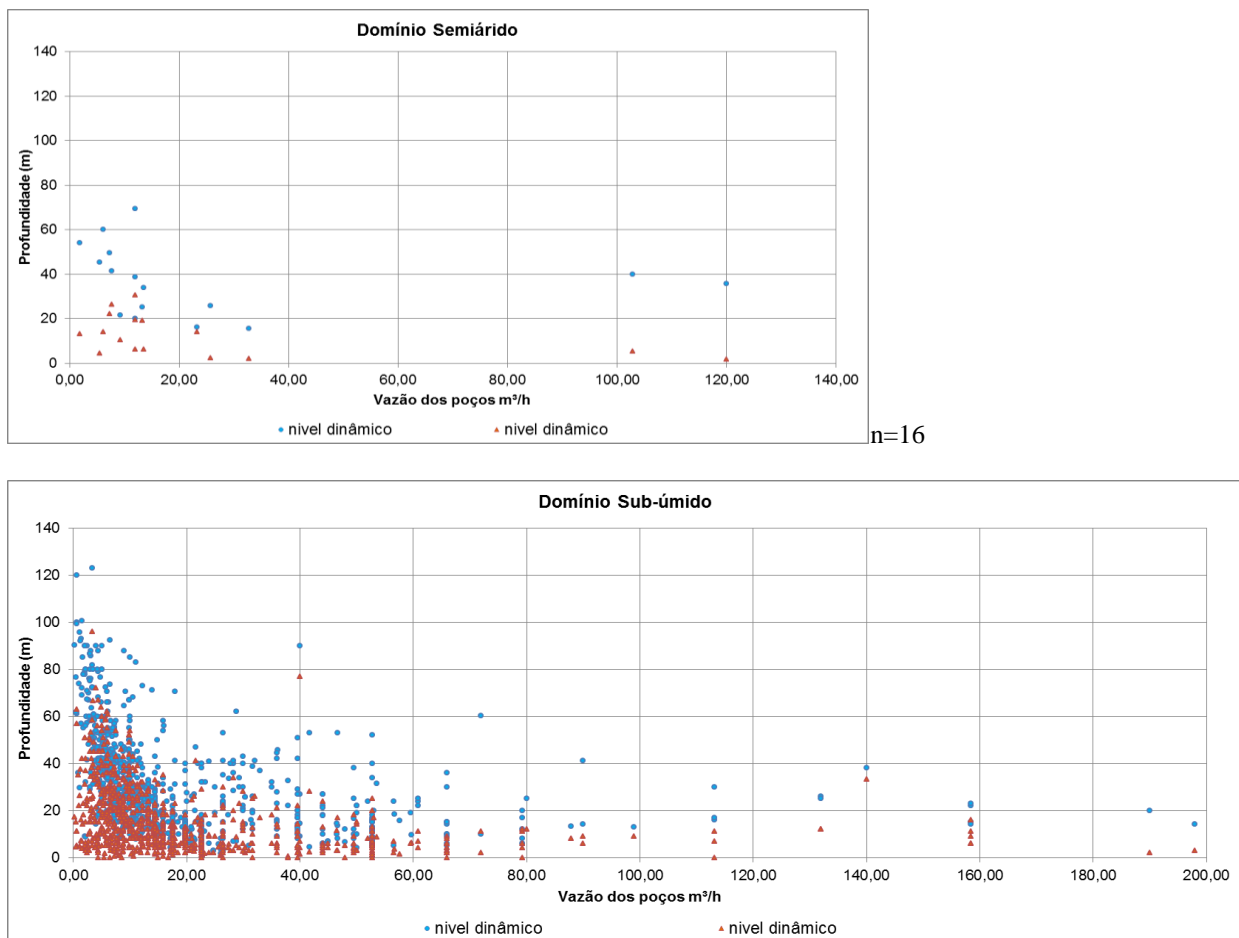


Figura 7.16: Gráfico Box-plot para Vazão de estabilização dos poços em cada domínio climático

As vazões de estabilização em ambos os gráficos acima mostram médias próximas entre os aquíferos nos dois domínios climáticos. No clima sub-úmido os poços do domínio cárstico apresentam os maiores valores médios e de moda que no clima semiárido. Para os domínios fissurado e fissurado-cárstico, as médias dos valores de vazão foram muito próximas, com um valor máximo muito alto para o domínio fissurado-cárstico no semiárido, representado pelo poço de vazão de 269 m³/h, já mencionado anteriormente. O aquífero granular também possui a particularidade já mencionada anteriormente, dos poços em depósitos detríticos/lateríticos próximos de rios, que aumentam os valores médios de vazões de estabilização no domínio semiárido.

Nos gráficos a seguir puderam-se identificar possíveis correlações existentes entre a vazão e parâmetros como profundidade de nível estático (NE) e nível dinâmico (ND) dentro dos Domínios hidrogeológicos.

Para o Domínio cárstico (Figura 7.17), a profundidade dos níveis d'água estáticos e dinâmicos são maiores nos intervalos de 0-40,00 m³/h para o semiárido e de 0-80,00 m³/h no domínio sub-úmido. As vazões são maiores nos domínio sub-úmido para os aquíferos cársticos da bacia, além de concentrar a maioria dos poços tubulares nesse domínio climático. A relação de vazão pelo rebaixamento dos níveis d'água dos poços no domínio cárstico é maior e bem mais distribuída no clima sub-úmido, observando-se os maiores rebaixamentos em vazões de até 40m³/h. No clima semiárido, os poços possuem maiores rebaixamentos entre o intervalo de 0-20 m³/h. Em ambos os climas, os poços com vazões superiores a 100 m³/h apresentam rebaixamentos inferiores a 40 m. No caso do clima sub-úmido, onde se concentram a maioria dos poços em aquífero cárstico, não é observado confinamento. A relação de maiores rebaixamentos de níveis d'água em vazões menores se deve a presença de carstificação no local dos poços, pois quando maior e mais conectado é a carstificação, maior será a vazão e menor será seu rebaixamento devido a maior transmissividade.

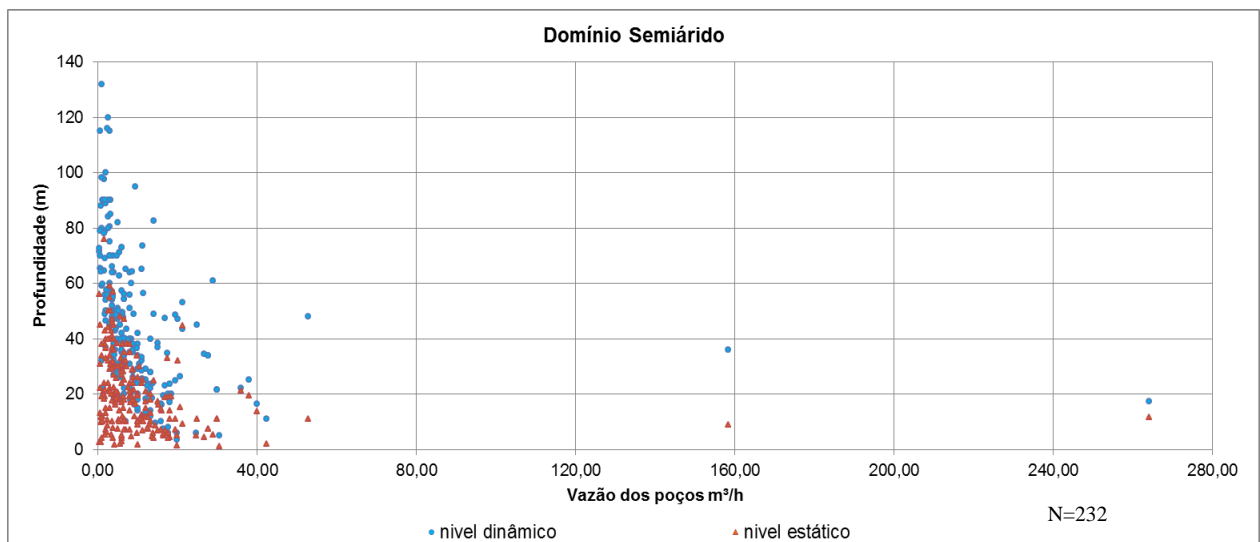


N=895

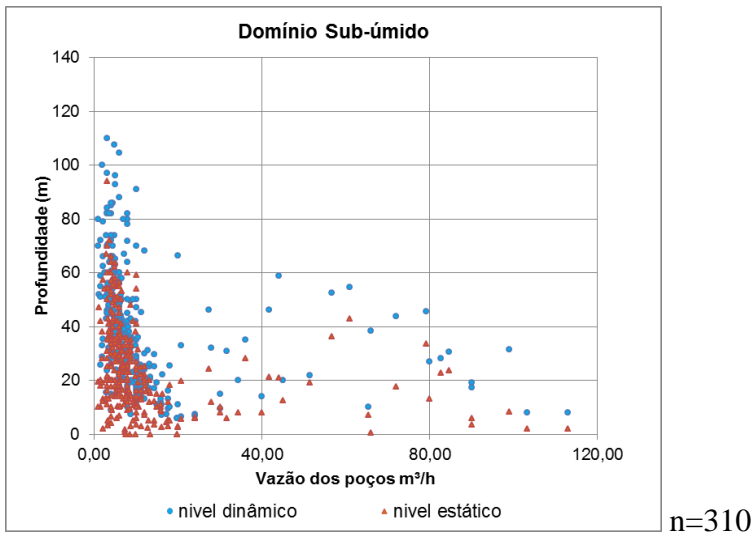
Figura 7.17: Relação da Vazão com os Níveis Hidráulicos (NE e ND) para Domínio cárstico.

No Domínio fissurado-cárstico (Figura 7.18), observa-se um grande número de poços com rebaixamentos de níveis d'água grandes até o intervalo de vazões de 20m³/h em ambos os climas abaixo apresentados. Vazões entre 40-80 m³/h são mais frequentemente observadas no domínio climático sub-úmido, enquanto que valores muito altos e isolados são observados no clima semiárido. Isso indica alguns poços bem localizados em falhas ou carstificações bem evoluídas no norte da bacia, onde o clima é semiárido. O rebaixamento do nível d'água também é mais acentuado no clima semiárido, indicando a necessidade de poços mais profundos, ou até mesmo de uma recarga mais lenta nessa região. Mais de 80% dos poços totais no Domínio fissurado-cárstico concentram-se abaixo de 40,00 m³/h.

Pela hidrogeologia descrita do domínio fissurado-cárstico, a elevada frequência de intercalações carbonáticas nos pelitos é presente em toda a vertente ocidental do vale do rio Verde Grande, local onde os poços de vazões maiores se encontram (nos municípios de Varzelândia e Verdelândia, dentro do clima semiárido).



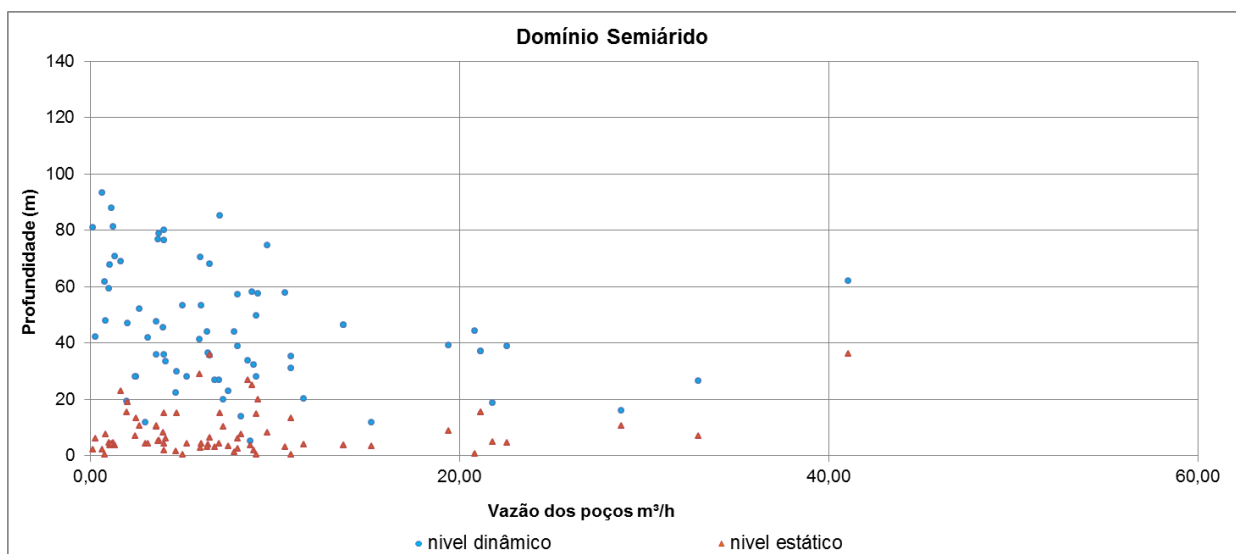
n=232



n=310

Figura 7.18: Relação da Vazão com os Níveis Hidráulicos (NE e ND) para Domínio fissurado-cárstico.

Para o Domínio fissurado, as vazões concentram-se na faixa dos 0-20,00 m³/h para ambos os domínios climáticos, sendo considerado um domínio de baixas vazões médias. Observa-se que para esse domínio hidrogeológico a variação climática na correlação com as vazões e níveis d'água não se mostrou influente (Figura 7.19). Essa grande variação se mostra esperada num domínio fissurado, visto constituir um meio totalmente anisotrópico. Nota-se bem a influência do domínio aquífero fissurado nos níveis d'água, onde os níveis estáticos dos poços são bem rasos (entre 5-10 m) e no momento de exploração os níveis caem drasticamente, atingindo 40 a 80 m de profundidade, mostrando que a permeabilidade é menor, conseqüentemente sua transmissividade.



n=71

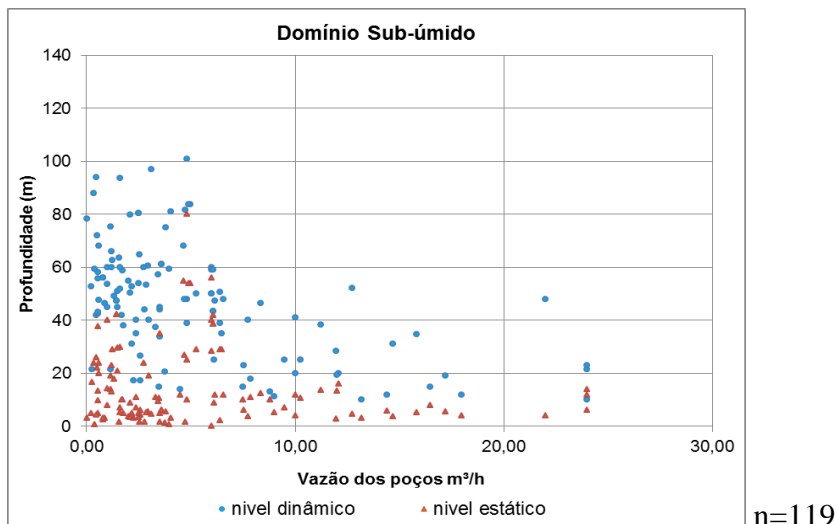
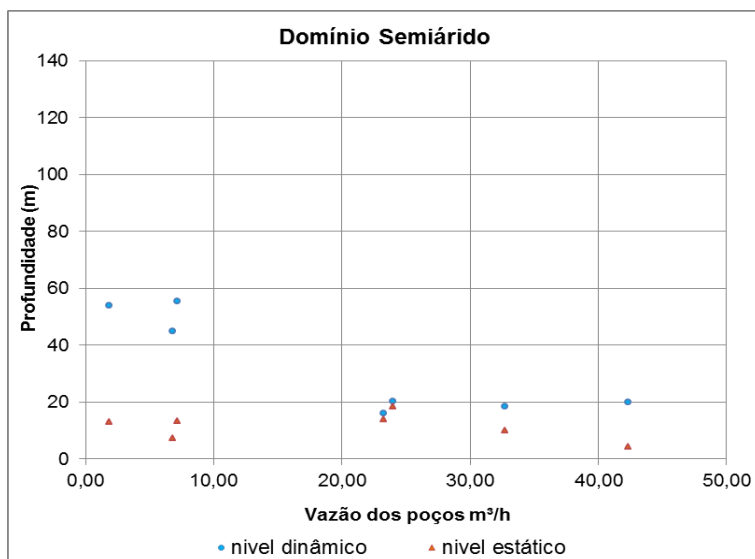
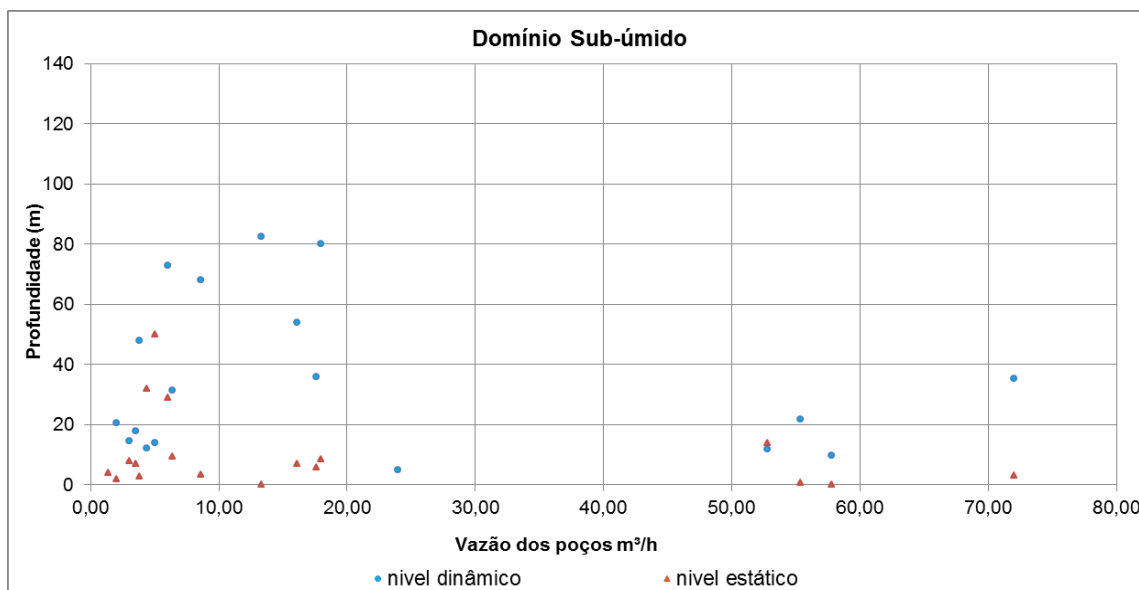


Figura 7.19: Relação da Vazão com os Níveis Hidráulicos (NE e ND) para Domínio fissurado

O Domínio granular apresenta o menor número de poços perfurados, pois a característica desses aquíferos é de serem camadas que auxiliam na recarga dos aquíferos subjacentes, apresentando pouco armazenamento. Alguns desses poços se encontram em terrenos de beira de rios, em depósitos detrítico/lateríticos. Dentre os níveis d'água estáticos, as maiores profundidades concentram-se no clima sub-úmido da bacia, assim como as maiores vazões. Isso indica que a recarga direta beneficiada pelo clima mais úmido sobre esses aquíferos permitem poços mais produtivos. Os níveis estáticos dos aquíferos granulares no semiárido não ultrapassam a profundidade de 20 m, e ao serem rebaixados, os níveis dinâmicos não ultrapassam a profundidade de 60 m (Figura 7.20).



n=7



n=18

Figura 7.20: Relação da Vazão com os Níveis Hidráulicos (NE e ND) para Domínio granular

Foram comparados os dados de capacidade específica média e transmissividade média dos Domínios hidrogeológicos em cada zona climática (Tabela 7.15).

Tabela 7.15: Valores médios de capacidade específica e transmissividade para os domínios combinados

| | Cárstico Semiárido | Cárstico Sub-úmido | Fiss.-cárstico Semiárido | Fiss.- cárstico Sub-úmido | Fissurado Semiárido | Fissurado Sub-úmido | Granular Semiárido | Granular Sub-úmido |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Capacidade específica média (m³/h.m) | 4,73 | 4,76 | 2,77 | 2,69 | 0,47 | 0,47 | 2,94 | 4,42 |
| Transmissividade média (m²/dia) | 79,60 | 132,39 | 77,06 | 74,71 | 13,08 | 13,23 | 122,91 | 81,60 |
| Número de poços N | 16 | 895 | 232 | 310 | 71 | 119 | 7 | 18 |

Analisando os resultados acima, as capacidades específicas médias no Domínio cárstico são maiores no domínio sub-úmido, assim como a transmissividade média, que além de ser maior nesse domínio climático é a maior dentre todos os domínios aquíferos (132,39 m²/dia). Justifica-se esses altos valores aos processos de carstificação mais intensos nesse Domínio hidrogeológico devido à presença maior das rochas da Formação Lagoa do Jacaré e a contribuição do clima sub-úmido na recarga desses aquíferos.

No Domínio fissurado-cárstico os valores médios para a capacidade específica e transmissividade desses aquíferos são ligeiramente mais altos no semiárido que no sub-

úmido, sendo justificado pela predominância de grandes intercalações cársticas nos pelitos mais presentes na área ocidental da bacia do rio Verde Grande que está sob o domínio semiárido.

Os valores calculados para o Domínio fissurado tanto no semiárido quanto no sub-úmido são semelhantes, com pouquíssima variação positiva na transmissividade no domínio sub-úmido, representando o caráter anisotrópico e de baixa transmissividade dos aquíferos fissurados na bacia.

Os aquíferos do Domínio granular apresentaram valores altos de capacidade específica média no semiárido. A transmissividade média também é maior no clima semiárido para esse domínio (122,91 m²/dia) devido a existência de dois poços em depósitos sedimentares detríticos/lateríticos (aluviões) próximos das calhas de rios perenes na bacia, o que aumenta a média para a transmissividade desse aquífero na região semiárida.

7.4. CÁLCULO DO ESCOAMENTO DE BASE

Baseando-se no conceito de que os períodos de recessão das hidrógrafas de vazão de uma bacia refletem as características dos aquíferos bem como o regime de fluxo e armazenamento subterrâneos, foi adotada a técnica de decomposição dos hidrogramas de escoamento total para separação do escoamento direto do escoamento de base. Para tal cálculo, utilizou-se o método automatizado de separação de hidrógrafas.

O procedimento foi automatizado com o uso do programa Baseflow (ARNOLD *et al.*, 1995) e aplicado aos dados das 4 estações fluviométricas contidas na bacia (Tabela 7.16) As bacias de contribuições de cada estação estão mostradas na Figura 7.21.

Tabela 7.16: Dados das estações fluviométricas utilizadas para cálculo do escoamento subterrâneo.

| Código | Estação | Cidade | UTM X | UTM Y | Área de drenagem (km ²)* | Altitude | Curso d' água | Período medido | Operadora |
|----------|------------------|----------------|--------|---------|--------------------------------------|----------|------------------|----------------|-----------|
| 44600000 | Ponte de Rodagem | Montes Claros | 638556 | 8145797 | 1040 | 573 | Rio Verde Grande | 1969 a 1975 | ANA |
| 44750000 | Gorutuba | Janaúba | 680303 | 8252472 | 2460 | 494 | Rio Gorutuba | 1969 a 1988 | ANA |
| 44670000 | Colônia do Jaíba | Jaíba | 642198 | 8303516 | 12200 | 450 | Rio Verde Grande | 1962 a 2010 | CPRM |
| 44950000 | Boca da Caatinga | Matias Cardoso | 657197 | 8365047 | 29400 | 414 | Rio Verde Grande | 1969 a 2008 | ANA |

Fonte: HidroWeb

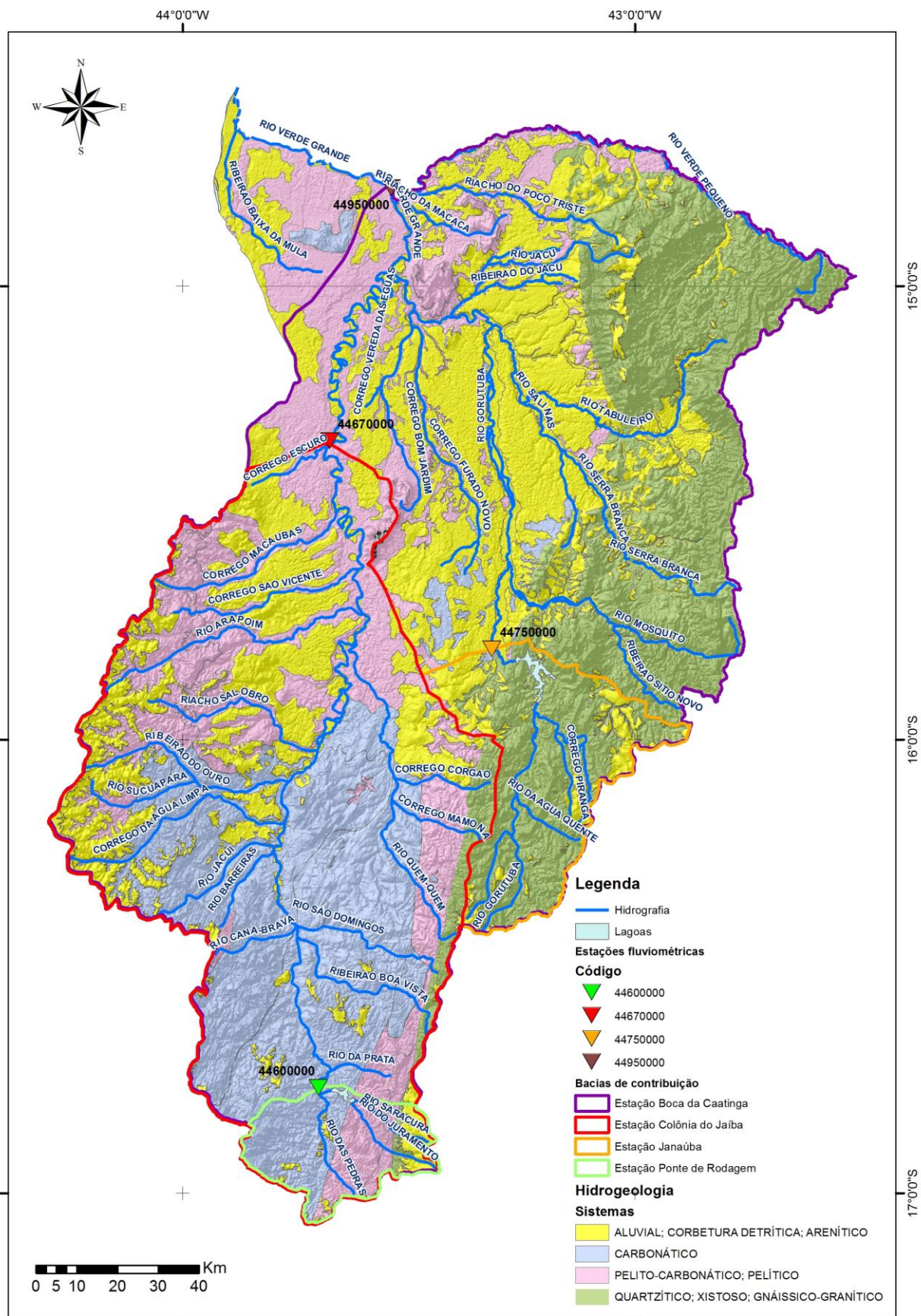


Figura 7.21: Mapa de localização das estações fluviométricas e suas bacias de contribuição.

Fonte: Bases SRTM Embrapa, ANA (2011), CPRM (2007).

O resultado (Output) para cada série de dados de vazão calculado pelo programa BASEFLOW é mostrado na Tabela 7.17. O programa realiza três interações para chegar ao valor calculado para cada série.

O valor obtido em Baseflow FR1, FR2 e FR3 é a fração da vazão do escoamento superficial da bacia que é contribuída pelo escoamento subterrâneo. Sendo assim, os valores obtidos correspondem a uma porcentagem do fluxo superficial naquele trecho do rio.

As estações fluviométricas Ponte de Rodagem e Gorutuba se encontram no Domínio climático sub-úmido, e as estações Colônia do Jaíba e Boca da Caatinga no Domínio semiárido.

A estação com menor contribuição subterrânea no escoamento fluvial é a Ponte de Rodagem, com 24%, seguida de Boca da Caatinga, com 46%, e Gorutuba e Colônia da Jaíba, com 49 e 50% respectivamente. Numa primeira análise, essas porcentagens de escoamento de base não apresentam correlação climática dentro da bacia, mas a estação de Montes Claros se localiza em uma região elevada, com calha de drenagem do rio Verde Grande localizada em cotas topográficas mais altas, sendo o escoamento superficial mais atuante que a recarga localizada na cabeceira desse trecho.

Tabela 7.17: Resultados de escoamento base para cada estação (calculados pelo BASEFLOW).

| Nome das Variáveis | Descrição | Ponte de Rodagem, Montes Claros | Colônia do Jaíba, Jaíba | Gorutuba, Janaúba | Boca da Caatinga, Matias Cardoso |
|--------------------|--|---------------------------------|-------------------------|-------------------|----------------------------------|
| Baseflow Fr1 | Fração do fluxo principal contribuído pelo escoamento de base que é estimando no 1º passo. (%) | 44,0% | 76,0% | 77,0% | 73,0% |
| Baseflow Fr2 | Fração do fluxo principal contribuído pelo escoamento de base que é estimando no 2º passo. (%) | 29,0% | 61,0% | 61,0% | 57,0% |
| Baseflow Fr3 | Fração do fluxo principal contribuído pelo escoamento de base que é estimando no 3º passo. (%) | 24,0% | 50,0% | 49,0% | 46,0% |
| NPR | Número de recessões individuais do escoamento de base usado para calcular a curva principal de recessão. | 6 | 47 | 42 | 50 |
| Alpha Factor | Constante de recessão do escoamento de base | 0,1046 | 0,0357 | 0,0679 | 0,0733 |
| Baseflow days | Dias de escoamento de base. Número de dias por ciclo de recessão calculado. | 219,8 | 64,4 | 33,9 | 31,3 |

Fonte: Calculado a partir do BASEFLOW.

A vazão de escoamento superficial de cada estação foi calculada sobre a média de todos os anos monitorados pelas estações fluviométricas fornecido pelo arquivo de saída (output) do programa BASEFLOW. Para definição do escoamento de base na bacia do rio Verde

Grande, foi considerado o valor de interação do 3º passo, que representa a última interação realizada pelo programa. Os valores calculados de vazão de escoamento superficial e subterrâneo para a bacia são apresentados na Tabela 7.18, juntamente com a porcentagem utilizada referente ao escoamento de base naquela estação fluviométrica.

Tabela 7.18: Vazões de escoamento superficial e subterrâneo para cada estação fluviométrica.

| Estações | Fração calculada no BASEFLOW % | Vazão Escoamento superficial (dado pelo BASEFLOW) m³/s | Vazão Escoamento de base m³/s |
|----------------------------------|---------------------------------------|---|--------------------------------------|
| Ponte de Rodagem, Montes Claros | 24,0% | 1,60 | 0,348 |
| Colônia do Jaíba, Jaíba | 50,0% | 10,75 | 5,375 |
| Gorutuba, Janaúba | 49,0% | 6,17 | 3,013 |
| Boca da Caatinga, Matias Cardoso | 46,0% | 26,78 | 12,318 |

Fonte: Calculado a partir do BASEFLOW.

Analisando os valores de escoamento subterrâneo nas 4 estações, o menor fluxo se encontra na estação mais a montante do curso d'água do Verde Grande, o que é esperado devido a pouca contribuição de drenagens mais caudalosas nos trechos altos da cabeceira do rio. Ao chegar à estação fluviométrica de Colônia do Jaíba, o fluxo de contribuição subterrânea aumenta consideravelmente, aproximadamente 15 vezes mais numa área de drenagem 11 vezes maior (proporção de 1,3:1). Já a relação entre o aumento da vazão do escoamento subterrâneo da estação de Boca da Caatinga com a estação de Colônia do Jaíba é muito próxima: aproximadamente 2,5 vezes maior o fluxo subterrâneo na estação mais a jusante, assim como o aumento da área drenada dessa estação, maior em 2,4 vezes (proporção 1:1). Isso indica que há uma influência climática na contribuição do escoamento subterrâneo para o escoamento do rio Verde Grande, cerca de 30% maior no domínio sub-úmido, em conjunto com a predominância de níveis carbonáticos na vertente ocidental da bacia.

Os cálculos de vazão específica superficial para cada estação fluviométrica se encontram na Tabela 7.19 com os valores transformados do deflúvio para o cálculo do balanço hídrico, em mm/ano.

Tabela 7.19: Vazões específicas superficiais da série histórica utilizada.

| Estações | Deflúvio médio anual m ³ /s | Área Drenada km ² | Deflúvio em mm/ano | Vazão Específica L/s km ² |
|-------------------------------------|---|---------------------------------|-----------------------|---|
| Ponte de Rodagem, Montes Claros | 1,6 | 1.040 | 48,52 | 1,54 |
| Colônia do Jaíba, Jaíba | 10,75 | 12.200 | 27,79 | 0,88 |
| Gorutuba, Janaúba | 6,17 | 2.460 | 79,10 | 2,51 |
| Boca da Caatinga, Matias Cardoso | 26,78 | 29.400 | 28,73 | 0,91 |

Quanto mais importante a contribuição superficial, menor é a contribuição subterrânea. O relevo mais acidentado a montante das estações Ponte de Rodagem e Gorutuba parecem influenciar o escoamento superficial e a menor contribuição subterrânea.

Para Pereira *et al.* (2005), a vazão específica média de longa duração calculada para a área de drenagem total da bacia do rio Verde Grande foi de 1,07 L s⁻¹ km². Comparando com os valores calculados, para a mesma estação de Matias Cardoso, localizada mais a jusante da bacia, obteve-se valor de 0,91 L s⁻¹ km², menor em 8%.

7.5. ESTIMATIVA DA RECARGA NA BACIA

Os métodos aplicados na estimativa da recarga na bacia do rio Verde Grande foram do Balanço Hídrico, o Método de Recessão de Hidrogramas (conhecido como Método de Maillet) e o Método de Meyboom.

7.5.1. Método do cálculo de recarga pelo Balanço Hídrico

A determinação da recarga na bacia do rio Verde Grande utiliza-se da equação básica do balanço hídrico (FEITOSA & MANOEL FILHO, 2000) considerando a precipitação média anual (P), a evapotranspiração real média anual (ETR) e o escoamento subterrâneo (ES), onde isolando o coeficiente de infiltração (I), obtém-se o valor correspondente a mesma, ou seja, ao volume que contribuirá para a recarga do aquífero na bacia (Eq. 7.2).

$$I = P - ETR - ES \quad (\text{Eq. 7.2})$$

Considerando os dois domínios climáticos definidos no capítulo 7, a análise da infiltração ou recarga será aplicada separadamente para cada domínio climático, no intuito de identificar a influência climática na recarga aquífera. Dessa forma os valores necessários para o cálculo estão mostrados na Tabela 7.20.

Para os valores de precipitação (P) e evapotranspiração real (ETR) foram considerados os valores médios obtidos em cada estação climatológica, adotando os valores do balanço

hídrico calculados para as estações Climatológicas de Montes Claros e Janaúba no domínio sub-úmido, e das estações de Jaíba e Espinosa no domínio semiárido. Assim como para o escoamento subterrâneo, foram adotados os valores obtidos nas estações fluviométricas de Ponte de Rodagem em Montes Claros, e Colônia do Jaíba em Jaíba para o escoamento subterrâneo (ES).

Para a bacia como um todo, utilizaram-se os valores médios de ETR calculados no balanço hídrico climatológico sequencial decendial. O valor de precipitação (P) foi o obtido pelo método das isoietas, e o valor de saída do escoamento de base da estação de Boca da Caatinga.

A relação da infiltração (I) sobre a precipitação média anual (P) no domínio sub-úmido é de 23,6% da chuva precipitada que infiltra e recarrega os aquíferos da bacia. Numa primeira análise, essa relação indica que para a bacia do rio Verde Grande, o domínio climático determina a área de recarga dos aquíferos existentes na região, sendo de grande importância para a existência de cursos perenes ao longo da área de abrangência da bacia. A relação da infiltração (I) sobre a precipitação média anual (P) no Domínio semiárido é de 0,037 ou **3,7%**, o que indica uma recarga muito menor do aquífero por meio de infiltração das chuvas comparado ao domínio sub-úmido.

Tabela 7.20: Valores médios anuais dos parâmetros do balanço hídrico.

| Variáveis | Domínio sub-úmido | Domínio semiárido | Bacia total |
|-----------|-------------------|-------------------|-------------|
| P (mm) | 909 | 649 | 870 |
| ETR (mm) | 676 | 611,4 | 643,7 |
| ES (mm) | 18,07 | 13,87 | 13,21 |
| I (mm) | 214,93 | 23,73 | 213,09 |
| I (%) | 23,6% | 3,7% | 24,5% |

O valor da infiltração sobre a precipitação para a bacia como um todo é de 0,245 ou 24,5%, muito próximo do valor obtido na área de clima mais úmido na bacia.

A recarga natural, desconsiderando as explorações subterrâneas na bacia, é de 4% (3,7% de P) no domínio semiárido e de 24% no domínio sub-úmido (23,6% de P). Esse resultado, embora de pouca precisão, aponta para a importância da zona sub-úmida para a recarga aquífera e sustentabilidade hídrica do fluxo de base. Foram calculados através do método do Balanço Hídrico para a bacia, que não considerou a extração ou exploração de água subterrânea existente.

A exploração de água subterrânea baseada nos valores de outorga do IGAM até dez/2011 são de 15,6 mm/ano no domínio semiárido, equivalente a 112% do escoamento

subterrâneo, e no domínio sub-úmido as explorações chegam a 4,8 mm/ano, equivalente a 27% do escoamento subterrâneo nesse domínio. Analisando essa comparação, nota-se que as explorações em ambiente semiárido comprometem todo o escoamento subterrâneo e também a recarga dos aquíferos, caracterizando assim uma região de superexploração.

O método de Balanço Hídrico foi capaz de mostrar a variação das recargas nos ambientes semiárido e sub-úmido para a bacia do rio verde Grande, sendo posteriormente comparado aos valores obtidos pelos outros métodos para o cálculo de recarga.

7.5.2. Método de Recessão de Hidrogramas (Método de Maillet)

Foram confeccionados gráficos *semilog* para os hidrogramas das estações fluviométricas de Montes Claros, Janaúba, Jaíba e Matias Cardoso. O intervalo escolhido para o cálculo do gráfico *semilog* (Figuras 7.22, 7.23, 7.24 e 7.25) compreende os anos de 1969 a 1975, período de monitoramento comum a todas as estações.

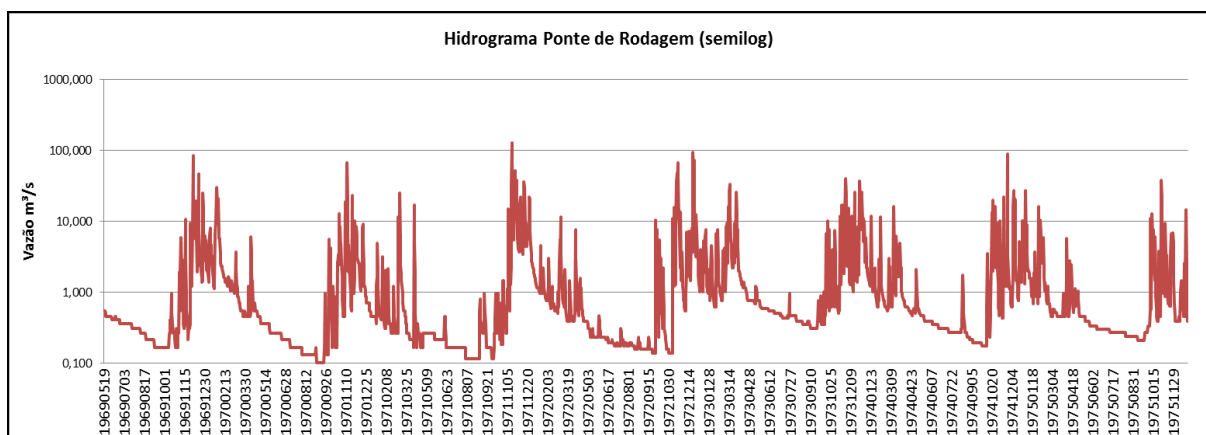


Figura 7.22: Gráfico *Semilog* para a Estação Ponte de Rodagem, em Montes Claros. Data de aquisição: maio de 1969 a dezembro de 1975.



Figura 7.23: Gráfico *Semilog* para a Estação Janaúba. Data de aquisição: maio de 1969 a dezembro de 1975



Figura 7.24: Gráfico *Semilog* para a Estação Colônia do Jaíba, em Jaíba. Data de aquisição: janeiro de 1969 a dezembro de 1975



Figura 7.25: Gráfico *Semilog* para a estação Boca da Caatinga, em Matias Cardoso. Data de aquisição: maio de 1969 a dezembro de 1975

Para o cálculo da recarga através da equação da curva de recessão (Equações 4.6 e 4.7) foram adotados os seguintes valores extraídos visualmente dos gráficos *Semilog* de cada estação fluviométrica (Figuras 7.22 a 7.25), para cada ano de monitoramento. Extraídos da equação o valor de α , calculou-se o Volume total infiltrado na bacia durante um ano, V , para um ano (Tabelas 7.21 a 7.24).

Tabela 7.21: Valores obtidos para a estação Ponte de Rodagem, em Montes Claros.

| Ponte de Rodagem Ano | Valores de Q_0 (m^3/s) | Valores de Q_t (m^3/s) | Tempo (dias) | Log Q_0/Q_t | α | V (m^3) |
|----------------------|------------------------------|------------------------------|--------------|---------------|----------|---------------|
| 1970 | 1,58 | 0,134 | 182 | 1,07155 | 0,00589 | $2,32. 10^7$ |
| 1971 | 0,884 | 0,117 | 223 | 0,8783 | 0,00394 | $1,94. 10^7$ |
| 1972 | 2,48 | 0,159 | 248 | 1,19305 | 0,0048 | $4,45. 10^7$ |
| 1973 | 2,2 | 0,391 | 167 | 0,75024 | 0,00449 | $4,23. 10^7$ |
| 1974 | 2,68 | 0,216 | 251 | 1,09368 | 0,00436 | $5,31. 10^7$ |
| 1975 | 2,02 | 0,24 | 258 | 0,92514 | 0,00359 | $4,87. 10^7$ |
| | | | | | Média | $3,85. 10^7$ |

Tabela 7.22: Valores obtidos para a estação de Janaúba.

| Estação Janaúba Ano | Valores de Q ₀ (m ³ /s) | Valores de Qt (m ³ /s) | Tempo (dias) | Log Q ₀ /Qt | α | V (m ³) |
|---------------------------|--|--------------------------------------|-----------------|------------------------|--------|-----------------------|
| 1970 | 4,31 | 0,5 | 267 | 0,9355 | 0,0035 | 1,1. 10 ⁸ |
| 1971 | 4,72 | 0,42 | 231 | 1,0507 | 0,0045 | 9,0. 10 ⁷ |
| 1972 | 2,13 | 0,18 | 162 | 1,0731 | 0,0066 | 2,8. 10 ⁷ |
| 1973 | 1,7 | 0,28 | 123 | 0,7833 | 0,0064 | 2,3. 10 ⁷ |
| 1975 | 1,91 | 0,11 | 232 | 1,2396 | 0,0053 | 3,1. 10 ⁷ |
| 1975 | 2,78 | 0,48 | 56 | 0,7628 | 0,0136 | 1,8. 10 ⁷ |
| | | | | | Média | 4,92. 10 ⁷ |

Tabela 7.23: Valores obtidos para a estação Colônia da Jaíba, em Jaíba.

| Colônia do Jaíba Ano | Valores de Q ₀ (m ³ /s) | Valores de Qt (m ³ /s) | Tempo (dias) | Log Q ₀ /Qt | α | V(m ³) |
|----------------------------|--|--------------------------------------|-----------------|------------------------|---------|-----------------------|
| 1969 | 29,1 | 5 | 158 | 0,7649 | 0,00484 | 5,19 10 ⁸ |
| 1970 | 30,3 | 5,65 | 153 | 0,7294 | 0,00477 | 5,49. 10 ⁸ |
| 1971 | 19,7 | 2,5 | 206 | 0,8965 | 0,00435 | 3,91. 10 ⁸ |
| 1972 | 22,2 | 4,17 | 203 | 0,7262 | 0,00358 | 5,36. 10 ⁸ |
| 1973 | 17,58 | 3,7 | 99 | 0,6768 | 0,00684 | 2,22. 10 ⁸ |
| 1974 | 14,06 | 3,7 | 83 | 0,5798 | 0,00698 | 1,74. 10 ⁸ |
| 1975 | 8 | 3,2 | 94 | 0,3979 | 0,0042 | 1,63. 10 ⁸ |
| | | | | | Média | 3,65. 10 ⁸ |

Tabela 7.24: Valores obtidos para a estação Boca da Caatinga, em Matias Cardoso.

| Boca da Caatinga Ano | Valores de Q ₀ (m ³ /s) | Valores de Qt (m ³ /s) | Tempo (dias) | Log Q ₀ /Qt | α | V (m ³) |
|----------------------------|--|--------------------------------------|-----------------|------------------------|---------|-----------------------|
| 1970 | 43,3 | 6,01 | 165 | 0,85761 | 0,00520 | 7,20. 10 ⁸ |
| 1971 | 20,2 | 4,9 | 156 | 0,61515 | 0,0039 | 4,43. 10 ⁸ |
| 1972 | 13,2 | 3,2 | 120 | 0,61542 | 0,00513 | 2,22. 10 ⁸ |
| 1973 | 17,5 | 4,15 | 120 | 0,62499 | 0,00521 | 2,90. 10 ⁸ |
| 1974 | 13,2 | 2,68 | 134 | 0,69244 | 0,00517 | 2,21. 10 ⁸ |
| 1975 | 9,11 | 2,51 | 115 | 0,55984 | 0,00487 | 1,62. 10 ⁸ |
| | | | | | Média | 3,43. 10 ⁸ |

A recarga I é calculada de acordo com a equação 7.5:

$$I = V_0 / A \quad (\text{Eq. 7.5})$$

onde A= área de drenagem à montante da estação fluviométrica.

Os valores de infiltração assim como a porcentagem de recarga nos pontos das estações fluviométricas calculados através desse método são mostrados na Tabela 7.25. As

precipitações utilizadas para Ponte de Rodagem e Gorutuba foram os valores médios das estações climatológicas próximas, e para Colônia do Jaíba e Boca da Caatinga foram utilizados os valores das isoietas.

Tabela 7.25: Resultados da recarga referente a cada área drenada da Bacia.

| Estações | Área Drenada (m ²) | V médio anual (m ³) | Infiltração (mm) | Precipitação média na estação (mm) | Recarga % | Domínio Climático |
|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------|------------------------------------|-----------|-------------------|
| Ponte de Rodagem, Montes Claros | 1,04. 10 ⁹ | 3,85. 10 ⁷ | 37,02 | 1025 | 3,6% | Sub-úmido |
| Colônia do Jaíba, Jaíba | 1,22. 10 ¹⁰ | 3,65. 10 ⁸ | 29,92 | 883,5 | 2,3% | Semi-árido |
| Gorutuba, Janaúba | 2,46. 10 ⁹ | 4,92. 10 ⁸ | 20,00 | 800 | 3,7% | Sub-úmido |
| Boca da Caatinga, Matias Cardoso | 2,94. 10 ¹⁰ | 3,43. 10 ⁸ | 11,67 | 870 | 1,3% | Semi-árido |

O método da análise de curvas de recessão quando comparado à recarga pelo método do Balanço Hídrico Climático, mostrou valor muito inferior de recarga, 6 vezes menor.

As estações fluviométricas Ponte de Rodagem e Gorutuba apresentaram valores de recarga próximos de 4%. Na estação de Colônia do Jaíba, a recarga obtida foi de 2,3%, e em Matias Cardoso, a jusante do rio Verde Grande, a recarga foi de 1,3%.

Considerando os domínios climáticos definidos, as médias de recarga de Ponte de Rodagem e Janaúba podem ser representativas do domínio sub-úmido, resultando numa média de 3,7% de recarga para os aquíferos. Para o domínio semiárido, a média das outras duas estações resultou num valor de 1,8% de recarga subterrânea.

Em bacias semi-cársticas semelhantes a do rio Verde Grande, como por exemplo, as do rio Paracatu, Urucuia e Sono, estes valores atingem 17, 15 e 11 % respectivamente, em um clima sub-úmido. Na bacia do rio Japoré, na margem esquerda do rio São Francisco, em área também cárstica do Grupo Bambuí, sob a influência de clima sub-úmido, o coeficiente de infiltração é de 30% (SILVA, 1995).

7.5.3. Método de Meyboom

Foram utilizados os mesmos gráficos semilog das estações fluviométricas do método de análise da curva de recessão (Método Maillet) e o uso das equações 4.7 e 4.8 descritas no capítulo 4.

Para o cálculo de vazão durante o período de recessão, foram utilizados dados de 2 anos de recessão de cada bacia de contribuição representada pelas 4 estações fluviométricas. Os resultados do cálculo se encontram na Tabela 7.26.

Tabela 7.26: Estimativa de recarga da bacia pelo Método de Meyboom

| Estações | Anos | Área Drenada m ² | Recarga (m ³) | Recarga (m) | Recarga (mm) | Porcentagem da Precipitação | Domínio Climático |
|----------------------------------|---------|--------------------------------|------------------------------|----------------|-----------------|-----------------------------------|----------------------|
| Ponte de Rodagem, Montes Claros | 1970-71 | 1,04 x 10 ⁹ | 1,01 x10 ⁸ | 0,10 | 96,98 | 9% | Sub-úmido |
| Gorutuba, Janaúba | 1972-73 | 2,46 x 10 ⁹ | 1,64 x10 ⁸ | 0,07 | 66,52 | 8% | Sub-úmido |
| Colônia do Jaíba, Jaíba | 1970-71 | 1,22 x 10 ¹⁰ | 1,55 x 10 ⁸ | 0,01 | 12,74 | 1% | Semiárido |
| Boca da Caatinga, Matias Cardoso | 1970-71 | 2,94 x 10 ¹⁰ | 2,93 x10 ⁸ | 0,01 | 9,96 | 1% | Semiárido |

Observando os valores acima, a Estação Ponte de Rodagem apresentou o maior valor para recarga através desse método, indicando áreas principais de recarga coincidentes com os altos cursos do rio Verde Grande. O mesmo pode ser analisado para a Estação Gorutuba que recebe aporte do alto curso do rio Gorutuba ao longo dos divisores de águas superficiais dessa sub-bacia. As demais estações, ambas em clima semiárido, apresentaram valor de infiltração de 1%, que pode ser atribuído ao clima em si ou devidas às condições de ocorrência das águas subterrâneas neste trecho – baixos gradientes hidráulicos e pequena permeabilidade em relação aos trechos a montante. É provável também que nesse trecho entre Boca da Caatinga e Colônia da Jaíba ocorram perdas de água do rio para o aquífero em alguns locais.

Comparado ao método do Balanço Hídrico, o domínio sub-úmido Observa-se que os valores obtidos nesse método indicam a influencia climática atuando sobre as taxas de recarga na bacia, aliado a hidrogeologia regional, com rochas de maior potencial aquífero (Form. Lagoa do Jacaré) em zona sub-úmida, e as rochas com menor potencial aquífero (rochas pelíticas) encontram-se na porção semiárida.

Detalhe para a região de Janaúba, no Gorutuba, onde se observou uma janela que aflora rochas carbonáticas mais puras da Form. Lagoa do Jacaré, que divide o fluxo subterrâneo entre as calhas de drenagem dos rios Verde Grande a oeste e Gorutuba a Leste. Nesse ponto, a recarga foi de 8%, sendo justificada pelo escoamento maior do fluxo superficial vindo da cordilheira do Espinhaço a leste que quando entra em contato com a área das rochas calcárias na planície do rio Gorutuba, ocasiona uma recarga direta para os aquíferos subjacentes, mostrando comportamento influente.

Os valores estimados de recarga média anual variaram conforme os métodos empregados, mostrado na Tabela a seguir:

Tabela 7.27: Estimativas de recarga para a bacia do rio Verde Grande.

| | Estações fluviométricas | Precipitação média na estação (mm) | Método de Meyboom | | Recessão de hidrogramas (Maillet) | | Balanço Hídrico | |
|-----------------------|--|---|-------------------|----------------|--------------------------------------|----------------|-----------------|----------------|
| | | | Recarga (mm) | Recarga (%) | Recarga (mm) | Recarga (%) | Recarga (mm) | Recarga (%) |
| Domínio sub- úmido | Ponte de Rodagem, Montes Claros | 1025 | 96,98 | 9% | 37,02 | 4% | 214,93 | 24% |
| | Gorutuba, Janaúba | 800 | 66,52 | 8% | 29,92 | 4% | | |
| Domínio semiárido | Colônia do Jaíba, Jaíba | 883,5 | 12,74 | 1% | 20,00 | 2% | 23,73 | 4% |
| | Boca da Caatinga, Matias Cardoso | 870 | 9,96 | 1% | 11,67 | 1% | | |

Os métodos empregados convergiram para valores de recarga similares para o domínio semiárido e valores discrepantes no domínio sub-úmido. Para a recarga no semiárido, os valores ficaram entre 1-4%, o que condiz com a realidade da região, com baixa oferta hídrica e grande perda por evapotranspiração. No carste do semiárido, toda a água pluvial é absorvida pelas dolinas na porção ocidental da bacia, uma vez que não há praticamente escoamento superficial por fora. Como mencionado anteriormente, CETEC (1981) calculou com base no escoamento subterrâneo valor de 2% de coeficiente de infiltração.

Os resultados obtidos dos valores de recarga em cada método utilizado para os domínios climáticos de cada estação fluviométrica mostram grande diferença entre si, principalmente para o Método do Balanço hídrico.

Isso se justifica pelo fato de no método do Balanço Hídrico utilizar dados de pluviometria juntamente com o escoamento subterrâneo e evapotranspiração de cada estação monitorada, que a entrada de água no sistema aquífero, sem levar em consideração prováveis ocorrências de perda e ganhos de água. Como a parcela relativa à evapotranspiração foi calculada por diferença, saídas de água para bacias vizinhas, por fluxo subterrâneo são desprezadas nesse método, o que pode ser o fator diferenciado nas taxas de recarga calculadas entre esse método e os demais.

Os métodos de Meyboom e de Recessão de Hidrogramas utilizaram dados somente de vazão superficial com a determinação do escoamento subterrâneo. Assim posto, infere-se

que as perdas de água subterrânea estejam nos valores amostrados das estações, tanto por perdas para outras bacias como para aquíferos mais profundos.

As recargas médias para o clima sub-úmido podem ser consideradas entre o intervalo de 4 a 9%, pois no ambiente geológico da estação Ponte de Rodagem, localizada na Faixa Ocidental sul da bacia, os depósitos de cobertura e os capeamentos de arenitos cretáceos têm papel importante na recarga dos sistemas cárstico-fissurados inferiores, uma vez que estes sedimentos têm alta permeabilidade e grande capacidade de infiltração. Já a estação Gorutuba, localizada na Faixa oriental da bacia, apresenta grande contribuição dos aquíferos associados aos quartzitos da Serra do Espinhaço, que recebem parte da pluviometria nos topos da serra que infiltram diretamente por filtração vertical descendente, ou seja, através de fontes de encostas que alimentam a drenagem superficial nos altos cursos, cujas áreas de descarga ocorrem em fundos de vales, geralmente mascaradas pelos depósitos aluviais.

Para o clima semiárido, a média da taxa de recarga fica entre 1-2%, pela característica das estações Boca da Caatinga e Colônia da Jaíba estarem em um ambiente geológico composto por sedimentos de cobertura ou o próprio manto de alteração das rochas pelíticas e carbonáticas mais argilosos e impermeáveis; onde a infiltração e recarga são mais efetivas somente em depressões associadas à dolinas; em muitas áreas não ocorre a presença de um lençol freático nessas coberturas que tome mais efetiva uma alimentação do sistema cárstico-fissurado inferior. O escoamento das águas em direção ao vale do Verde Grande é influenciado por menor permeabilidade e baixos gradientes hidráulicos, indicando reduzida contribuição subterrânea ao rio, neste trecho.

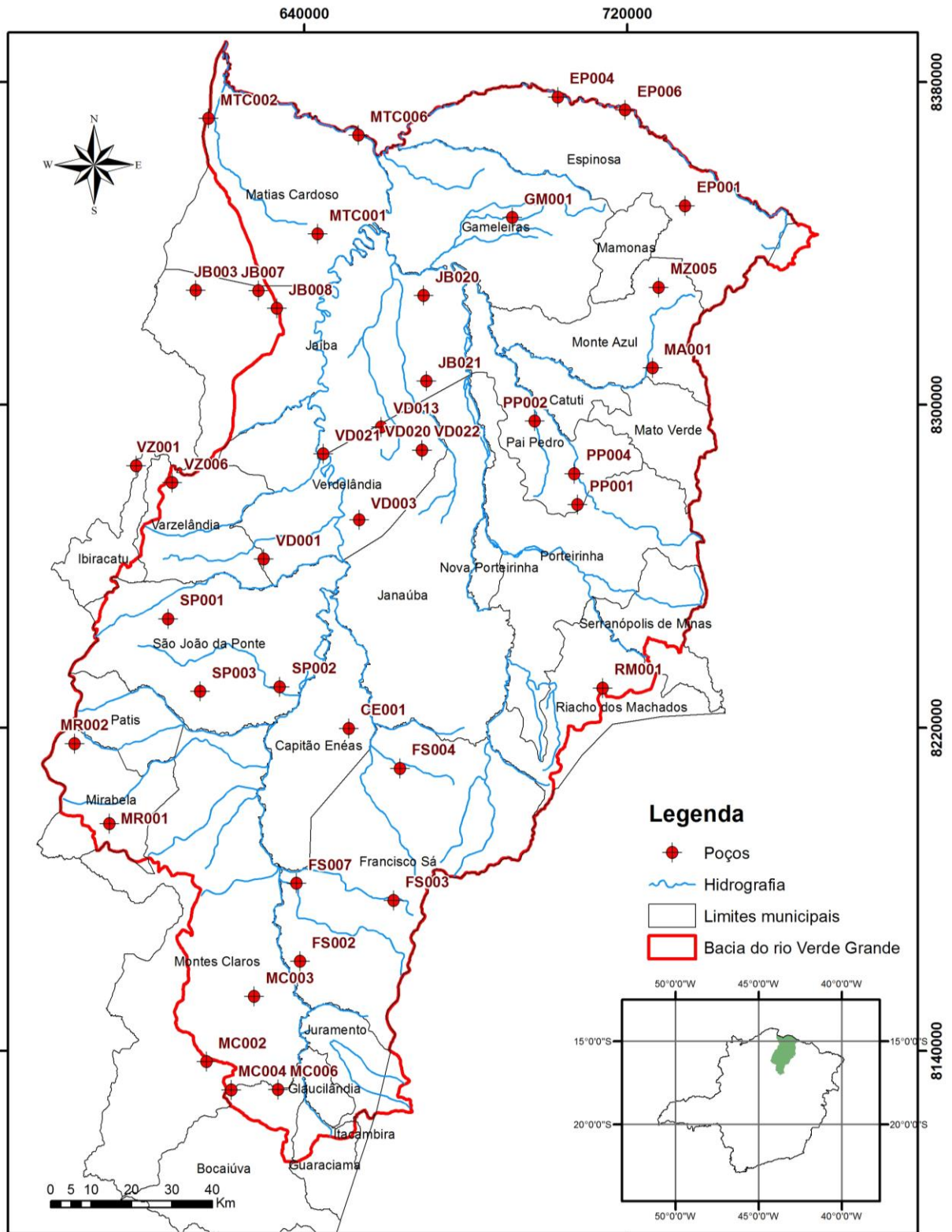
7.6. CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA

A interpretação dos dados hidroquímicos foi feita, primeiramente, de forma a obter-se a caracterização dos Domínios hidrogeológicos, pertencentes à bacia do rio Verde Grande.

As informações registradas em campo foram analisadas e comparadas com os dados até então cadastrados, considerando as condições de amostragem e regime de operação dos poços (**Anexo II**). Os dados construtivos existentes dos poços tubulares amostrados se encontram no **Anexo III**. A distribuição espacial dos pontos de amostragem das águas subterrâneas na bacia pode ser vista na Figura 7.26.

Tabela 7.28: Poços tubulares amostrados na Bacia do rio Verde Grande.

| Código | Coordenadas UTM 23k | | Município | Localidade |
|--------|---------------------|-----------|---------------------|--------------------------------------|
| | UTMX | UTMY | | |
| CE001 | 651091 | 8219830 | Capitão Enéas | Virgilândia |
| EP001 | 734381 | 8349242 | Espinosa | Duarte Balieiro Confeccões Ltda |
| EP004 | 702902 | 8376191 | Espinosa | Juremal |
| EP006 | 719574 | 8372953 | Espinosa | Poço da Copasa |
| FS002 | 639030 | 8162139 | Francisco Sá | Fazenda Cascabulio |
| FS003 | 662195 | 8177189 | Francisco Sá | Sítio Corgão |
| FS004 | 663772 | 8209899 | Francisco Sá | Fazenda Santa Maria |
| FS007 | 638135 | 8181454 | Francisco Sá | Fazenda São Paulo |
| GM001 | 691652 | 8346336 | Gameleiras | Comunidade Jacu das Piranhas |
| JB003 | 613129 | 8328286 | Jaíba | Projeto Jaíba NH1, ÁREA F |
| JB007 | 628765 | 8328191 | Jaíba | Fazenda Lagoa do Meio |
| JB008 | 633270 | 8323859 | Jaíba | Fazenda Pioneira |
| JB020 | 669604 | 8327023 | Jaíba | Fazenda Terra Boa |
| JB021 | 670287 | 8305829 | Jaíba | Luciano Pereira Pegô |
| MA001 | 726348 | 8309078 | Monte Azul | Comunidade Sipual |
| MC002 | 615854 | 8137257 | Montes Claros | Sítio Pradinho |
| MC003 | 627665 | 8153391 | Montes Claros | Posto Novo Rio |
| MC004 | 621969 | 8130298 | Montes Claros | Barroão (Água Santa) |
| MC006 | 633601 | 8130344 | Montes Claros | Rio do Sítio |
| MR001 | 591753 | 8196236 | Mirabela | Posto da Polícia Rodoviária Estadual |
| MR002 | 583122 | 8216055 | Mirabela | São Bento |
| MTC001 | 643391 | 8342281 | Matias Cardoso | Fazenda Brazão |
| MTC002 | 616377 | 8370883 | Matias Cardoso | Fazenda Vila Bela |
| MTC006 | 653495 | 8366723 | Matias Cardoso | Fazenda Betânia |
| MZ005 | 727862 | 8329049 | Monte Azul | Comunidade Marinho (Tamboril) |
| PP001 | 707795 | 8275213 | Pai Pedro | Comunidade Mirante |
| PP002 | 697121,7 | 8295916 | Pai Pedro | Fazenda Angicos |
| PP004 | 706986 | 8282887 | Pai Pedro | Na cidade |
| RM001 | 661569 | 8229839 | Riacho dos Machados | Poço Copasa |
| SP001 | 606345 | 8246944 | São João da Ponte | Brejo Grande |
| SP002 | 633994 | 8230132 | São João da Ponte | Fazenda Santa Mônica |
| SP003 | 614258 | 8228969 | São João da Ponte | Fazenda Sementes Tolentino |
| VD001 | 630018 | 8261749 | Verdelândia | SEBO |
| VD003 | 653665 | 8271476 | Verdelândia | Fazenda Sapé |
| VD013 | 659135 | 8294480 | Verdelândia | Fazenda Colonial |
| VD020 | 669262 | 8288737,9 | Verdelândia | Fazenda Serra da Colonial |
| VD021 | 644726 | 8287781 | Verdelândia | Amargoso |
| VD022 | 669262 | 8288737,9 | Verdelândia | Fazenda Santo Antônio do Bom Jardim |
| VZ001 | 598396 | 8284904 | Varzelândia | Bebedouro |
| VZ006 | 607374 | 8280673 | Varzelândia | Brejo do Mutambal |



Fonte: Bases cartográficas Geominas, 2001; IGAM, 2010; ANA, 2011.

Figura 7.26: Localização dos Poços Tubulares coletados durante o estudo.

No **Anexo IV** são apresentados os dados físicos, químicos e microbiológicos das 40 amostras de água coletadas para este estudo. A caracterização hidroquímica apresentada neste capítulo é baseada em análises de metais totais.

7.6.1. Balanço Iônico e Coeficiente de erro

Com base nos métodos para verificação da validade das análises, obtiveram-se os resultados referentes ao erro de Balanço iônico e as razões de valor medido e valor calculado em laboratório para condutividade e sólidos totais dissolvidos para as amostras (Tabela 7.29). Os valores em vermelho representam valores fora do aceitável.

Tabela 7.29: Cálculos para validação das análises químicas

| Poço | Soma Cátions (meq/L) | Soma Ânions (meq/L) | Coeficiente de Erro do Balanço iônico % | COND/COND. Lab (µS/cm) | STD/STD lab (mg/L) |
|--------|----------------------|---------------------|---|------------------------|--------------------|
| CE001 | 9,48 | 9,02 | 2,5 | 1,06 | 1,05 |
| EP001 | 22,29 | 25 | 5,72 | 0,96 | 1,08 |
| EP004 | 12,65 | 13,94 | 4,87 | 1,09 | 1,04 |
| EP006 | 11,72 | 10,91 | 3,57 | 0,96 | 0,99 |
| FS002 | 4,86 | 5,26 | 3,92 | 0,99 | 1,10 |
| FS003 | 13,48 | 12,58 | 3,44 | 0,96 | 1,25 |
| FS004 | 26,66 | 20,09 | 14,06 | 1,01 | 0,84 |
| FS007 | 10,42 | 9,55 | 4,4 | 1,11 | 1,03 |
| GM001 | 5,26 | 4,91 | 3,45 | 1,09 | 1,15 |
| JB003 | 5,78 | 4,83 | 8,94 | 1,05 | 0,96 |
| JB007 | 6,38 | 6,06 | 2,6 | 0,90 | 1,13 |
| JB008 | 7,02 | 6,43 | 4,41 | 1,09 | 1,09 |
| JB020 | 10,91 | 9,38 | 7,54 | 0,95 | 1,11 |
| JB021 | 6,21 | 5,6 | 5,21 | 0,94 | 0,78 |
| MA001 | 11,76 | 11,32 | 1,92 | 0,97 | 1,15 |
| MC002 | 3,5 | 2,56 | 15,47 | 0,99 | 1,02 |
| MC003 | 5,12 | 4,38 | 7,83 | 0,99 | 1,02 |
| MC004 | 3,49 | 1,89 | 29,8 | 0,97 | 0,99 |
| MC006 | 2,43 | 1,58 | 31,5 | 0,98 | 0,75 |
| MR001 | 3,1 | 2,77 | 5,54 | 0,98 | 1,12 |
| MR002 | 3,32 | 2,93 | 6,19 | 0,99 | 1,01 |
| MTC001 | 5,39 | 4,98 | 3,99 | 0,96 | 1,22 |
| MTC002 | 7,83 | 6,15 | 11,99 | 0,94 | 1,11 |
| MTC006 | 8,36 | 4,49 | 30,16 | 0,90 | 1,03 |
| MZ005 | 3,93 | 3,42 | 6,99 | 0,98 | 0,98 |
| PP001 | 14,56 | 14,99 | 1,44 | 0,97 | 1,07 |
| PP002 | 9,12 | 8,32 | 4,59 | 1,07 | 1,10 |
| PP004 | 9,99 | 9,05 | 4,98 | 1,07 | 1,32 |
| RM001 | 5,4 | 4,72 | 6,63 | 1,00 | 1,16 |
| SP001 | 7,76 | 6,17 | 11,36 | 0,02* | 0,02* |
| SP002 | 10,4 | 10 | 1,94 | 0,98 | 0,94 |
| SP003 | 5,04 | 3,56 | 17,29 | 1,00 | 1,03 |
| VD003 | 21,78 | 25,06 | 7 | 0,99 | 1,02 |
| VD013 | 6,06 | 7,94 | 13,43 | 0,94 | 1,13 |

| | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|------|------|
| VD020 | 12,45 | 11,79 | 2,7 | 0,98 | 1,13 |
| VD022 | 9,16 | 7,33 | 11,12 | 1,02 | 0,98 |
| VZ001 | 5,89 | 5,22 | 5,99 | 1,01 | 1,12 |
| VD001 | 6,64 | 6,73 | 0,66 | 1,00 | 0,96 |
| VD021 | 4,63 | 5,66 | 9,98 | 0,99 | 1,08 |
| VZ006 | 7,01 | 6,41 | 4,5 | 0,96 | 1,07 |

* Erro nas medidas *in loco*.

Observa-se que na verificação pela condutividade somente duas amostras seriam descartadas, e na verificação pelos sólidos totais dissolvidos ¼ das amostras ficaram fora do aceitável. Pelo balanço iônico, ocorreram 22 valores acima de 5% de erro praticável das 40 análises, sendo assim mais de 50% das amostras seriam descartadas. Dessa forma, decidiu-se corrigir através do software AquaChem 3.7 a concentração de HCO_3^- que perfaz grande parte da concentração de ânions na análise, de forma a recalculá-lo pelo valor de STD. Foram realizadas as correções nas amostras que mostraram valores acima de 5% para erros do balanço iônico e que também apresentaram erros não aceitáveis pelos métodos de condutividade de STD.

Após as correções, excluíram-se 3 amostras (MC006, MZ005 e VD021), resultando num balanço iônico final em 37 análises validadas (Tabela 7.30).

A localização dos 37 poços que foram utilizados nos estudos hidroquímicos com referência aos Domínios hidrogeológicos e climatológicos em que se situam são mostrados na Figura 7.27.

Tabela 7.30: Balanço iônico corrigido (em meq/L)

| Amostras | Soma Cátions | Soma ânions | Erro balanço iônico (%) |
|----------|--------------|-------------|-------------------------|
| CE001 | 9,48 | 9,02 | 2,5 |
| EP001 | 25,25 | 22,71 | -5 |
| EP004 | 12,65 | 13,94 | 4,87 |
| EP006 | 11,72 | 10,91 | 3,57 |
| FS002 | 4,86 | 5,26 | 3,92 |
| FS003 | 13,48 | 12,58 | 3,44 |
| FS004 | 26,63 | 27,25 | 1 |
| FS007 | 10,43 | 10,76 | 1 |
| GM001 | 5,26 | 4,91 | 3,45 |
| JB003 | 5,92 | 5,84 | 0 |
| JB007 | 6,38 | 6,06 | 2,6 |
| JB008 | 7,02 | 6,43 | 4,41 |

| | | | |
|--------------|-------------|-------------|-----------|
| JB020 | 10,9 | 11,89 | 4 |
| JB021 | 5,64 | 6,24 | 5 |
| MA001 | 11,76 | 11,32 | 1,92 |
| MC002 | 3,49 | 3,55 | 0 |
| MC003 | 5,07 | 5,15 | 0 |
| MC004 | 3,47 | 3,51 | 0 |
| MC006 | 2,44 | 4,58 | 30 |
| MR001 | 2,8 | 3,11 | 5 |
| MR002 | 3,29 | 3,35 | 0 |
| MTC001 | 5,04 | 5,41 | 3 |
| MTC002 | 8,12 | 8,19 | 0 |
| MTC006 | 8,37 | 8,39 | 0 |
| MZ005 | 3,93 | 4,94 | 11 |
| PP001 | 14,56 | 14,99 | 1,44 |
| PP002 | 9,12 | 8,32 | 4,59 |
| PP004 | 9,15 | 10,01 | 4 |
| RM001 | 5,38 | 5,41 | 0 |
| SP001 | 7,79 | 7,78 | 0 |
| SP002 | 10,4 | 10 | 1,94 |
| SP003 | 5,06 | 5,06 | 0 |
| VD001 | 6,64 | 6,73 | 0,66 |
| VD003 | 21,77 | 22,13 | 0 |
| VD013 | 6,14 | 6,09 | 0 |
| VD020 | 12,45 | 11,79 | 2,7 |
| VD021 | 4,13 | 7,99 | 31 |
| VD022 | 9,45 | 9,19 | -1 |
| VZ001 | 5,83 | 5,92 | 0 |
| VZ006 | 7,01 | 6,41 | 4,5 |

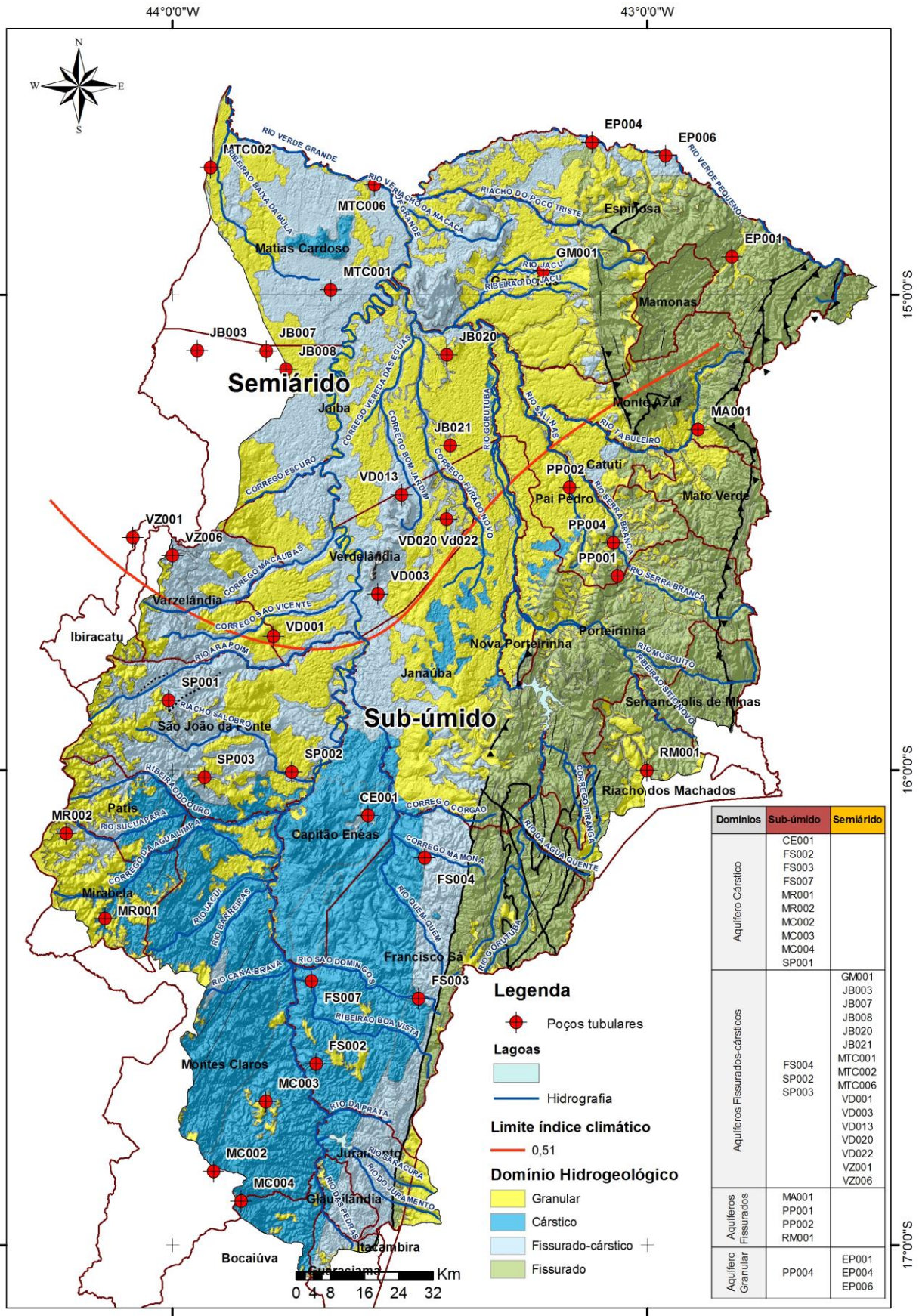


Figura 7.27: Mapa de localização dos poços por Domínios hidrogeológicos e climáticos

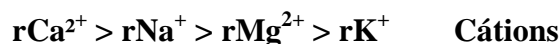
7.6.2. Íons Principais e Parâmetros Físico-químicos gerais

Analisando os resultados das 37 amostras de água subterrânea, entre os cátions principais o Ca^{2+} apresenta a maior concentração média, seguido por Na^+ , Mg^{2+} e K^+ . Já entre os ânions predomina HCO_3^- seguido por Cl^- , SO_4^{-2} e por último NO_3^- . As concentrações mínimas, máximas e médias, além da mediana, desvio padrão e coeficiente de variância destes elementos são apresentados na Tabela 7.31.

Tabela 7.31: Estatística das concentrações (mg/L) de cátions e ânions principais para as 37 amostras.

| Íons (mg/L) | Ca^{2+} | Na^+ | Mg^{2+} | K^+ | HCO_3^- | Cl^- | SO_4^{-2} | NO_3^- |
|-----------------------------------|------------------|---------------|------------------|--------------|------------------|---------------|--------------------|-----------------|
| Média | 106,85 | 55,57 | 15,21 | 0,03 | 326,86 | 98,61 | 41,23 | 1,72 |
| Mediana | 94,60 | 39,64 | 11,37 | 0,02 | 336,00 | 38,40 | 17,70 | 0,69 |
| Máximo | 358,00 | 226,00 | 55,80 | 0,12 | 736,00 | 698,00 | 511,00 | 10,79 |
| Mínimo | 5,43 | 0,73 | 1,52 | 0,01 | 162,00 | 0,50 | 5,00 | 0,02 |
| Desvio Padrão | 72,51 | 53,23 | 13,49 | 0,02 | 104,14 | 153,81 | 85,04 | 2,65 |
| Coeficiente de Variação % | 68% | 96% | 89% | 80% | 32% | 156% | 206% | 154% |
| Limite Portaria MS 2914/11 | - | 200 | - | - | - | 250 | 250 | 10 |

De modo geral, as 37 análises apresentam a seguinte relação iônica (valor médio em meq/L):



As razões hidrogeoquímicas para os principais cátions indicam claramente a preponderância do cálcio sobre todos os outros elementos, em função da composição mineralógica da maior presença de rochas carbonáticas (calcários), e a pequena concentração de magnésio indica pouca presença de calcários ricos em dolomitas. A composição das rochas associadas (carbonáticas e pelito-carbonáticas) explica claramente a tendência das águas apresentarem características bicarbonatadas, com pequena presença de magnésio e potássio. Termos sódicos maiores que os de magnésio estão associados a um aumento das concentrações de cloreto, relacionadas a climas mais áridos.

Observa-se que as concentrações médias de cloretos são maiores que as de sulfato, indicando uma troca de bases nas águas subterrâneas. Regionalmente, as águas subterrâneas tendem a ir aumentando suas mineralizações até saturar em diferentes íons. Geralmente as

primeiras concentrações acontecem com o ânion HCO_3^- e mais tarde com SO_4^{2-} . O íon cloro não chega a saturar normalmente. Esses índices de troca de base são abordados separadamente por domínio aquífero nos tópicos a seguir.

Os parâmetros físico-químicos analisados para todas as amostras mostram a grande variação nos valores medidos, a exceção do pH e da temperatura da água (Tabela 7.32).

Tabela 7.32: Estatística dos parâmetros físico-químicos para as 37 amostras.

| Parâmetros | Temperatura da água (°C) | Turbidez (uT) | Condutividade elétrica, Lab ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | Cor verdadeira (UPt) | Dureza total (mg/L) | pH, Lab |
|-----------------------------------|--------------------------|---------------|---|----------------------|---------------------|---------|
| Média | 26,52 | 4,79 | 852,76 | 12,16 | 369,72 | 7,46 |
| Mediana | 26,70 | 0,96 | 691,00 | 10,00 | 339,00 | 7,50 |
| Máximo | 29,20 | 85,70 | 2490,00 | 50,00 | 1206,00 | 8,30 |
| Mínimo | 23,80 | 0,25 | 272,00 | 5,00 | 27,20 | 6,80 |
| Desvio Padrão | 1,41 | 14,82 | 519,74 | 7,40 | 259,40 | 0,35 |
| Coefficiente de Variação % | 5% | 309% | 61% | 61% | 70% | 5% |
| Limite Portaria MS 2914/11 | - | 5 | - | 15 | 500 | - |

A composição das 37 amostras pode ser caracterizada através dos diagramas Box & Whisker (Box-plot). Para cada variável, visualizam-se os valores máximos e mínimos, as medianas e os valores abaixo dos quais se encontram 25% e 75% das amostras.

A Figura 7.28 representa os diagramas para Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , e SO_4^{2-} dos poços sob influência climática semiárida. A figura 7.28 representa os diagramas para Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , e SO_4^{2-} dos poços sob influência climática sub-úmida.

Nesses diagramas observa-se que Mg^{2+} , K^+ e SO_4^{2-} apresentam na totalidade das amostras teores médios mais baixos. Ca^{2+} , e HCO_3^- são os íons predominantes, caracterizando as águas como bicarbonatadas cálcicas e a ocorrência secundária de águas sódicas e cloretadas.

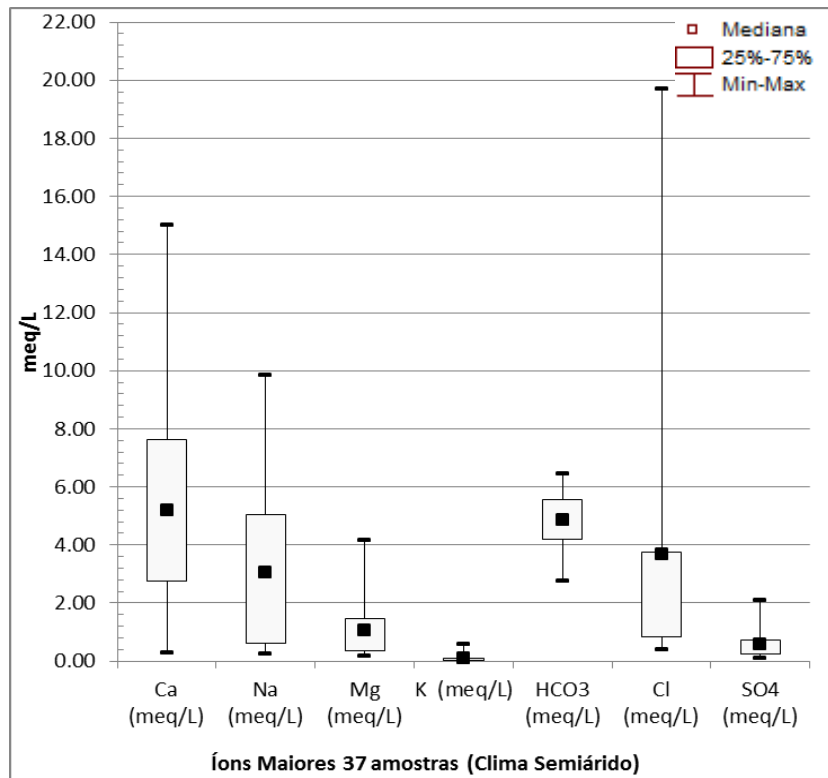


Figura 7.28: Diagrama Box-plot para os íons maiores de 19 amostras sob influência do clima semiárido

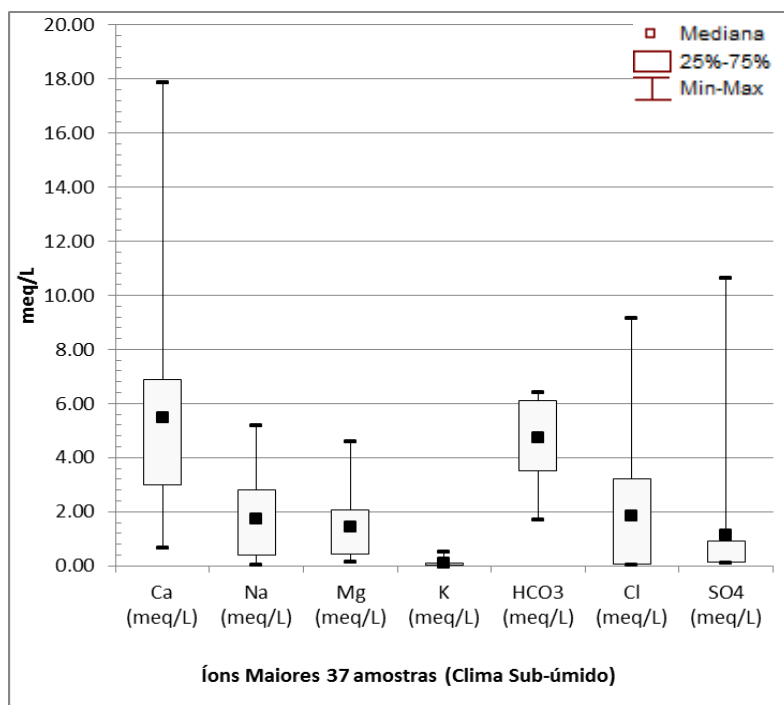


Figura 7.29: Diagrama Box-plot para os íons maiores de 18 amostras sob influência do clima sub-úmido.

O ânion predominante é o bicarbonato seguido do cloro e sulfato. Os demais apresentam teores muito pouco elevados. O flúor, apesar de apresentar menor concentração, merece destaque pelo fato de ser detectado com frequência nos aquíferos cársticos no norte de Minas. Nessa área, as ocorrências de concentrações de flúor já registradas em estudos realizados por Velásquez *et al.* 2009, Melo *et al.* 2010, Costa 2011, mostram associação desse íon à fácies hidroquímica bicarbonatada-sódica.

As amostras coletadas no clima semiárido apresentaram maiores teores médios para Ca^{2+} , Na^+ e Cl^- . Os íons sódio e cloreto são encontrados associados nas águas subterrâneas. As águas naturais com elevado conteúdo de Na^+ frequentemente tem conteúdos elevados de F^- (flúor) (CUSTÓDIO E LLAMAS, 1981), ocorrência observada na zona do semiárido da bacia. Há um aumento na concentração de Na^+ em comparação ao clima sub-úmido, que pode ser indicativo de mudança composicional da geologia, que passa de um terreno mais carbonático ao sul da bacia para mais pelítico ao norte em profundidade, observando perda de Ca^{2+} e Mg^{2+} e ganho de Na^+ por troca iônica com argilas esmectíticas ricas em Na^+ . As concentrações de Na^+ e Ca^{2+} são maiores no clima semiárido que no sub-úmido, existindo grande influência climática sobre a composição hidroquímica nessa região.

As amostras coletadas no clima sub-úmido apresentaram maiores teores médios para Mg^{2+} , HCO_3^- , e SO_4^{2-} , indicando influência na concentração iônica provinda do ambiente geológico. Em ambientes com mais chuva, a concentração de Cl^- diminui, conforme observado no diagrama da Figura 7.29.

Representando as análises dos íons maiores por diagramas de STIFF, observa-se na Figura 7.30, desenhado sobre o mapa da bacia, que há a predominância de águas bicarbonatadas cálcicas na região sul e central da bacia, o que corrobora com a geologia de rochas calcárias. No nordeste e centro da bacia as águas apresentam águas mais cloretadas indicando a influência climática sobre as águas subterrâneas. E apresentam-se mais sódicas nos pontos MC002, JB003 e MTC002, localizados na borda ocidental bacia. Nos pontos JB003 e MTC002 a predominância de águas sódicas se deve a proximidade com o leito do rio São Francisco aliada a concentração das águas por pouca pluviosidade. No Ponto MC002, que está a montante (Cabeceira) do rio Verde Grande, o teor de íons Na^+ predomina devido à proximidade com terrenos ácidos como arenitos.

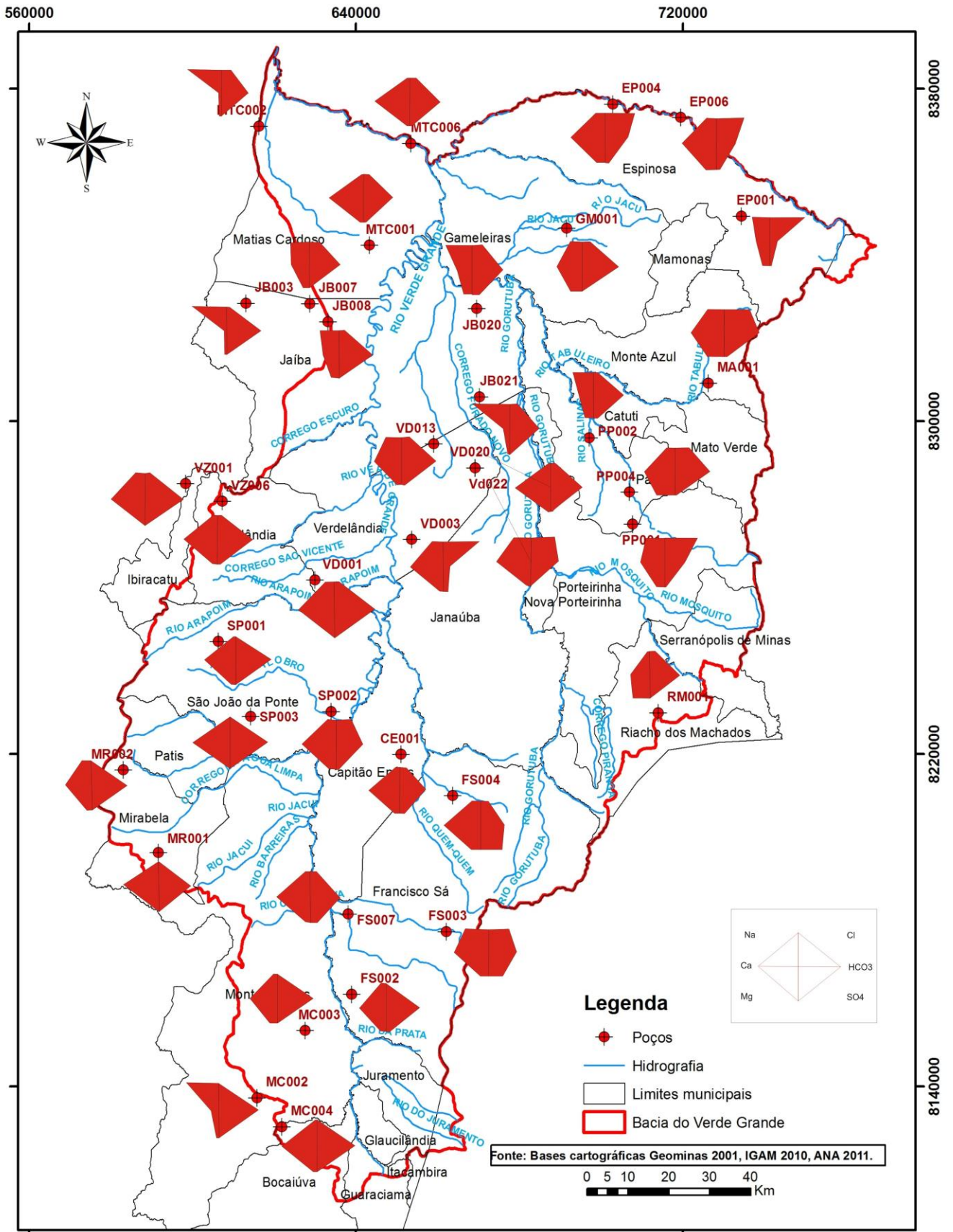


Figura 7.30: Diagramas de STIFF para a bacia.

7.6.3. Caracterização Hidroquímica dos Domínios Hidrogeológicos

A classificação das águas subterrâneas por Domínio Hidrogeológico foi realizada por meio do Diagrama de Piper (CUSTODIO & LLAMAS 1983, FETTER 1994), para o total de 37 amostras de água subterrâneas validadas. Procedeu-se também a classificação por meio dos diagramas de Schoeller (1962) e Stiff (1951), de forma a representar a espacialização dos tipos hidroquímicos na bacia. Em cada domínio hidrogeológico, foram diferenciadas as análises que se enquadraram sob os dois domínios climáticos, para observação da interação dessa variável nas características físico-químicas das águas. Os índices de troca de bases e as relações iônicas entre os íons maiores foram realizados, assim como o índice de saturação para Calcita, Dolomita, Gipsita para os domínios aquíferos em estudo. O índice de fluorita obteve valores subsaturados para todas as amostras, portanto não foi discutido juntamente com os demais índices.

7.6.3.1. Domínio Aquífero Cárstico

No Domínio aquífero cárstico foram analisadas 10 amostras de água subterrânea validadas. Pelo diagrama de Piper, classificam-se as águas do Domínio aquífero cárstico como águas bicarbonatadas cálcicas dominante (Figura 7.31), e apresenta como segunda classe águas bicarbonatadas sódicas e cloretadas cálcicas. A totalidade dos pontos amostrados estão sob a influência do clima sub-úmido.

O diagrama de Schoeller (Figura 7.32) revela uma homogeneidade na distribuição das concentrações de bicarbonato, bem como em cálcio e magnésio, e apresenta heterogeneidade nas concentrações de cloreto e sódio para as 10 amostras analisadas.

De modo geral, as águas desse domínio apresentam a seguinte relação iônica (valor médio em meq/L) $rCa^{2+} > rNa^+ > rMg^{2+} > rK^+$ para cátions, e $rHCO_3^- \gg rCl^- > rSO_4^{2-} > rNO_3^-$ para ânions, seguindo a concentração regional anteriormente definida, que indica uma troca de bases nas concentrações de ânions para esse domínio.

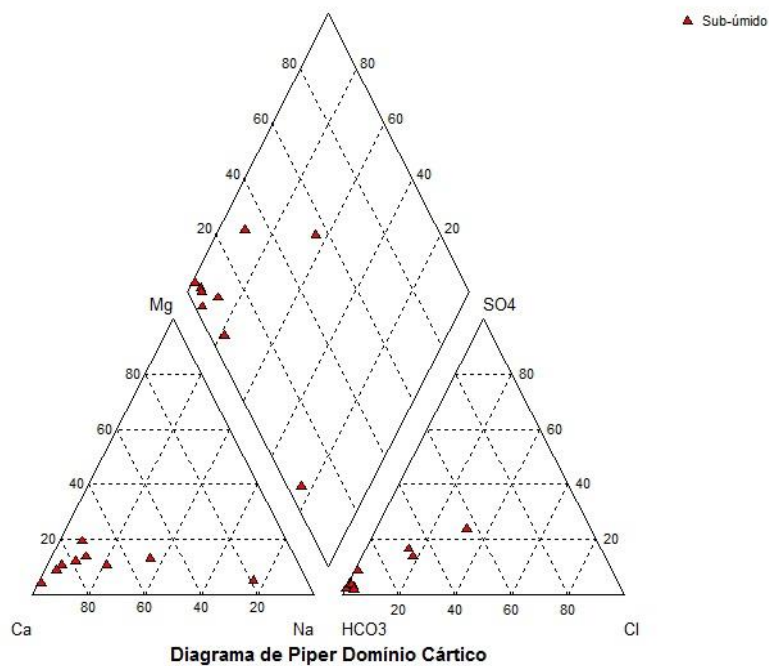


Figura 7.31: Diagrama de Piper para 10 amostras

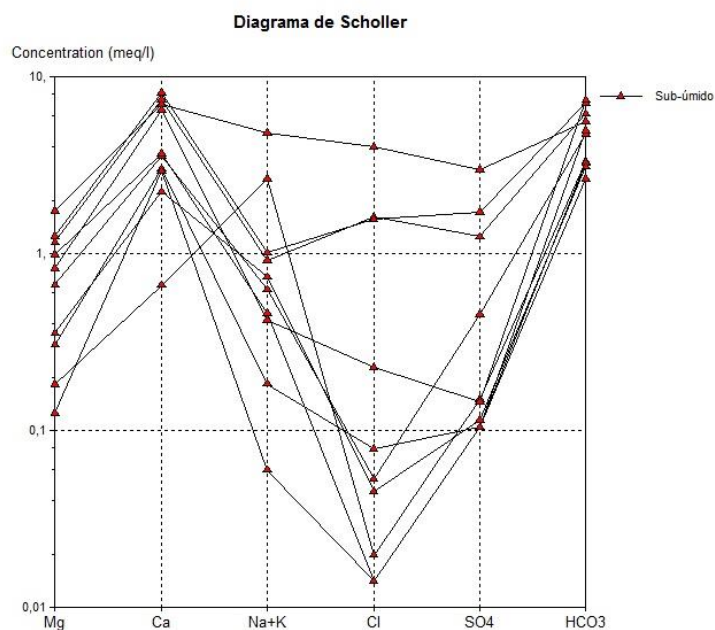


Figura 7.32: Diagrama de Schoeller para 10 amostras

Para o entendimento dos tipos de águas foi efetuado um agrupamento de amostras semelhantes utilizando-se do diagrama da diferença (em meq/L) proposto por Chadha (1999), tendo sido adotadas as concentrações absolutas em miliequivalentes por litro.

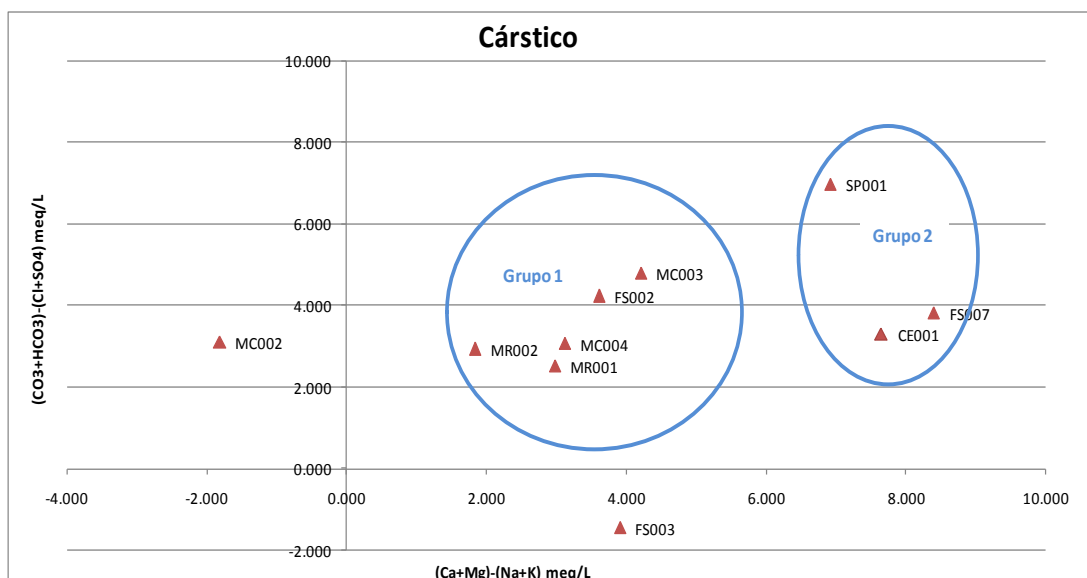
Observa-se na Figura 7.33 que as análises podem ser reunidas em dois grupos. O principal grupo hidroquímico no Domínio cárstico (Grupo 1) é formado principalmente por águas bicarbonatadas cálcicas, assim como o Grupo 2, sendo agrupado separadamente devido a razões maiores que as apresentadas no Grupo 1. Os pontos FS003 e MC002 foram definidos como discrepantes dos demais agrupamentos, sendo o primeiro ponto caracterizado por águas cloretadas cálcicas-magnesianas e o segundo ponto por águas bicarbonatadas sódicas.

A análise dos tipos do Grupo 1 mostra característica de águas com condutividade média em torno de 360,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e concentração média de sólidos totais dissolvidos em torno de 230,0 mg/L. As concentrações médias desse grupo de amostra para sódio, magnésio, cloreto e sulfato são baixas comparadas ao Grupo 2, variando de 1,0 a 55,0 mg/L (Tabela 7.33).

No Grupo 2, as concentrações dos cátions cálcio, sódio, magnésio são elevadas, chegando a valores médios respectivos de 147,50, 17,05 e 13,11 mg/L, e os ânions bicarbonato, cloreto e sulfato apresentaram valores de 419,33, 40,10 e 49,67 mg/L respectivamente, muito acima dos valores correspondentes para o Grupo 1. O valor médio de nitrato é elevado para esse grupo, chegando a 1,63 mg/L.

Os poços dos grupos 1 e 2 possuem médias de profundidades entre 50-100m. Os dois grupos de amostras representam águas de característica bicarbonatada cálcica-magnésiana, com dureza temporária, de acordo com o diagrama de Chadha. O grupo 1 representaria águas com menor dureza, com menos tempo de permanência em contato com as rochas calcárias, e o segundo grupo representaria as águas com maior dureza.

Todas as amostras apresentaram temperaturas da água na casa dos 25°C e pH básico em torno de 7,5. O clima sub-úmido nesse caso pode ter influência na baixa concentração de cloretos nos pontos mais a montante e a oeste da bacia.



| Aquíferos Cársticos | | |
|---------------------|---------|-------------|
| Grupo 1 | Grupo 2 | Discrepante |
| FS002 | CE001 | FS003 |
| MC003 | FS007 | MC002 |
| MC004 | SP001 | |
| MR001 | | |
| MR002 | | |

Figura 7.33: Diagrama adaptado de Chadha (1999) e a separação das amostras do Domínio aquífero cárstico em grupos com características químicas semelhantes.

O estado de equilíbrio hidroquímico, representado pelo índice de saturação dos minerais do Domínio cárstico (Calcita, Dolomita e Gipsita), o Índice de Troca de Bases (itb1, itb2 e itb3 – Eq. 4.11) e os índices rNa^+/rCa^{2+} , $rCl^-/rHCO_3^-$, rSO_4^{2-}/rCl^- e rMg^{2+}/rCa^{2+} , estão representados na Tabela 7.34.

Tabela 7.33: Dados dos parâmetros físico-químicos para os grupos do Domínio aquífero cárstico.

| Parâmetros | | Grupo 1 | | | | | Grupo 2 | | | Discrepantes | | Grupo 1 | Grupo 2 |
|--------------------------------|------------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------------|--------|---------|---------|
| | | FS002 | MR001 | MC002 | MC003 | MC004 | CE001 | FS007 | SP001 | MR002 | FS003 | média | média |
| Temperatura da água | °C | 25,4 | 25,4 | 23,8 | 26,7 | 24 | 24,9 | 24,5 | 26,6 | 24,6 | 25,1 | 25,06 | 25,33 |
| Turbidez | NTU | 2,12 | 0,96 | 3,87 | 10,1 | 0,88 | 1,19 | 4,24 | 0,52 | 1,03 | 3,61 | 3,59 | 1,98 |
| Condutividade elétrica Lab | µS/cm | 451 | 295 | 272,00 | 470,00 | 320,00 | 811 | 815 | 645 | 320 | 1295 | 361,60 | 757,00 |
| Cor verdadeira | UPt | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 12 | 10 | 10,00 | 10,00 |
| Dureza total | mg/L CaCO3 | 240 | 164 | 37,6 | 258 | 183 | 412 | 486 | 379 | 147 | 510 | 176,52 | 425,67 |
| pH, Lab | unid.de pH | 8,1 | 7,5 | 7,5 | 7,1 | 7,5 | 7,9 | 7,6 | 7,1 | 7,5 | 7,2 | 7,54 | 7,53 |
| Sólidos dissolvidos totais lab | mg/L | 288 | 180 | 185 | 324 | 220 | 602 | 652 | 486 | 220 | 742 | 239,40 | 580,00 |
| Cálcio Total | mg/L | 71,6 | 58,4 | 13,27 | 73,8 | 60,2 | 148,5 | 163,5 | 130,5 | 44,6 | 139,3 | 55,45 | 147,50 |
| Sódio Total | mg/L | 13,29 | 0,73 | 60,4 | 9,13 | 3,22 | 20,1 | 21,9 | 9,15 | 15,72 | 109,2 | 17,35 | 17,05 |
| Magnésio Total | mg N/L | 8,08 | 1,52 | 2,22 | 11,95 | 3,7 | 14,04 | 15,26 | 10,03 | 4,31 | 21,2 | 5,49 | 13,11 |
| Potássio Total | mg N/L | 0,02 | 1,092 | 1,055 | 2,39 | 1,677 | 0,02 | 2,27 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 1,25 | 0,77 |
| Alcalinidade de bicarbonato | mg/L CaCO3 | 290 | 162 | 201 | 301 | 199 | 376 | 433 | 449 | 189 | 340 | 230,60 | 419,33 |
| Cloreto total | mg/L | 1,9 | 0,5 | 0,7 | 0,5 | 2,8 | 57 | 55,2 | 8,1 | 1,6 | 143 | 1,28 | 40,10 |
| Sulfato total | mg/L | 21,8 | 5 | 7,2 | 5 | 5 | 59,8 | 82,2 | 7 | 5,5 | 143 | 8,80 | 49,67 |
| Nitrato | mg/L | 0,1 | 0,18 | 0,02 | 0,03 | 0,33 | 2,93 | 1,24 | 0,71 | 0,16 | 0,19 | 0,13 | 1,63 |
| Alumínio Total | mg/L | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1381 | 0,1194 | 0,1 | 0,1 | 0,1526 | 0,10 | 0,12 |
| Bário Total | mg/L | 0,0147 | 0,0441 | 0,0136 | 0,1229 | 0,0496 | 0,0677 | 0,0766 | 0,0205 | 0,0515 | 0,1013 | 0,05 | 0,05 |
| Boro total | mg/L | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,0799 | 0,07 | 0,07 | 0,07 |
| Cobre Total | mg/L | 0,004 | 0,004 | 0,0109 | 0,004 | 0,004 | 0,0047 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,0131 | 0,01 | 0,00 |
| Estrôncio Total | mg/L | 0,604 | 0,1875 | 0,597 | 0,42 | 0,1648 | 1,011 | 1,315 | 0,557 | 0,826 | 1,544 | 0,39 | 0,96 |
| Ferro Total | mg/L | 0,1422 | 0,0853 | 0,656 | 0,03 | 0,0836 | 0,1347 | 0,677 | 0,03 | 0,0561 | 0,496 | 0,20 | 0,28 |
| Fluoreto ionizado | mg/L | 0,1 | 0,1 | 0,16 | 0,16 | 0,11 | 0,29 | 0,18 | 0,36 | 0,2 | 0,32 | 0,13 | 0,28 |
| Fósforo total | mg/L | 0,02 | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,04 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,02 |
| Lítio Total | mg/L | 0,0089 | 0,005 | 0,0319 | 0,0111 | 0,005 | 0,008 | 0,0102 | 0,0215 | 0,0146 | 0,005 | 0,01 | 0,01 |
| Manganês Total | mg/L | 0,003 | 0,003 | 0,0113 | 0,0042 | 0,0046 | 0,003 | 0,0141 | 0,0062 | 0,0182 | 0,734 | 0,01 | 0,01 |
| Nitrito | mg/L | 0,003 | 0,001 | 0,005 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,003 | 0,003 | 0,00 | 0,00 |
| Nitrogênio amoniacal total | mg/L | 0,1 | 0,1 | 0,12 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,10 | 0,10 |
| Selênio Total | mg/L | 0,0005 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0005 | 0,002 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0027 | 0,0005 | 0,00 | 0,00 |
| Silício Dissolvido | mg/L | 15,05 | 6,69 | 10,23 | 13,8 | 7,97 | 11,46 | 10,98 | 8,24 | 8,54 | 10,65 | 10,75 | 10,23 |
| Vanádio Total | mg/L | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,016 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Zinco Total | mg/L | 0,1918 | 0,0401 | 0,0326 | 0,0358 | 0,0335 | 0,0936 | 0,183 | 0,0437 | 0,0301 | 0,0601 | 0,07 | 0,11 |

Tabela 7.34: Índices hidrogeoquímicos para o Domínio Cárstico (sob domínio sub-úmido)

| | Ponto | Troca de bases itb1 | Troca de bases itb2 | Troca de bases itb3 | Log IS Calcita | Log IS Dolomita | Log IS Gibbssita | rNa/rCa | rCl/HCO ₃ | rMg/rCa | rSO ₄ /rCl |
|---------|-------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------|-----------------|------------------|---------|----------------------|---------|-----------------------|
| Grupo 1 | FS002 | -0,52 | -10,68 | 0,34 | 0,76 | 0,93 | 1,14 | 0,16 | 0,01 | 0,19 | 8,47 |
| | MC003 | -0,27 | -31,49 | 0,02 | 0,16 | -0,10 | 1,74 | 0,11 | 0,00 | 0,27 | 7,38 |
| | MC004 | 0,05 | -1,32 | 0,08 | -0,02 | -0,92 | 1,79 | 0,05 | 0,02 | 0,10 | 1,32 |
| | MR001 | 0,38 | -3,23 | 0,09 | -0,36 | -1,95 | 1,98 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 7,38 |
| | MR002 | -0,52 | -15,33 | -0,10 | 0,09 | -0,49 | 1,52 | 0,31 | 0,01 | 0,16 | 2,54 |
| Grupo 2 | CE001 | 2,40 | 0,43 | 1,45 | 0,01 | -0,65 | 2,34 | 0,12 | 0,26 | 0,16 | 0,77 |
| | FS007 | 2,32 | 0,35 | 1,83 | 0,26 | -0,17 | 2,16 | 0,12 | 0,22 | 0,15 | 1,10 |
| | SP001 | -0,02 | -0,84 | 0,14 | -0,01 | -0,75 | 2,18 | 0,06 | 0,03 | 0,13 | 0,64 |
| Disc. | FS003 | 3,12 | -0,19 | 2,85 | -0,09 | -0,65 | 2,36 | 0,68 | 0,72 | 0,25 | 0,74 |
| | MC002 | -2,45 | -133,43 | -0,65 | -0,68 | -1,80 | 1,82 | 3,97 | 0,01 | 0,28 | 7,59 |

O Índice de Troca de Bases (itb) permite avaliar o grau de troca iônica ocorrido numa água com base nas relações entre os seus íons. A troca de íons é tanto mais completa, ou seja, mais perto do equilíbrio, quanto à solução permanece mais tempo em contato com o trocador. Outro fator de importância é a superfície e tempo de contato entre água e rocha e a temperatura. Para os itb's, significa que valores positivos indicam troca de metais alcalinos de água por metais alcalino-terrosos da rocha. Quando o terreno fornece os metais alcalinos o i.t.b. é negativo, e quando a água fornece os metais alcalinos o i.t.b. é positivo.

No caso do Domínio cárstico verifica-se que em 80% das amostras analisadas apresentam $itb_3 > 0$, indicando a permuta entre os íons alcalinos da água por íons alcalino-terrosos das rochas. O Grupo 1 apresentou 100% de valores de itb2 negativos, que significa que os metais alcalino-terrosos da água foram trocados por metais alcalinos da rocha.

O Grupo 2 apresenta a característica de águas mais estáveis, com poucos valores negativos e maiores que os valores do Grupo 1, tendendo para o valor 1. As amostras discrepantes FS003 e MC002 apresentaram valor de itb2 negativo para troca de bases itb2, porém a amostra FS003 possui itb1 positivo indicando troca dos íons Mg^{+2} pelo Ca^{+2} e a MC002 itb1 negativo, indicando maior concentração de metais alcalinos provindos das rochas.

Para a análise dos índices de saturação mineral (IS), constata-se que 50% das amostras estão sobressaturadas relativamente à Calcita ($Log IS > 0$), portanto com tendência para formar precipitados e incrustações, e 90% das águas desse domínio estão subsaturadas em Dolomita.

Observou-se que para a razão rNa^+/rCa^+ , somente a amostra MC002 possuiu valor bem acima de 1,0 e isso indica o aumento de sódio proveniente da chuva.

Nos pontos FS002, MC002 e MR001 a razão rSO_4^-/rCl^- é acima de 7, indicando pouca concentração de cloreto nas águas ou aumento de sulfatos dissolvidos nas águas. Esses pontos se localizam a montante do rio Verde Grande, numa área importante de recarga para a bacia. Isso é confirmado na relação $rCl^-/rHCO_3^-$, onde os valores são muito baixos para 90% das amostras.

O valor da razão rMg^{2+}/rCa^+ depende em grande parte da duração do contato da água com o terreno. Valores próximos de um apontam, normalmente, para a circulação em formações ricas em carbonatos de magnésio. Nesse domínio as amostras apresentaram uma concentração maior em carbonato de cálcio.

7.6.3.2. Domínio Aquífero Fissurado-cárstico

Para o Domínio aquífero fissurado-cárstico foram analisadas 19 amostras de água subterrânea validadas. As amostras FS004, SP002 e SP003 encontram-se sob a influência do domínio sub-úmido e são representadas nos gráficos pelo símbolo triangular, sendo as demais inseridas no semiárido (quadrado).

Pelo diagrama de Piper, classificam-se as águas do Domínio aquífero Fissurado-cárstico como águas bicarbonatadas cálcicas (Figura 7.34), com menor predomínio das fácies cloretada cálcica e bicarbonatada sódica. A divisão em grupos pela influência climática mostrou correlação para as amostras do clima sub-úmido, que obtiveram uma classificação hidroquímica dominante na fácies bicarbonatada cálcica.

O diagrama de Schoeller (Figura 7.35) revela a heterogeneidade nas concentrações iônicas das águas do aquífero fissurado-cárstico, com valores mais baixos de cloreto e magnésio, e homogeneidade nas concentrações de bicarbonatos para todas as amostras desse domínio.

De modo geral, as 19 análises apresentam a seguinte relação iônica (valor médio em meq/L) $rCa^{2+} > rNa^+ > rMg^{2+} > rK^+$ e $rHCO_3^- \gg rCl^- > rSO_4^{-2} > rNO_3^-$, seguindo a concentração regional anteriormente definida, indicando troca de bases.

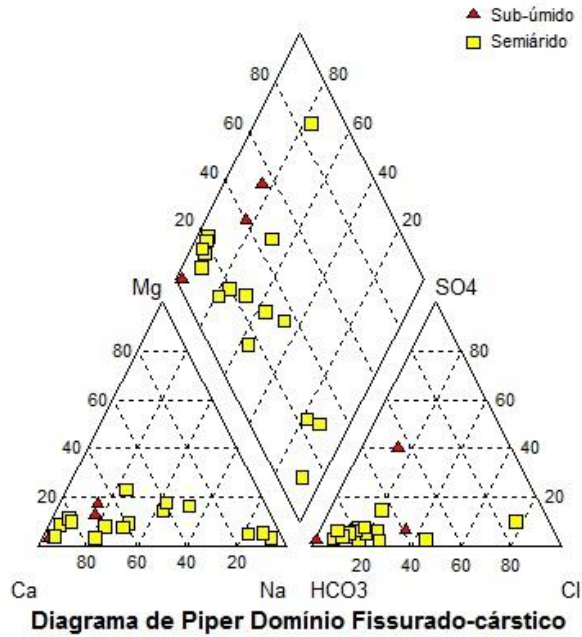


Figura 7.34: Diagrama de Piper para 19 amostras

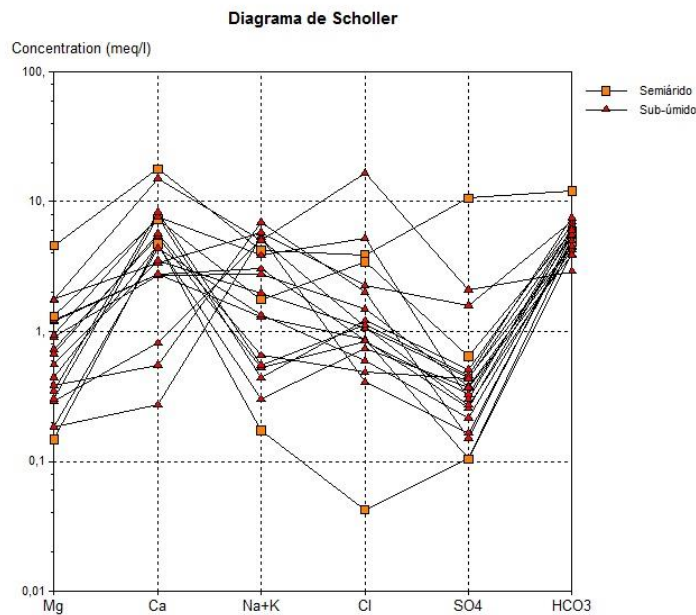
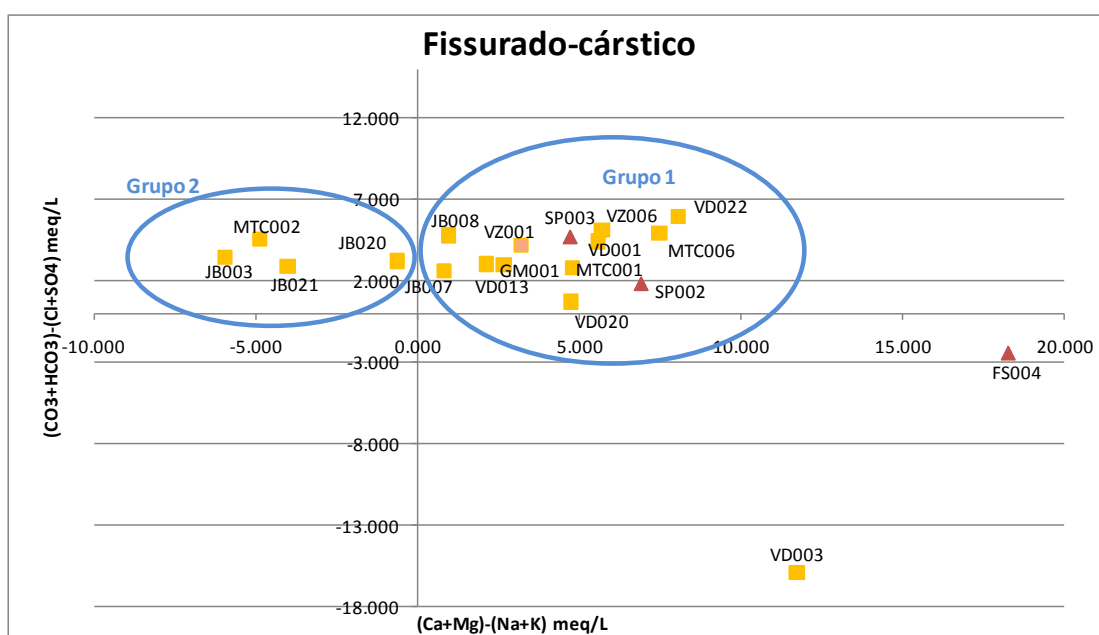


Figura 7.35: Diagrama de Schoeller para 19 amostras

Pelo diagrama de Chadha (Figura 7.36), 69% das águas amostradas nesse domínio aquífero puderam ser enquadradas no mesmo grupo (Grupo 1) classificado como águas bicarbonatadas cálcicas-magnesianas com dureza temporária. 21% das amostras foram agrupadas no Grupo 2 com características de águas bicarbonatadas sódicas. Dois pontos destoantes foram classificados como discrepantes dos demais grupos, e são águas de característica cloretada cálcica a magnesiânica com dureza permanente.

Os valores médios para os parâmetros físico-químicos das amostras do Domínio fissurado-cárstico são apresentados na Tabela 7.35. Para as águas do Grupo 1 a temperatura média ficou em torno de 26,7°C, com uma condutividade média de 691,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e dureza total média de 329,4 mg/L. A turbidez média para esse grupo foi alta, chegando quase a 10 mg/L. O teor de fluoreto ionizado médio é baixo, em torno de 0,40 mg/L, com o sódio total médio em 31,8 mg/L e a concentração de cálcio em torno de 103,9 mg/L. A alcalinidade em bicarbonatos é maior que nas amostras discrepantes, chegando a 330,2 mg/L.



| Aquíferos Fissurados-cársticos | | |
|--------------------------------|---------|-------------|
| Grupo 1 | Grupo 2 | Discrepante |
| SP002 | JB003 | FS004 |
| SP003 | JB020 | VD003 |
| GM001 | JB021 | |
| JB007 | MTC002 | |
| JB008 | | |
| VD001 | | |
| MTC001 | | |
| MTC006 | | |
| VD013 | | |
| VD020 | | |
| VD022 | | |
| VZ001 | | |
| VZ006 | | |

Figura 7.36: Diagrama adaptado de Chadha (1999) e a separação das amostras do Domínio aquífero fissurado-cárstico em grupo com característica química semelhante.

O ponto VD022 apresentou valor de nitrato um pouco acima do limite estabelecido pela Portaria MS 2914/11, o que pode estar relacionado às condições e manutenção do poço e a proximidades de fossas e/ou contaminações antrópicas.

O Grupo 2 apresenta águas do tipo bicarbonatadas sódicas. A condutividade média desse grupo é de 737,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com STD médio de 516,0 mg/L e alcalinidade de bicarbonato média em torno de 335,0 mg/L. O pH médio mostrou-se mais básico que das demais amostras (7,78) e a dureza total média é relativamente baixa; e concentrações médias de cálcio em 25,0 mg/L e de sódio em 131,8 mg/L, o que é o oposto das concentrações observadas para o Grupo 1. A concentração média de fluoretos mostrou-se relativamente elevada, em 2,75 mg/L. Esses pontos de amostragem são poços com profundidade média entre 90-100 m, um pouco mais profundos que os do Grupo 1, e localizam-se na Depressão San-Franciscana da bacia. Podem-se associar as altas concentrações de flúor nesse grupo de amostras aos altos valores em sódio e baixas concentrações em cálcio. Pode-se dizer que as águas do Grupo 2 são águas com maiores concentrações de metais alcalinos e que podem indicar fluxo subterrâneo em direção aos pontos das amostras do Grupo 1, com a diminuição dos metais alcalinos e aumento de metais terrosos.

As amostras discrepantes apresentaram altos valores de condutividade elétrica e dureza total elevada, e o pH mais neutro. Os STD também apresentaram valores muito grandes, chegando a 1.800 mg/L.

O estado de equilíbrio hidroquímico, representado pelo índice de saturação dos minerais do Domínio fissurado-cárstico (Calcita, Dolomita e Gipsita), o Índice de Troca de Bases (itb_1 , itb_2 e itb_3) e os $r\text{Na}^+/r\text{Ca}^{2+}$, $r\text{Cl}^-/r\text{HCO}_3^-$, $r\text{SO}_4^{2-}/r\text{Cl}^-$ e $r\text{Mg}^{2+}/r\text{Ca}^+$, estão representados na Tabela 7.36.

Tabela 7.35: Dados dos parâmetros físico-químicos para o Domínio aquífero fissurado-cárstico.

| Parâmetros | | Grupo 1 | | | | | | | | | | | | Grupo 2 | | | | Discrepantes | | Grupo 1 | Grupo 2 | |
|--------------------------------|------------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------------|--------|---------|---------|--------|
| | | GM001 | JB007 | JB008 | MTC001 | MTC006 | SP002 | SP003 | VD001 | VD013 | VD020 | VD022 | VZ001 | VZ006 | JB003 | JB020 | JB021 | MTC002 | FS004 | VD003 | média | média |
| Temperatura da água | °C | 29,2 | 28 | 26,8 | 26,8 | 25 | 26,3 | 25 | 26 | 28 | 27,3 | 27 | 26,8 | 24,6 | 27,7 | 26,8 | 27,3 | 27,8 | 26 | 26,2 | 26,68 | 27,40 |
| Turbidez | NTU | 0,5 | 85,7 | 1,16 | 1,3 | 1,04 | 0,64 | 1,13 | 0,25 | 0,61 | 0,63 | 0,6 | 0,79 | 34,5 | 0,65 | 0,5 | 1,36 | 1,82 | 3,91 | 0,61 | 9,91 | 1,08 |
| Condutividade elétrica, Lab | µS/cm | 451 | 653 | 594 | 571 | 786 | 1000 | 433 | 691 | 546 | 1185 | 852 | 557 | 683 | 502 | 1078 | 596 | 774 | 2006 | 2309 | 692,46 | 737,50 |
| Cor verdadeira | UPt | 10 | 18 | 10 | 50 | 10 | 10 | 10 | 5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 18 | 10 | 10 | 10 | 27 | 10 | 10 | 13,92 | 14,25 |
| Dureza total | mg/L CaCO3 | 227 | 196 | 212 | 320 | 339 | 419 | 213 | 367 | 394 | 539 | 461 | 242 | 353 | 27,2 | 212 | 63,1 | 89,8 | 1191 | 1206 | 329,38 | 98,03 |
| pH, Lab | unid.de pH | 7,6 | 7,6 | 7,5 | 7,5 | 7 | 7,8 | 7,6 | 7,1 | 8,2 | 7,8 | 7,4 | 7,4 | 7,2 | 8,3 | 7,4 | 7,7 | 7,7 | 7 | 6,8 | 7,52 | 7,78 |
| Sólidos dissolvidos totais lab | mg/L | 302 | 372 | 426 | 340 | 574 | 714 | 298 | 412 | 402 | 790 | 642 | 366 | 444 | 388 | 678 | 514 | 484 | 1872 | 1548 | 467,85 | 516,00 |
| Cálcio Total | mg/L | 55,3 | 54 | 55,4 | 93,1 | 152,7 | 146,9 | 94,6 | 108 | 70,8 | 153,4 | 165,6 | 87,4 | 114 | 5,43 | 67,5 | 16,3 | 11 | 358 | 301 | 103,94 | 25,06 |
| Sódio Total | mg/L | 28,8 | 63 | 69 | 5,97 | 9,61 | 39,64 | 3,44 | 10,67 | 44,03 | 87,2 | 10,51 | 28,64 | 13,84 | 120,9 | 131,8 | 116,9 | 157,5 | 94,8 | 114,4 | 31,87 | 131,78 |
| Magnésio Total | mg N/L | 14,64 | 11,08 | 14,9 | 5,39 | 3,68 | 15,91 | 1,79 | 8,82 | 6,77 | 11,37 | 4,24 | 2,24 | 8,17 | 2,23 | 21,5 | 3,55 | 4,66 | 55,8 | 21,1 | 8,38 | 7,99 |
| Potássio Total | mg N/L | 1,614 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 1,343 | 0,02 | 2,33 | 2,04 | 2,45 | 3,63 | 3,72 | 1,98 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 1,91 | 1,48 | 0,02 |
| Alcalinidade de bicarbonato | mg/L CaCO3 | 240 | 273 | 359 | 236 | 404 | 361 | 297 | 339 | 275 | 381 | 457 | 303 | 368 | 313 | 429 | 259 | 342 | 736 | 177 | 330,23 | 335,75 |
| Cloreto total | mg/L | 30,8 | 52,6 | 30,1 | 26,2 | 42,9 | 122 | 1,5 | 29,9 | 37,3 | 186 | 39,6 | 21,1 | 17,2 | 14,4 | 80 | 38,4 | 71,6 | 137 | 593 | 49,02 | 51,10 |
| Sulfato total | mg/L | 5 | 18,1 | 12,3 | 17,7 | 24,3 | 30,9 | 5 | 15,7 | 21,3 | 14,4 | 22 | 10,4 | 20,8 | 7,9 | 75,9 | 13 | 7,2 | 511 | 101 | 16,76 | 26,00 |
| Nitrato | mg/L | 0,73 | 0,02 | 0,02 | 1,23 | 0,22 | 1,39 | 0,69 | 1,25 | 3,18 | 0,61 | 10,79 | 0,44 | 1,52 | 0,02 | 0,3 | 0,02 | 0,02 | 1,52 | 0,38 | 1,70 | 0,09 |
| Alumínio Total | mg/L | 0,1 | 0,361 | 0,1 | 0,05 | 0,1182 | 0,1 | 0,1 | 0,05 | 0,1 | 0,1 | 0,214 | 0,1 | 0,05 | 0,164 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,232 | 0,1 | 0,12 | 0,12 |
| Bário Total | mg/L | 0,0543 | 0,1125 | 0,1402 | 0,0208 | 0,0477 | 0,1153 | 0,0291 | 0,0299 | 0,0375 | 0,0376 | 0,0313 | 0,204 | 0,0452 | 0,0453 | 0,0965 | 0,051 | 0,314 | 0,0234 | 0,0667 | 0,07 | 0,13 |
| Boro total | mg/L | 0,07 | 0,2339 | 0,07 | 0,035 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,035 | 0,2274 | 0,07 | 0,07 | 0,1907 | 0,035 | 0,818 | 0,101 | 0,0867 | 0,771 | 0,07 | 0,07 | 0,10 | 0,44 |
| Cobre Total | mg/L | 0,004 | 0,0196 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,0048 | 0,0061 | 0,002 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,002 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,0105 | 0,004 | 0,01 | 0,00 |
| Estrôncio Total | mg/L | 0,331 | 0,661 | 14,28 | 0,385 | 0,78 | 1,876 | 0,3 | 0,558 | 0,409 | 1,322 | 0,918 | 0,397 | 1,004 | 0,312 | 4,223 | 0,556 | 1,274 | 2,406 | 1,46 | 1,79 | 1,59 |
| Ferro Total | mg/L | 0,03 | 36,78 | 0,1236 | 0,015 | 0,03 | 0,0645 | 0,0936 | 0,015 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,254 | 0,0362 | 0,03 | 0,0373 | 0,1919 | 0,1862 | 0,03 | 2,89 | 0,07 |
| Fluoreto ionizado | mg/L | 0,1 | 1,02 | 0,36 | 0,25 | 0,2 | 0,38 | 0,17 | 0,53 | 0,43 | 0,41 | 0,51 | 0,53 | 0,36 | 3,86 | 0,21 | 0,6 | 6,25 | 0,1 | 0,23 | 0,40 | 2,73 |
| Fósforo total | mg/L | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,1 | 0,04 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,02 |
| Lítio Total | mg/L | 0,0313 | 0,064 | 0,0577 | 0,00718 | 0,007 | 0,0301 | 0,0189 | 0,01024 | 0,0676 | 0,0818 | 0,005 | 0,0617 | 0,0185 | 0,282 | 0,0432 | 0,0284 | 0,2059 | 0,0747 | 0,0536 | 0,04 | 0,14 |
| Manganês Total | mg/L | 0,0176 | 0,06 | 0,0387 | 0,0015 | 0,003 | 0,0248 | 0,003 | 0,0015 | 0,003 | 0,0057 | 0,003 | 0,003 | 0,0241 | 0,0081 | 0,0523 | 0,0127 | 0,003 | 0,0411 | 0,0162 | 0,01 | 0,02 |
| Nitrito | mg/L | 0,003 | 0,008 | 0,001 | 0,004 | 0,002 | 0,006 | 0,001 | 0,001 | 0,022 | 0,003 | 0,003 | 0,001 | 0,005 | 0,012 | 0,004 | 0,001 | 0,002 | 0,004 | 0,001 | 0,00 | 0,00 |
| Nitrogênio amoniacal total | mg/L | 0,1 | 0,1 | 0,27 | 0,05 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,21 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,05 | 0,19 | 0,1 | 0,15 | 0,47 | 0,1 | 0,1 | 0,12 | 0,23 |
| Selênio Total | mg/L | 0,0005 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0011 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0109 | 0,0005 | 0,00 | 0,00 |
| Silício Dissolvido | mg/L | 14,77 | 12,64 | 11,43 | 6,13 | 7,81 | 6,21 | 10,93 | 8,66 | 18,04 | 15,57 | 13,23 | 11,11 | 9,12 | 7,25 | 10,55 | 8,2 | 7,27 | 14,18 | 11,59 | 11,20 | 8,32 |
| Vanádio Total | mg/L | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Zinco Total | mg/L | 0,0559 | 0,0387 | 0,067 | 0,0615 | 0,0772 | 0,0639 | 0,0364 | 0,0869 | 0,0318 | 0,0718 | 0,0803 | 0,0328 | 0,1664 | 0,02 | 0,0946 | 0,02 | 0,0247 | 0,2261 | 0,0756 | 0,07 | 0,04 |

Tabela 7.36: Índices hidrogeoquímicos para o Domínio fissurado-cárstico

| | Ponto | Troca de bases itb1 | Troca de bases itb2 | Troca de bases itb3 | Log IS Calcita | Log IS Dolomita | Log IS Gibbstita | rNa/rCa | rCl/HCO ₃ | rMg/rCa | rSO ₄ /rCl |
|---------|---------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------|-----------------|------------------|---------|----------------------|---------|-----------------------|
| Grupo 1 | GM001 | 0,03 | -0,49 | 0,02 | -0,41 | -1,00 | 1,98 | 0,45 | 0,22 | 0,44 | 0,12 |
| | JB007 | -0,87 | -0,87 | 0,09 | 0,35 | 0,39 | 1,81 | 1,02 | 0,33 | 0,34 | 0,25 |
| | JB008 | -1,89 | -2,57 | -0,11 | -0,10 | -0,40 | 1,91 | 1,09 | 0,14 | 0,44 | 0,30 |
| | MTC001 | 1,22 | 0,59 | 0,52 | 0,09 | -0,68 | 1,49 | 0,06 | 0,19 | 0,10 | 0,50 |
| | MTC006 | 1,30 | 0,64 | 0,63 | 0,59 | -0,09 | 1,82 | 0,05 | 0,18 | 0,04 | 0,42 |
| | SP002 | 2,72 | 0,49 | 0,97 | 0,31 | 0,03 | 1,88 | 0,24 | 0,58 | 0,18 | 0,19 |
| | SP003 | 0,00 | -3,10 | 0,10 | -0,53 | -2,43 | 2,35 | 0,03 | 0,01 | 0,03 | 2,46 |
| | VD001 | 0,56 | 0,38 | 0,42 | -0,46 | -1,71 | 2,26 | 0,09 | 0,15 | 0,13 | 0,39 |
| | VD013 | -0,42 | -0,87 | 0,34 | 0,51 | 0,27 | 1,69 | 0,54 | 0,23 | 0,16 | 0,42 |
| | VD020 | 2,35 | 0,27 | 0,54 | 0,36 | -0,50 | 2,29 | 0,50 | 0,84 | 0,12 | 0,06 |
| | VD022 | 1,12 | 0,51 | 0,88 | 0,08 | -1,06 | 1,87 | 0,06 | 0,15 | 0,04 | 0,41 |
| | VZ001 | -0,42 | -1,25 | 0,08 | -0,17 | -1,06 | 1,86 | 0,29 | 0,12 | 0,04 | 0,36 |
| | VZ006 | 0,33 | -0,35 | 0,45 | -0,27 | -1,33 | 1,96 | 0,11 | 0,08 | 0,12 | 0,89 |
| | Grupo 2 | JB003 | -4,68 | -12,11 | -0,79 | -0,13 | -0,26 | 1,10 | 19,41 | 0,08 | 0,68 |
| JB020 | | -1,89 | -1,56 | 1,09 | 0,40 | 0,68 | 1,51 | 1,70 | 0,32 | 0,53 | 0,70 |
| JB021 | | -3,14 | -3,72 | -0,68 | 0,07 | -0,15 | 1,10 | 6,25 | 0,26 | 0,36 | 0,25 |
| MTC002 | | -4,67 | -2,41 | -0,72 | 0,09 | 0,19 | 0,98 | 12,48 | 0,36 | 0,70 | 0,07 |
| Disc. | FS004 | 10,39 | -0,09 | 10,66 | 0,31 | 0,17 | 2,64 | 0,23 | 0,32 | 0,26 | 2,75 |
| | VD003 | 13,85 | 0,70 | 6,15 | 0,73 | 0,83 | 1,05 | 0,33 | 5,77 | 0,12 | 0,13 |

Para o Domínio fissurado-cárstico, verifica-se que em 93% das amostras do Grupo 1 apresentam $itb_3 > 0$ e corresponde a um aumento nas concentrações de cloretos em detrimento da entrada de metais alcalinos derivados do terreno. Esse fato pode indicar que essas amostras localizam-se em zonas de grande fluxo das águas subterrâneas.

Para o Grupo 2, os valores negativo para itb_1 e itb_2 indicam aumento de contribuição dos íons metais alcalinos derivados das rochas, ou águas com maior tempo de contato com as rochas aquíferas nesses locais. E percebe-se que, aliado a esse fato, as concentrações de fluoretos são grandes em duas amostras (JB003 e MTC002), ou seja, o fluoreto pode estar vindo da troca de metais alcalinos das rochas em contato com as águas nesses pontos.

As amostras discrepantes apresentam troca de bases iônicas, quando a água fornece os metais alcalinos, e indica uma maior concentração de cálcio e cloretos nesses pontos amostrados. Os valores de STD e dureza total para esses dois pontos são altíssimos, indicando que são amostras de águas com dureza permanente.

Constata-se que, para o Grupo 1, 54% das amostras estão sobressaturadas relativamente à Calcita e apenas 23% em Dolomita ($\text{Log IS} > 0$), portanto com tendência para formar precipitados e incrustações. No Grupo 2, 75% das amostras apresentam saturação em calcita e 50% em dolomita. As amostras discrepantes estão sobressaturadas

tanto em calcita quanto em dolomita, mostrando que são águas com maior tempo de transito subterrâneo. A totalidade das amostras apresenta-se sobressaturada em relação à Gibbsita.

Analisando os índices iônicos, observou-se que para a razão rNa^+/rCa^{2+} , somente o Grupo 2 obteve todos os valores acima de um, indicando que em geral há troca de bases nesse agrupamento. Para o Grupo 1 poucos valores ficaram acima de 1, indicando que as águas são mais duras.

A relação $rCl^-/rHCO_3^-$, permite estudar a evolução da concentração de sais nas águas subterrâneas ao longo do seu percurso. Os resultados obtidos indicam na maioria dos casos uma razão $rCl^-/rHCO_3^- < 1$ sendo consideradas águas pouco salobras, com a exceção do ponto anômalo (VD003) com valor acima de 5,0.

O valor médio da relação rMg^{2+}/rCa^+ , para todo o domínio aponta, normalmente, para a circulação em formações mais ricas em carbonatos de cálcio que em magnésio.

Dos 3 pontos incluídos no clima sub-úmido, a relação de rSO_4^{2-}/rCl^- indicou para 2 amostras valores acima de 1, e essa razão indica a pouca concentração de cloreto nessas águas. Esses pontos se localizam mais a montante do rio Verde Grande, em região próxima da zona de recarga da bacia.

7.6.3.3. Domínio Aquífero Fissurado

No Domínio aquífero fissurado são encontrados poucos poços explotando em comparação aos demais sistemas aquíferos, e foram amostrados 4 pontos de água subterrânea validadas.

As águas do Domínio fissurado apresentam fácies bicarbonatada cálcica dominante com leve transição para cloretada cálcica, conforme projeção em diagrama de Piper (Figura 7.37).

A divisão em grupos pela influência climática não mostrou correlação com esse Domínio, onde a totalidade das águas se encontram sob a influência da zona sub-úmida, e possuindo dois tipos predominantes de águas.

O diagrama de Schoeller (Figura 7.38) revela a heterogeneidade nas concentrações dos íons Na^+ , Cl^- e SO_4^{2-} , com certa homogeneidade nas concentrações de Ca^{2+} , Mg^{2+} e HCO_3^- para as águas desse domínio aquífero.

As 4 análises apresentam a seguinte relação iônica (valor médio em meq/L) $rCa^{2+} > rNa^+ > rMg^{2+} > rK^+$ e $rHCO_3^- \gg rCl^- > rSO_4^{2-} > rNO_3^-$, seguindo a concentração regional anteriormente definida, o que indica troca de bases.

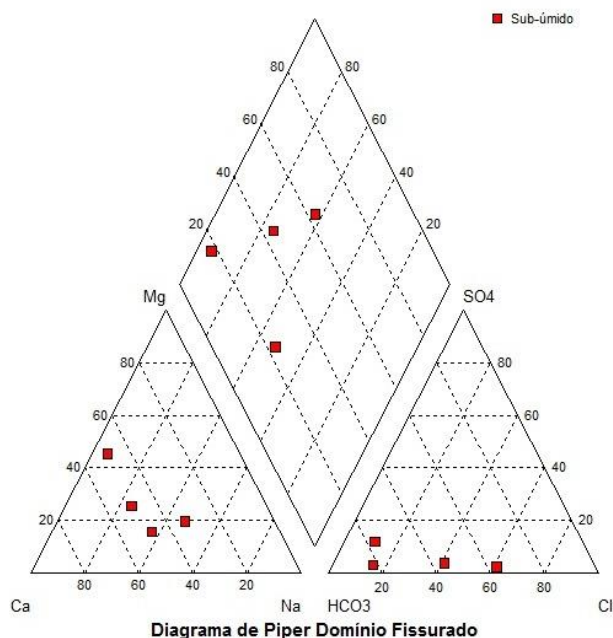


Figura 7.37: Diagramas de Piper para 4 amostras

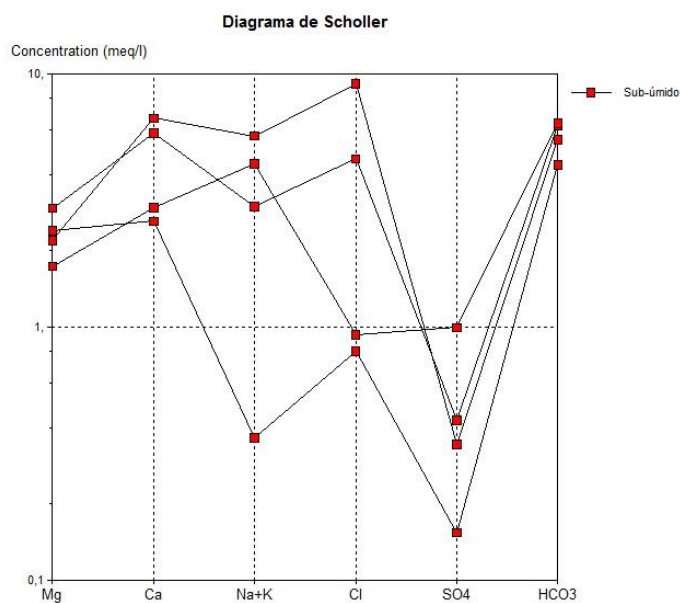
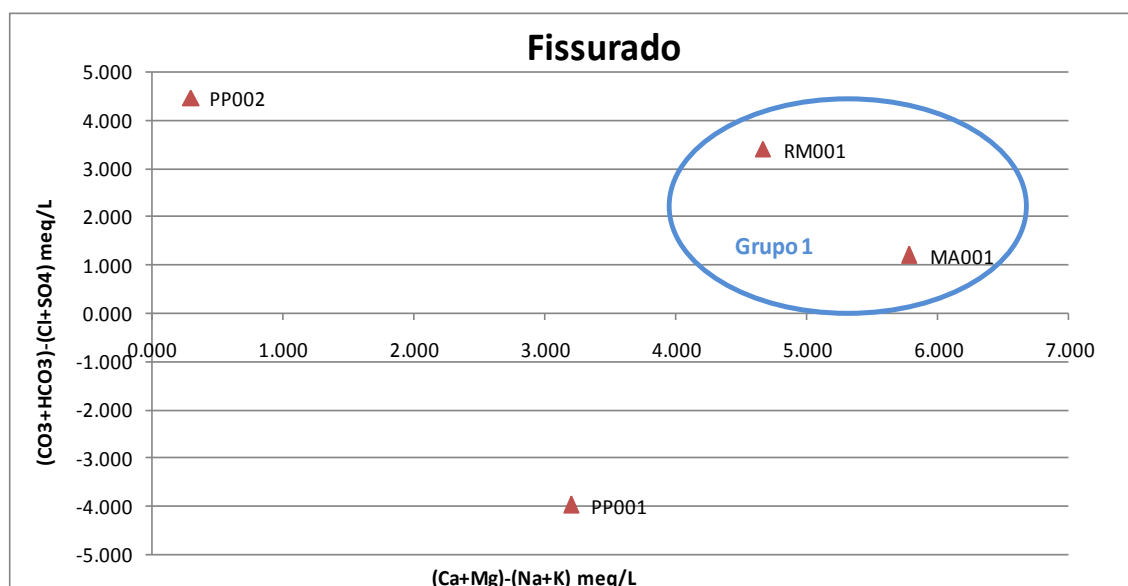


Figura 7.38: Diagramas de Schoeller para 4 amostras

Pelo diagrama de Chadha (Figura 7.39), puderam ser agrupadas por aproximação 2 amostras no Grupo 1, e as 2 outras não tiveram classificação. O grupo 1 do Domínio fissurado apresenta águas bicarbonatadas cálcica-magnesianas, com dureza temporária. O

ponto PP002 é classificado como bicarbonatada cálcica onde os íons ácidos fracos excedem os íons ácidos fortes. Já o ponto PP001 é classificado como fácies cloretada cálcica-magnesiana com dureza permanente.



| Aquíferos fissurados | |
|----------------------|---------------------|
| Grupo 1 | Amostras diferentes |
| MA001 | PP001 |
| RM001 | PP002 |

Figura 7.39: Diagrama adaptado de Chadha (1999) e a separação das amostras do Domínio aquífero fissurado em grupo com característica química semelhante.

As amostras do Grupo 1 apresentaram valores médios de dureza e condutividade elevados (Tabela 7.37). As águas do Grupo 1 possuem um pH neutro e maior teor em magnésio que as demais amostras indicando contribuição geoquímica das rochas básicas presentes nesse domínio, sendo bem caracterizadas como do tipo cálcio-magnesiana bicarbonatada.

A amostra PP002 apresenta concentrações de ânions de ácidos fracos maiores que os ânions de ácidos fortes. Também se observa maior valor de alcalinidade e o sulfato possui concentração elevada de 47,8 mg/L o que indica influência litológica das mineralizações sulfetadas presentes nas rochas fissuradas do Grupo Macaúbas, local onde se encontra esse poço.

A amostra PP001 possui teores de cálcio e sódio maiores que das demais amostras do Domínio fissurado, e em particular apresenta valores elevados para bário, estrôncio, potássio, com o teor de fluoreto ionizado em 1,4 mg/L, indicando forte influência de rochas ígneas básicas próximas, o que contribui para o aumento da condutividade e de

sólidos totais dissolvidos. O teor de bário observado é considerado elevado (1,106mg/L), sendo o limite preconizado para potabilidade na Portaria MS 2914/11 de 0,7 mg/L, mas isso pode ser um bom indicador de má construção do poço, onde se utiliza o hidróxido de bário como fluido de perfuração de poços. A concentração elevada de estrôncio nesse ponto é esperada, devido à geologia de rochas máficas observadas no entorno desse ponto.

O estado de equilíbrio hidroquímico, representado pelo índice de saturação dos minerais do Domínio fissurado (Calcita, Dolomita e Gibsita), o Índice de Troca de Bases (itb_1 , itb_2 e itb_3) e os índices rNa^+/rCa^{2+} , $rCl^-/rHCO_3^-$, rSO_4^{2-}/rCl^- e rMg^{2+}/rCa^+ , estão representados na Tabela 7.38.

Tabela 7.37: Índices hidrogeoquímicos para o Domínio fissurado

| | Ponto | Troca de bases itb_1 | Troca de bases itb_2 | Troca de bases itb_3 | Log IS Calcita | Log IS Dolomita | Log IS Gibsita | rNa/rCa | rCl/HCO_3 | rMg/rCa | rSO_4/rCl |
|---------|-------|------------------------|------------------------|------------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| Grupo 1 | MA001 | 2,51 | 0,35 | 0,96 | -0,12 | -0,36 | 2,30 | 0,49 | 0,74 | 0,51 | 0,09 |
| | RM001 | 0,67 | 0,54 | 0,30 | -0,25 | -0,38 | 1,93 | 0,11 | 0,18 | 0,92 | 0,19 |
| Disc. | PP001 | 3,38 | 0,38 | 1,25 | -0,23 | -0,77 | 1,89 | 0,78 | 1,66 | 0,33 | 0,04 |
| | PP002 | -1,69 | -3,74 | 0,50 | 0,26 | 0,44 | 1,59 | 1,42 | 0,15 | 0,58 | 1,07 |

Para o Domínio fissurado, verifica-se que 100% das amostras analisadas apresentam índice de troca de bases $itb_3 > 0$, e corresponde a um endurecimento das águas nesse domínio, com aumento dos teores de cloretos, sendo a água a fornecedora dos íons alcalinos. O ponto PP002 possui maior teor alcalino em solução proveniente das rochas cristalinas alteradas, ao apresentarem valores de itb_1 e itb_2 negativos.

Constata-se que somente o ponto PP002 está sobressaturado relativamente em calcita e dolomita ($Log IS > 0$), portanto com tendência para formar precipitados e incrustações. A totalidade das amostras apresenta-se sobressaturada em relação à Gibsita.

O aumento da relação rNa^+/rCa^{2+} para a amostra PP002 e a diminuição do índice de troca de bases podem significar dois fenômenos: a existência de troca de bases (o cálcio das águas é retido pelas argilas que o faz liberando sódio) e/ou precipitação de calcita no interior do aquífero.

Os resultados obtidos da relação $rCl^-/rHCO_3^-$ indicam na maioria dos casos valor menor que 1, sendo consideradas águas pouco salobras, com a exceção do ponto PP001 com valor de 1,77.

Tabela 7.38: Dados dos parâmetros físico-químicos para os grupos do Domínio aquífero fissurado.

| Parâmetros | | Grupo 1 | | Amostras diferentes | | Grupo 1 |
|--------------------------------|------------|---------|--------|---------------------|--------|---------|
| | | RM001 | MA001 | PP002 | PP001 | média |
| Temperatura da água | °C | 26,5 | 27,6 | 27 | 28,8 | 27,05 |
| Turbidez | NTU | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,50 |
| Condutividade elétrica, Lab | µS/cm | 519 | 1167 | 807 | 1380 | 843,00 |
| Cor verdadeira | UPt | 10 | 10 | 10 | 10 | 10,00 |
| Dureza total | mg/L CaCO3 | 252 | 603 | 247 | 493 | 427,50 |
| pH, Lab | unid.de pH | 7,7 | 7 | 7,5 | 7,4 | 7,35 |
| Sólidos dissolvidos totais lab | mg/L | 313 | 730 | 476 | 1002 | 521,50 |
| Cálcio Total | mg/L | 52,5 | 116,7 | 59,5 | 134 | 84,60 |
| Sódio Total | mg/L | 6,8 | 65,4 | 96,8 | 119,2 | 36,10 |
| Magnésio Total | mg N/L | 29,3 | 35,8 | 21,1 | 26,7 | 32,55 |
| Potássio Total | mg N/L | 0,02 | 0,03 | 0,02 | 0,12 | 0,03 |
| Alcalinidade de bicarbonato | mg/L CaCO3 | 266 | 382 | 390 | 336 | 324,00 |
| Cloreto total | mg/L | 28,4 | 164 | 33 | 324 | 96,20 |
| Sulfato total | mg/L | 7,4 | 20,6 | 47,8 | 16,5 | 14,00 |
| Nitrato | mg/L | 1,46 | 8,43 | 1,39 | 8,51 | 4,95 |
| Alumínio Total | mg/L | 0,1 | 0,1513 | 0,1 | 0,1197 | 0,13 |
| Bário Total | mg/L | 0,1337 | 0,1277 | 0,0604 | 1,106 | 0,13 |
| Boro total | mg/L | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 |
| Cobre Total | mg/L | 0,004 | 0,0048 | 0,004 | 0,004 | 0,00 |
| Estrôncio Total | mg/L | 0,0386 | 0,665 | 0,59 | 5,43 | 0,35 |
| Ferro Total | mg/L | 0,03 | 0,0934 | 0,03 | 0,961 | 0,06 |
| Fluoreto ionizado | mg/L | 0,12 | 0,37 | 0,1 | 1,4 | 0,25 |
| Fósforo total | mg/L | 0,02 | 0,03 | 0,02 | 0,12 | 0,03 |
| Lítio Total | mg/L | 0,005 | 0,005 | 0,0306 | 0,0239 | 0,01 |
| Manganês Total | mg/L | 0,003 | 0,0038 | 0,003 | 0,1932 | 0,00 |
| Nitrito | mg/L | 0,002 | 0,003 | 0,002 | 0,004 | 0,00 |
| Nitrogênio amoniacal total | mg/L | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,10 |
| Selênio Total | mg/L | 0,001 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0005 | 0,00 |
| Silício Dissolvido | mg/L | 10,58 | 21,37 | 11,18 | 28,83 | 15,98 |
| Vanádio Total | mg/L | 0,01 | 0,012 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Zinco Total | mg/L | 0,0458 | 0,0485 | 0,0439 | 0,0601 | 0,05 |

O valor médio da relação rMg^{2+}/rCa^{+} nesse domínio aponta, normalmente, para a circulação em formações mais ricas em cálcio que em magnésio, sendo que para o ponto PP001 a presença de magnésio aumenta a razão para quase 1.

A relação de rSO_4^{2-}/rCl^{-} apresentou valores muito pequenos, sendo a contribuição das águas pluviais maior nesses tipos aquíferos. O ponto PP002 apresenta valor alto para essa relação, mas devido a grande concentração de sulfetos já mencionada em parágrafo anterior.

7.6.3.4. Domínio Aquífero Granular

O Domínio aquífero granular foi amostrado em 4 pontos, em poços que são abastecidos por águas de sedimentos inconsolidados, aluviões e depósitos detrítico-lateríticos próximos a drenagens. Os pontos EP004 e EP006 encontram-se no extremo norte da bacia, junto aos depósitos aluvionares do rio Verde Pequeno, divisa com Bahia. O ponto EP001 encontra-se locado em sedimentos de afluentes do rio Verde Pequeno. Já o ponto PP004 encontra-se locado em sedimentos próximos a drenagem do ribeirão Serra Branca, a leste da bacia.

Pelo diagrama de Piper (Figura 7.40), as águas do domínio granular que estão sob a influência do clima semi-árido apresentaram fácies hidroquímica cloretada cálcica, e a única amostra na zona sub-úmida foi classificado como bicarbonatada cálcica. Isso indica que a influência climática nesses tipos aquíferos reflete-se na hidroquímica dos mesmos.

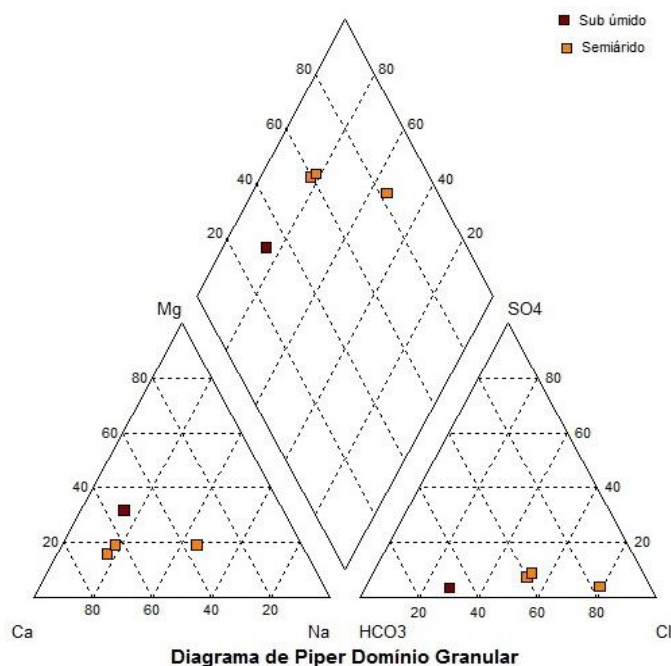


Figura 7.40: Diagramas de Piper para 4 amostras

Observam-se pelo diagrama de Schoeller que as concentrações iônicas são maiores para as amostras coletadas no semiárido, principalmente para cloreto, mostrando homogeneidade nos teores de bicarbonato e cálcio (Figura 7.41).

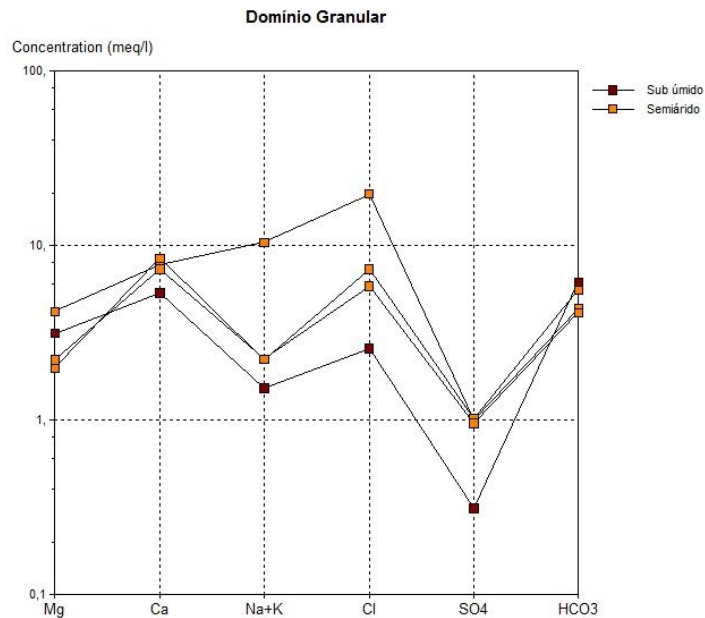
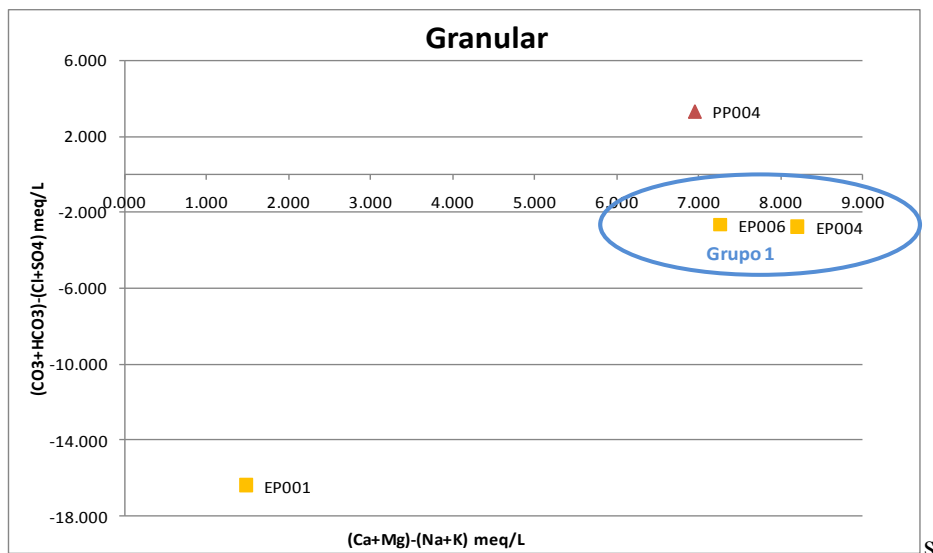


Figura 7.41: Diagramas de Schoeller para 4 amostras



| Grupo 1 | Amostras diferentes |
|---------|---------------------|
| EP004 | EP001 |
| EP006 | PP004 |

Figura 7.42: Diagrama adaptado de Chadha (1999) e a separação das amostras do Domínio aquífero granular em grupo com característica química semelhante.

De acordo com o diagrama de Chadha, foi possível realizar o agrupamento de 2 pontos com características semelhantes nesse domínio aquífero (Figura 7.42). O Grupo 1 é composto por águas cloretadas cálcica-magnesianas, e de acordo com Chadha (1999), essas amostras se concentram na área do diagrama que considera que os íons alcalinos terrosos excedem os íons alcalinos.

Os pontos EP001 e PP004 foram classificados como discrepantes do Grupo 1 pelo diagrama de Chadha, e possuem, respectivamente, classificação hidroquímica cloretada cálcica e bicarbonatada cálcica.

Analisando os parâmetros físico-químicos do Grupo 1 (Tabela 7.39), observa-se valores médios de condutividade elétrica de 1158,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com temperatura média das águas subterrâneas em 28,45 °C, concentração média de sólidos totais dissolvidos em 865,0 mg/L e dureza total de 504,5 mg/L. O teor médio de cloreto é de 233,5 mg/L e o sódio possui concentração média de 47,70 mg/L. É observado nessas amostras teor elevado em ferro em relação as demais. As águas do Grupo 1 estão sob a influência climática do semiárido, o que é refletido nas concentrações elevadas de condutividade elétrica, STD, cloretos e sódio, devido a grande evaporação dessas águas.

A amostra EP001, considerada diferente, apresentou valores maiores que os do Grupo 1 para os parâmetros condutividade elétrica, cloretos, dureza total, sólidos totais dissolvidos e sódio, incluindo alto valor para fluoreto, em 1,2 mg/L. Entretanto, a temperatura das águas foi amenor registrada para o domínio granular, medindo 26,5° C. Não há relação com a profundidade das águas para esse poço, visto que essa amostra é do poço com menor profundidade do aquífero granular monitorado de 57m (comparado a 84m para EP004, 80m para EP006 e 90m para PP004)

O ponto PP004 se encontra sob o domínio climático sub-úmido, e apresenta menores teores de STD, cloretos, sulfato e cálcio, comparado às outras 3 amostras. Possui também, dentre as 4 amostras de água, os menores teores para ferro, zinco e potássio.

Tabela 7.39: Dados dos parâmetros físico-químicos para os grupos do Domínio aquífero granular

| Parâmetros | | Grupo 1 | | Amostras diferentes | | Grupo 1 |
|--------------------------------|------------|---------|--------|---------------------|--------|---------|
| | | EP004 | EP006 | PP004 | EP001 | média |
| Temperatura da água | °C | 28.4 | 28.5 | 28.5 | 26.3 | 28.45 |
| Turbidez | NTU | 4.54 | 3.13 | 0.5 | 0.84 | 3.84 |
| Condutividade elétrica. Lab | µS/cm | 1112 | 1205 | 911 | 2490 | 1158.50 |
| Cor verdadeira | UPt | 20 | 10 | 10 | 10 | 15.00 |
| Dureza total | mg/L CaCO3 | 499 | 510 | 458 | 730 | 504.50 |
| pH. Lab | unid.de pH | 7.4 | 7.1 | 7 | 7.2 | 7.25 |
| Sólidos dissolvidos totais lab | mg/L | 870 | 860 | 572 | 1724 | 865.00 |
| Cálcio Total | mg/L | 169.2 | 146 | 107 | 154.6 | 157.60 |
| Sódio Total | mg/L | 47.9 | 47.5 | 32.9 | 226 | 47.70 |
| Magnésio Total | mg N/L | 24.1 | 26.8 | 38.1 | 50.7 | 25.45 |
| Potássio Total | mg N/L | 5.38 | 6.41 | 3.48 | 22.6 | 5.90 |
| Alcalinidade de bicarbonato | mg/L CaCO3 | 341 | 251 | 376 | 263 | 296.00 |
| Cloreto total | mg/L | 260 | 207 | 91.2 | 698 | 233.50 |
| Sulfato total | mg/L | 48.9 | 46 | 14.9 | 47.9 | 47.45 |
| Nitrato | mg/L | 5.44 | 0.2 | 2.49 | 5.52 | 2.82 |
| Alumínio Total | mg/L | 0.1267 | 0.1 | 0.1487 | 0.1184 | 0.11 |
| Bário Total | mg/L | 0.112 | 0.0959 | 0.161 | 0.232 | 0.10 |
| Boro total | mg/L | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 |
| Cobre Total | mg/L | 0.004 | 0.0054 | 0.004 | 0.0066 | 0.00 |
| Estrôncio Total | mg/L | 0.902 | 1.085 | 0.1978 | 1.732 | 0.99 |
| Ferro Total | mg/L | 0.82 | 0.45 | 0.03 | 0.03 | 0.64 |
| Fluoreto ionizado | mg/L | 0.24 | 0.32 | 0.13 | 1.2 | 0.28 |
| Fósforo total | mg/L | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.07 | 0.02 |
| Lítio Total | mg/L | 0.0309 | 0.022 | 0.0133 | 0.0407 | 0.03 |
| Manganês Total | mg/L | 0.00503 | 0.268 | 0.0333 | 0.007 | 0.14 |
| Nitrito | mg/L | 0.009 | 0.011 | 0.006 | 0.003 | 0.01 |
| Nitrogênio amoniacal total | mg/L | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.10 |
| Selênio Total | mg/L | 0.0008 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0028 | 0.00 |
| Silício Dissolvido | mg/L | 15.25 | 30.41 | 11.88 | 6.8 | 22.83 |
| Vanádio Total | mg/L | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| Zinco Total | mg/L | 0.0665 | 0.53 | 0.0471 | 0.0622 | 0.30 |

O estado de equilíbrio hidroquímico, representado pelo índice de saturação dos minerais do Domínio granular (Calcita, Dolomita e Gibsita), o Índice de Troca de Bases (itb_1 , itb_2 e itb_3) e os índices rNa^+/rCa^{2+} , $rCl^-/rHCO_3^-$, rSO_4^{2-}/rCl^- e rMg^{2+}/rCa^+ , estão representados na Tabela 7.40.

Tabela 7.40: Índices hidrogeoquímicos para o Domínio granular

| | Ponto | Troca de bases itb_1 | Troca de bases itb_2 | Troca de bases itb_3 | Log IS Calcita | Log IS Dolomita | Log IS Gibsita | rNa/rCa | rCl/HCO_3 | rMg/rCa | rSO_4/rCl |
|---------|-------|------------------------|------------------------|------------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| Grupo 1 | EP004 | 4,84 | 0,70 | 2,11 | 0,03 | -0,39 | 2,16 | 0,25 | 1,31 | 0,23 | 0,14 |
| | EP006 | 5,38 | 0,62 | 1,84 | -0,13 | -0,61 | 2,04 | 0,28 | 1,42 | 0,30 | 0,16 |
| Disc. | EP001 | 7,57 | 0,47 | 3,33 | -0,15 | -0,41 | 2,08 | 1,27 | 4,57 | 0,54 | 0,05 |
| | PP004 | 2,31 | 0,41 | 0,56 | -0,25 | -0,56 | 2,35 | 0,27 | 0,42 | 0,59 | 0,12 |

Em 100% das amostras analisadas apresentam índice de troca de bases positivo ($itb_3 > 0$), que poderia indicar ou um aumento dos teores de cloretos, ou uma zona de recarga, pois a água que está fornecendo os metais alcalinos.

Constata-se que somente o ponto EP004 está sobressaturado relativamente em calcita ($Log IS > 0$), sendo as demais amostras subsaturadas em calcita e dolomita. A totalidade das amostras apresenta-se sobressaturada em relação à Gibsita, e os valores são na totalidade maiores que 2, indicando que as águas dos aquíferos granulares sofrem processo de evaporação mais rapidamente e com maior intensidade que as demais.

Analisando as possíveis correlações dos índices com os domínios climáticos, observou-se que para a relação rNa^+/rCa^{2+} , somente o ponto EP001 obteve valor acima de um. Isso indica que em geral há troca de bases e aumento da salinidade das águas nesse ponto, pela influência do semiárido.

Os resultados obtidos da relação $rCl^-/rHCO_3^-$ indicam, na maioria dos casos, valores maiores que 1, sendo consideradas águas salobras, com a exceção do ponto PP004 com valor de 0,42. O valor médio da relação rMg^{2+}/rCa^+ nesse domínio aponta, normalmente, para a circulação em formações mais ricas em cálcio que em magnésio.

A relação de rSO_4^{2-}/rCl^- indicou valores muito pequenos, com a contribuição maior de águas pluviais nesses tipos aquíferos.

7.6.4. Comportamento espacial dos íons principais, parâmetros físico-químicos e relações iônicas

A espacialização das concentrações dos íons maiores em mg/L e dos parâmetros físico-químicos principais foi representada nos mapas a seguir.

Observa-se uma concentração maior de íons cálcio na região centro-sul da bacia (Figura 7.43 A), região de ocorrência das rochas calcárias da Formação Lagoa do Jacaré, enquanto que os valores de concentração de magnésio são maiores na porção leste da bacia (Figura 7.43 B), indicando a contribuição dos terrenos básicos das rochas metabásicas dos Complexos Porteirinha, Santa Isabel e alguns corpos ígneos presentes nessa região.

As concentrações de sódio são maiores no alto curso e médio curso do rio Gortuba, no extremo nordeste e na região próxima da foz do rio Verde Grande (Figura 7.44 A). O sódio é menor onde há predominância de rochas carbonáticas, o que pode indicar que a leste há uma maior troca de bases e/ou maior disponibilidade de sódio nas rochas graníticas presentes nessas áreas. Uma justificativa para isso é o fato de e águas que permeiam terrenos graníticos, o sódio e potássio são fornecidos pelas rochas, porém o potássio fica retido no solo, aumentando assim a concentração de sódio nas águas subterrâneas.

A concentração de cloreto apresenta-se mais elevada na região do rio Gortuba, na cabeceira, e no médio e baixo trecho (Figura 7.44 B). Nas regiões sul e oeste bacia, o teor em cloreto é baixo devido à entrada de águas menos ionizadas provenientes da recarga que ocorre nessa região. Ao norte da bacia, próximo da foz do rio Verde Grande, os menores teores em cloreto podem ser justificados devido às extensas irrigações existentes nessa área, que aduzem as águas do rio São Francisco, sendo essas águas mais doces. Assim, promove uma espécie de recarga artificial nessa região.

O íon sulfato é encontrado em grande concentração em relação às demais amostras analisadas na região centro-sul da bacia (Figura 7.44 C). Essa região é representada por uma grande falha transversal seguida por falha de empurrão entre as rochas do Grupo Bambuí e o Grupo Macaúbas, este último representado pelos metadiamicritos da Formação Nova Aurora, que, segundo Vilela (2010) contém sulfetos (pirita, pirrotita e raramente calcopirita) disseminados na matriz e estirados segundo a foliação. A oxidação dessas rochas e a percolação das águas de chuva numa região de recarga maior promovem o aumento das concentrações de sulfato.

Foram representados em mapas os valores interpolados de sólidos totais dissolvidos em mg/L, e temperatura da água medida in loco (Figuras 7.44 A e B).

Os parâmetros sólidos totais dissolvidos são similares aos de dureza em sua distribuição. Apresentam concentrações muito altas de STD na região centro-sul, indicando águas bem mineralizadas, indicativo de fluxo subterrâneo mais lento e profundo (Figura 7.45 A).

As águas são brandas (dureza < 50 mg/L de CaCO₃) na região sul e sudoeste da bacia, região de recarga do aquífero, e brandas na região noroeste, com provável influência da bacia do São Francisco. Os valores de dureza mais elevados são encontrados na região centro-sul da bacia, com influência do domínio cárstico em contato com falha de empurrão do Grupo Macaúbas, e no extremo nordeste onde a influência climática aliada à presença de rochas ígnea (máficas e graníticas) contribui para com a grande dureza das águas (dureza > 1000 mg/L de CaCO₃, Figura 7.45 B).

A temperatura das águas subterrâneas são maiores a norte da bacia, com valores atingindo até os 29,2°C, e os menores valores na região sul da bacia, com valores mínimos de até 23,8°C (Figura 7.45 C). A distribuição espacial das temperaturas pode ser relacionada com os domínios climáticos definidos na bacia, sendo a região a sul da bacia definida como sub-úmida, e a norte o domínio semiárido. Com exceção dos pontos VZ001, VZ006 e MTC006, que apesar de se encontrarem no domínio semiárido, apresentaram águas mais frias. A profundidade média desses poços é de 100 m, e infere-se que possam ter influência de aportes de águas mais profundas nesses locais (Figura 7.45C).

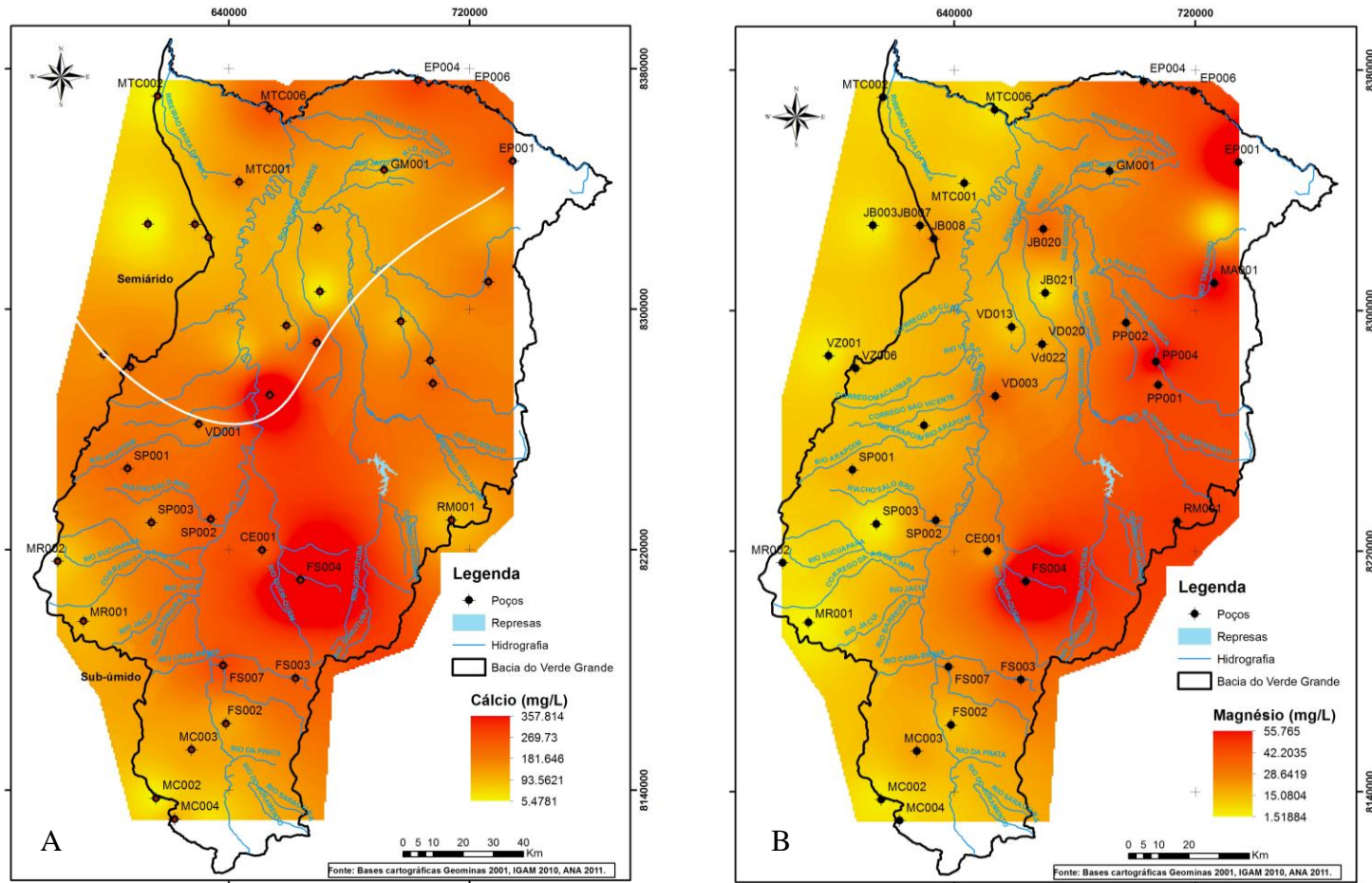


Figura 7.43: Distribuição espacial das concentrações dos íons maiores na bacia do rio Verde Grande.

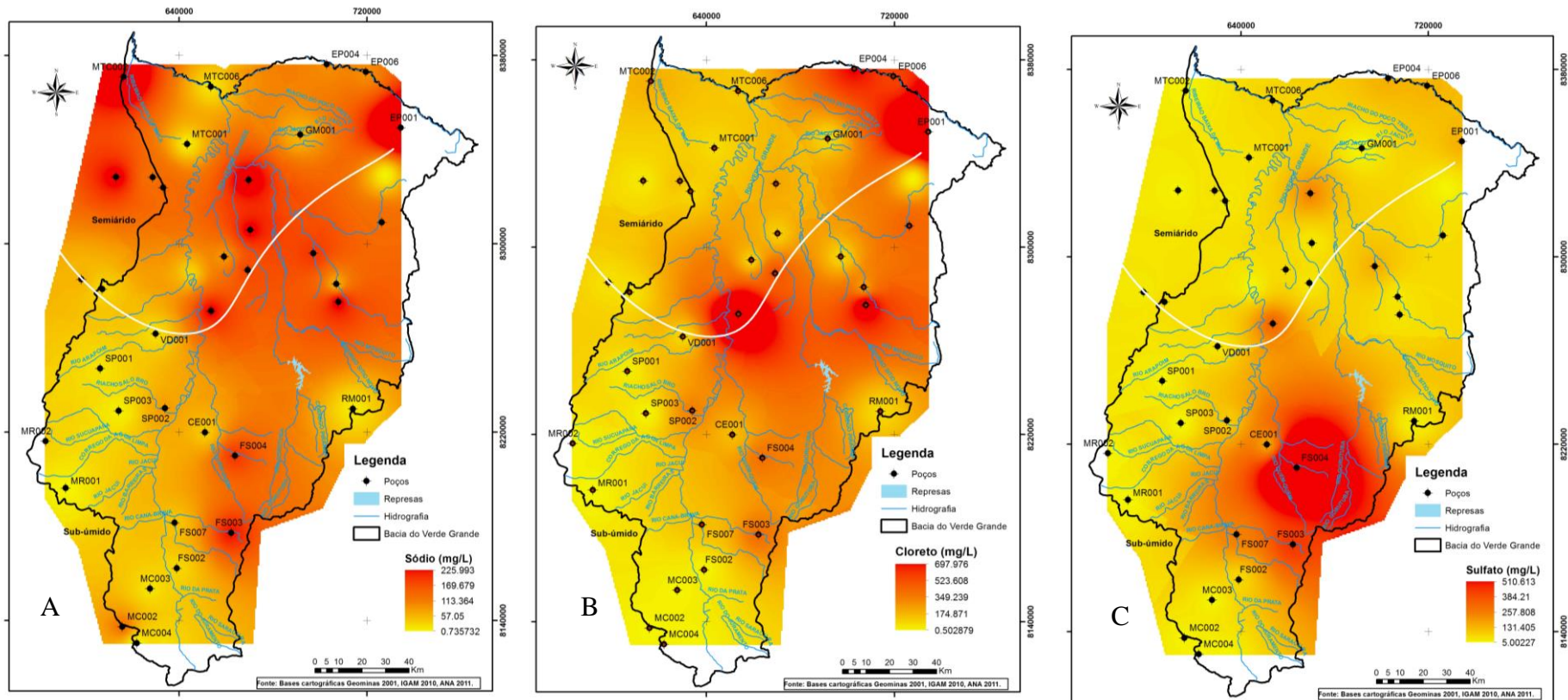


Figura 7.44: Distribuição espacial das concentrações dos íons maiores na bacia do rio Verde Grande.

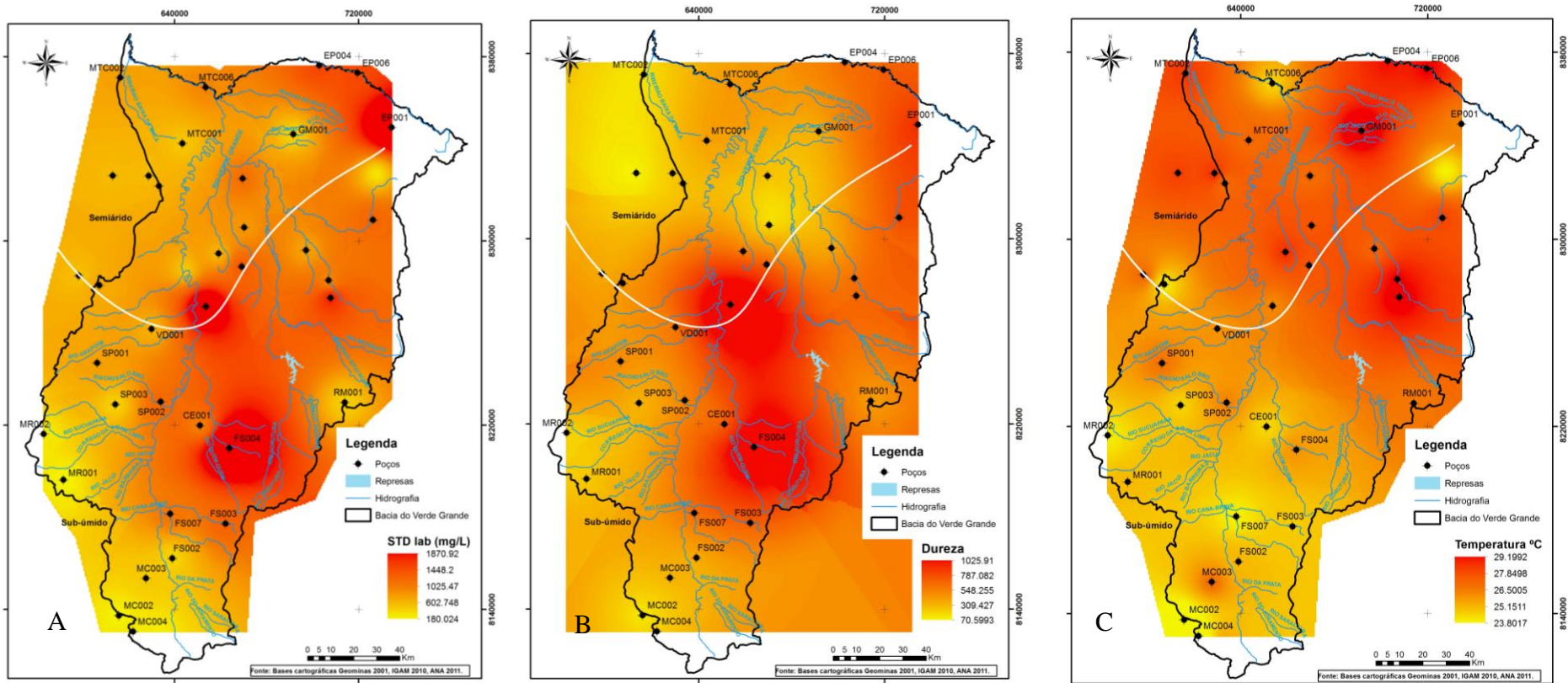


Figura 7.45: Distribuição espacial dos parâmetros físico-químicos na bacia do rio Verde Grande.

7.6.4.1. Comportamento espacial das relações iônicas

O mapa de distribuição espacial da relação iônica rMg^{2+}/rCa^{2+} mostra razão maior dentro da bacia para Pai Pedro, região centro- leste da bacia (Figura 7.46 A). De acordo com Custodio & Llamas (1983), os valores próximos a 1 indicam a possível influência de terrenos dolomíticos ou com serpentina. Nessa região a presença de rochas básicas e corpos ígneos podem estar favorecendo concentrações maiores de magnésio nas águas subterrâneas, e a ocorrência de rochas carbonáticas mais dolomíticas nessa área. Em águas continentais as relações ficam em torno de 0,3 a 1,5.

A relação rNa^+/rCa^{2+} para as águas da região (Figura 7.46 B) indicam razões menores que 1,0 em grande parte da bacia. Os valores maiores estão concentrados no domínio cárstico: JB003, JB021, JB007, JB008, MC002; no fissurado: MTC002; no fissurado: PP002; e no granular: EP001. A concentração de Na^+ cresce em direção às regiões mais áridas. E todos esses pontos com razões acima de 1 se encontram dentro do domínio semiárido da bacia.

Para a relação $rCl^-/rHCO_3^-$, os valores para as águas continentais ficam em torno de 0,1 e 5 (CUSTODIO & LLAMAS 1983), e é o intervalo médio observado para as águas subterrâneas na bacia (Figura 7.47 A), com exceção da região centro-norte e nordeste da bacia, cujas razões estão próximos de 6, indicando águas mais cloretadas para essas regiões. O ponto amostrado VD003 apresenta um valor anômalo alto para essa razão, e isso pode indicar que as águas tendem a serem estagnadas nesse local.

Na Figura 7.47 B, observa-se a distribuição espacial da relação de rSO_4^{2-}/rCl^- , variando até a razão de 11. Os maiores valores estão na cabeceira do rio Verde Grande, na porção sul da bacia, o que indica zona de recarga, visto que o cloreto encontra-se em baixa concentração resultando em uma razão alta, com grande contribuição de águas meteóricas, pouco saturadas nesse íon, e também a dissolução de Cl^- é maior que para SO_4^- . Próximo ao ponto FS004, na área centro-sul da bacia, as concentrações são justificadas pela presença de sulfatos provenientes dos metadiamicititos da Formação Nova Aurora, comentada anteriormente.

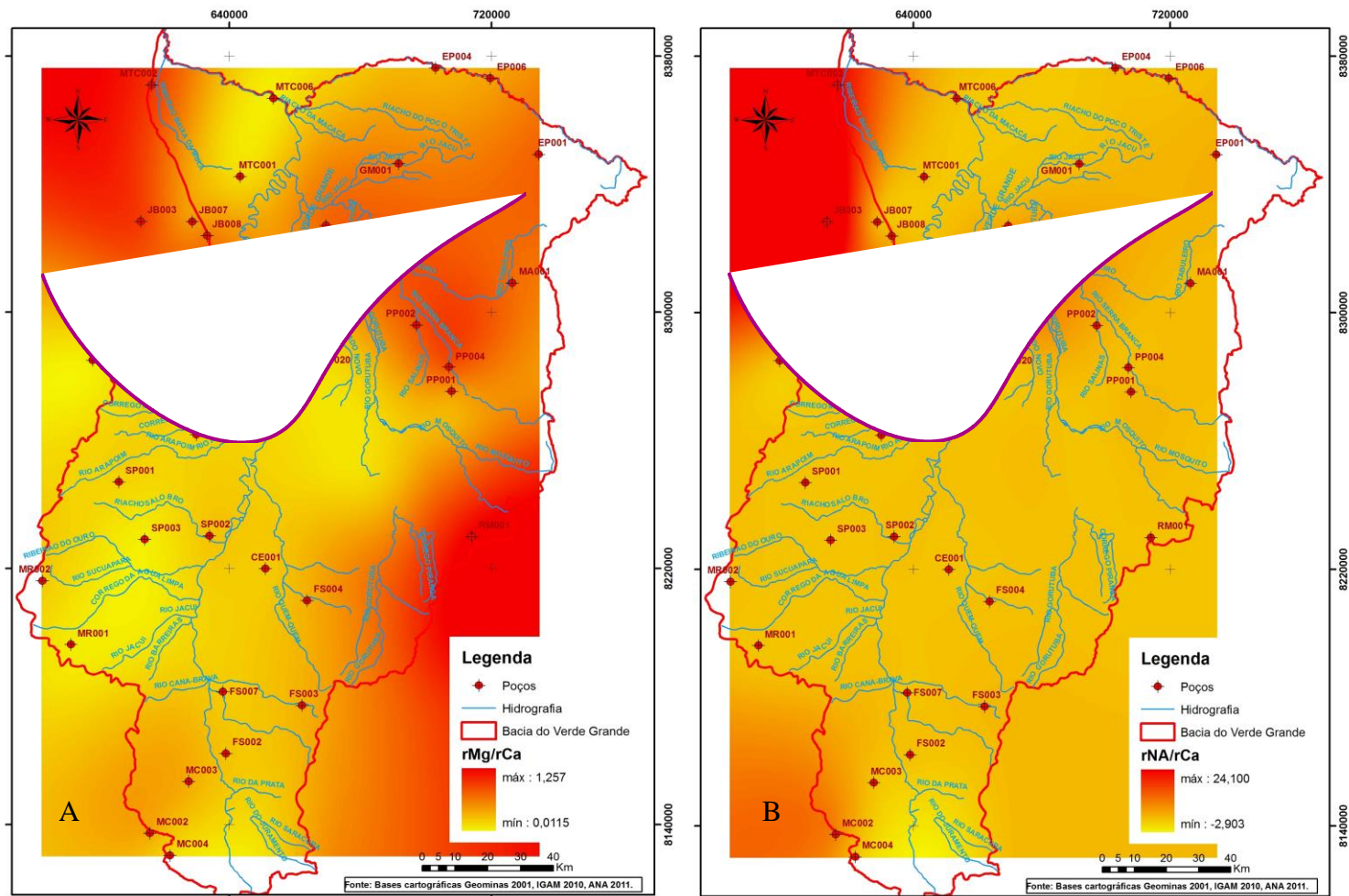


Figura 7.46: Distribuição espacial das relações iônicas rMg/rCa e rNa/rCa na bacia do rio Verde Grande.

Obs.: A linha roxa indica o limite dos Domínios Climáticos, Sub-úmido abaixo, e Semiárido acima.

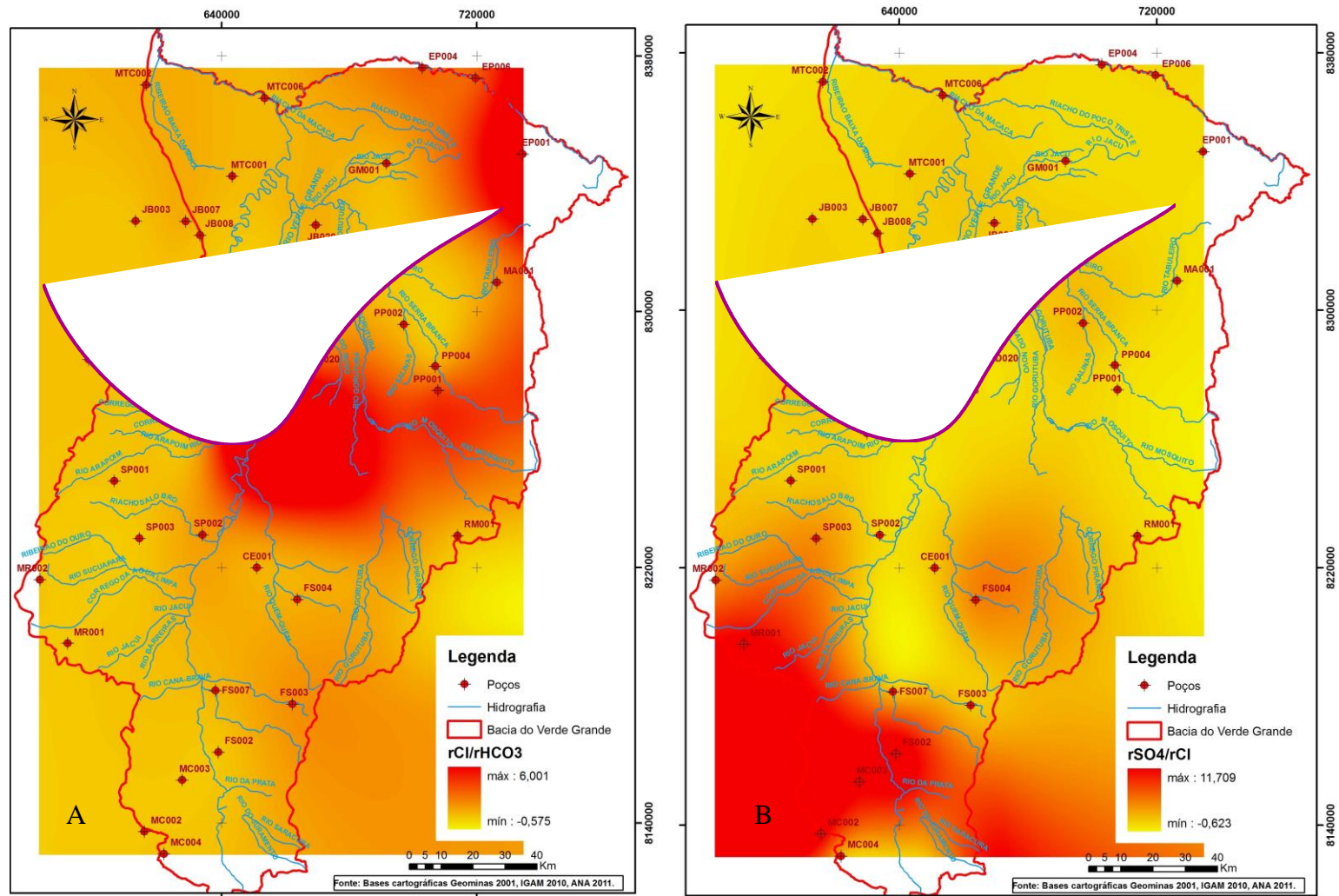


Figura 7.47: Distribuição espacial das relações iônicas $rCl/rHCO_3$ e rSO_4/rCl na bacia do rio Verde Grande.

Obs:A linha roxa indica o limite dos Domínios Climáticos, Sub-úmido abaixo, e Semiárido acima.

7.6.5. Classificação quanto à potabilidade

Discute-se neste capítulo a qualidade das águas subterrâneas no que tange a sua adequabilidade ao consumo humano, o mais restritivo dos usos. A análise se restringiu aos aspectos mais genéricos da qualidade das águas, apresentando as principais restrições ao uso com base nas características físicas e químicas conhecidas. Utilizou-se como referência o padrão de potabilidade do Ministério da Saúde (Portaria nº 2914 de 2011, BRASIL 2011).

Algumas indicações sobre a potabilidade das águas por domínios aquíferos são apresentadas na Tabela 7.41, que inclui os limites máximos permissíveis de alguns parâmetros, segundo o padrão da Portaria referida anteriormente. Grande número de parâmetros, tais como metais pesados, componentes orgânicos e agrotóxicos ficaram com valores abaixo dos limites de detecção dos aparelhos utilizados pelo laboratório do CETEC.

Verificaram-se, na Tabela 7.41 que os aquíferos do Domínio Fissurado-cárstico são os que apresentam águas mais restritivas ao consumo humano. As de melhor qualidade são as do Domínio Cárstico seguidas pelas do Domínio Granular e Domínio Fissurado. Todos os domínios apresentaram vulnerabilidade em relação à contaminação por orgânicos, devido a presença constante de Coliformes totais nas amostras, indicando contaminação por esgotos domésticos, fossas, ou até mesmo péssimas condições sanitárias dos poços.

As principais restrições referem-se aos teores excessivos de ferro total, manganês e cloretos e aos valores elevados de dureza. Secundariamente ocorrem como fatores restritivos, concentrações acima dos limites de sólidos totais dissolvidos, fluoretos, turbidez e cor aparente. Os nitratos foram identificados acima do permitido somente em uma análise. O bário aparece com valor de 1,11 mg/L, acima do limite legal para potabilidade em uma amostra do Domínio Fissurado. Os cloretos em concentrações excessivas não ocorrem nas águas do Domínio cárstico, apresentando maiores valores de concentração nas águas do aquífero granular.

Todas as restrições relacionadas a fluoretos são detectadas nas águas do Domínio Fissurado-cárstico. O Domínio Cárstico comprova sua vulnerabilidade aquífera devido à contaminação por coliformes fecais em todas as amostras coletadas.

Tabela 7.41: Potabilidade das águas subterrâneas por Domínio aquífero na Bacia do rio Verde Grande

| Parâmetros | Limite de Potabilidade MS nº2914/2011 | Domínios hidrogeológicos | | | |
|-----------------------------------|---------------------------------------|--|---|--|--|
| | | Domínio Cárstico (10 amostras) | Domínio Fissurado Cárstico (19 amostras) | Domínio Fissurado (4 amostras) | Domínio Granular (4 amostras) |
| Cor | 15 uH | 0 - sem restrições | 4 - apresentam alguma restrição | 0 - sem restrições | 1 - apresenta restrição local |
| Turbidez | 5 uT | 0 - sem restrições | 2 - apresentam alguma restrição | 0 - sem restrições | 0 - sem restrições |
| pH | 6,0 - 8,5 | 0 - sem restrições | 0 - sem restrições | 0 - sem restrições | 0 - sem restrições |
| Sólidos totais dissolvidos | 1000 mg/L | 0 - sem restrições | 2 - apresentam alguma restrição | 1 - apresenta restrição local | 1 - apresenta restrição local |
| Dureza total | 500 mg/L | 1 - apresenta restrição local | 3 - apresentam alguma restrição | 1 - apresenta restrição local | 2 - apresentam restrição |
| Cloretos | 250 mg/L | 0 - sem restrições | 1 - apresenta restrição local | 1 - apresenta restrição local | 2 - apresentam restrição |
| Sulfatos | 250 mg/L | 0 - sem restrições | 1 - apresenta restrição local | 0 - sem restrições | 0 - sem restrições |
| Nitratos | 10 mg/L | 0 - sem restrições | 1 - apresenta restrição local | 0 - sem restrições | 0 - sem restrições |
| Bário | 0,7 mg/L | 0 - sem restrições | 0 - sem restrições | 1 - apresenta restrição local | 0 - sem restrições |
| Fluoretos | 1,5 mg/L | 0 - sem restrições | 2 - apresenta alguma restrição | 0 - sem restrições | 0 - sem restrições |
| Ferro Total | 0,3 mg/L | 3 - apresentam alguma restrição | 1 - apresenta restrição local | 1 - apresenta restrição local | 2 - apresentam restrição |
| Manganês | 0,1 mg/L | 1 - apresenta restrição local | 0 - sem restrições | 1 - apresenta restrição local | 1 - apresenta restrição local |
| Coliformes Totais | ausência em 100ml | todas - apresenta grande vulnerabilidade à contaminação orgânica | somente 3 amostras não apresentaram CT - apresenta grande vulnerabilidade à contaminação orgânica | somente 1 amostra não apresentou CT - apresenta grande vulnerabilidade à contaminação orgânica | somente 1 amostra não apresentou CT - apresenta grande vulnerabilidade à contaminação orgânica |

7.6.6. Classificação quanto à irrigação

Considerando a classificação SAR, as águas podem ser divididas em classes considerando a salinidade e o conteúdo em sódio. As águas de salinidade média (C2) podem ser utilizadas na irrigação se houver uma lixiviação moderada do solo. As águas de alta salinidade (C3) só podem ser utilizadas em solos bem drenados, e apenas as plantas de boa tolerância salina devem ser cultivadas. As águas de salinidade muito forte (C4) geralmente não servem para irrigação, porém podem ser utilizadas em solos permeáveis, bem cuidados e muito irrigados. Somente as plantas de altíssima resistência salina podem ser cultivadas.

As águas fracamente sódicas (S1) podem ser utilizadas em quase todos os solos com fraco risco de teores nocivos de sódio susceptível de troca. Já as águas medianamente sódicas (S2) apresentam perigo de sódio para solos de textura fina, e forte capacidade de troca de cátions.

Observando o diagrama de risco de sódio e salinidade para as 37 amostras analisadas, todas as amostras apresentam algum grau de risco para o uso na agricultura. Os pontos plotados em azul no gráfico da Figura 7.48 se localizam sob Domínio sub-úmido, e os plotados em amarelo estão sob Domínio Semiárido.

De conformidade com os resultados das análises químicas e os correspondentes limites de classificação, as classes de águas para a irrigação ficaram assim definidas:

- Quase metade das amostras apresenta risco médio à salinidade C2-S1. Podem ser utilizadas se houver uma lixiviação moderada do solo e oferecem fraco risco de apresentarem teores nocivos de sódio trocável. As plantas de fraca tolerância salina podem ser cultivadas sem perigo, na maioria dos casos;
- Quase metade das amostras apresenta risco alto de salinidade C3-S1. Só podem ser utilizadas em solos bem drenados e para culturas de alta tolerância ao sal. Não apresentam, contudo, risco de existência de teores nocivos de sódio trocável;
- Os pontos mais críticos se concentram sob o clima semiárido, sendo os pontos EP001 e VD003 com risco muito alto de salinização (C4-S1), não servindo para irrigação; e os pontos, JB00, JB021 (C2-S2) com médio risco de sódio e de salinidade, e MTC002 de classe C3-S2, apresenta risco médio de sódio e risco alto de salinização. As das classes C2-S2 e C3-S3 são restritivas para irrigação, tanto pela salinidade quanto pelo risco de apresentarem teores nocivos de sódio.

As águas altamente sódicas apresentam teores nocivos de sódio para a maioria dos solos, exigindo manejo especial, como boa drenagem, lixiviação e presença de matéria orgânica.

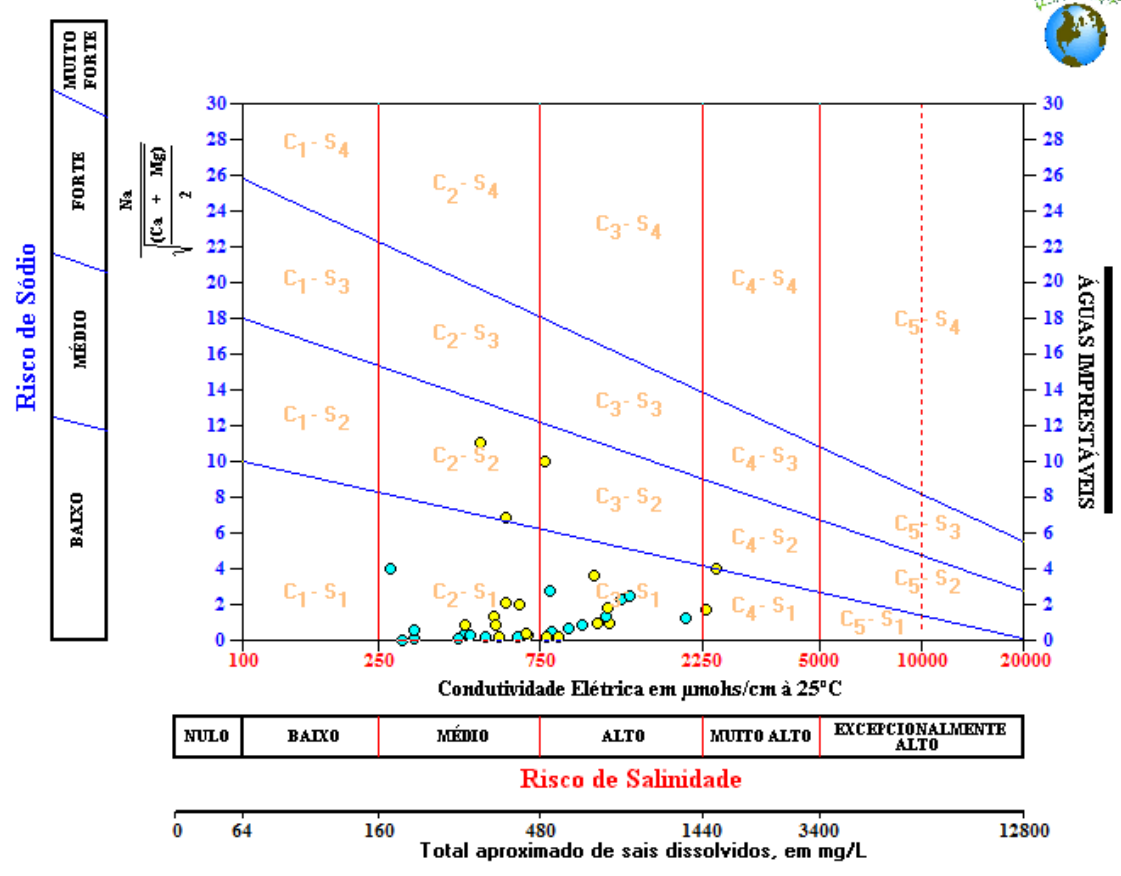


Figura 7.48: Gráfico de SAR para 37 amostras com diferenciação por domínio climático.

8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Pode-se definir 4 domínios hidrogeológicos com base na geologia regional da bacia do rio Verde Grande. Os estudos hidroclimatológicos definiram para a bacia dois domínios climáticos de influência sub-úmida e semiárida.

Os valores de recarga mostraram-se bem variados utilizando-se 3 tipos de metodologias, uma através do balanço hídrico, e as duas demais através de interpretações dos dados de escoamento subterrâneo em hidrogramas. Os valores obtidos para o Domínio semiárido foram bem pequenos se comparado a bacias vizinhas. Porém quando se correlaciona com o valor obtido para o Domínio sub-úmido, a variação entre os valores de recarga para cada domínio de cada método fazem sentido, indicando os locais de influência do clima sub-úmido e os de influência semiárida. Considera-se que essa infiltração decorre das precipitações a montante nas cabeceiras do rio Verde Grande, em terrenos cársticos e de maior permeabilidade. As áreas principais de recarga coincidem com os altos cursos dos rios, ao longo dos divisores de águas superficiais da bacia. Em mapa potenciométrico, puderam-se distinguir as principais direções de fluxo das águas subterrâneas, que convergem para as principais linhas de drenagem superficial - rios Verde Grande, Gortuba e Verde Pequeno-, evidenciando o caráter afluyente desses cursos de água. Para aferição mais precisa de recarga na bacia do rio Verde Grande, sugere-se a partir desse estudo uma análise de Balanço de Cloretos entre as águas subterrâneas e as chuvas, em pontos a serem amostrados bem distribuídos ao longo da bacia, de suas sub-bacias e de seus domínios aquíferos. Determinando-se com mais exatidão a recarga na bacia, a gestão dos recursos hídricos subterrâneos poderá ser mais bem embasada, garantindo assim melhor tempo de recuperação dos aquíferos já superexplotados.

Os valores de produção dos aquíferos, ao analisar os dados dos poços tubulares existentes na bacia, indicam que as capacidades específicas e transmissividades maiores pertencem ao Domínio aquífero cárstico sob a influência do clima sub-úmido, seguido do Domínio granular no semiárido. Isso indica que esses domínios são os que armazenam e transmitem melhor água subterrânea. O Domínio granular apresentou valor menor de transmissividade dentro do domínio sub-úmido, justificado pelo papel que esses aquíferos têm na recarga dos aquíferos cársticos subjacentes, permitindo a passagem das águas meteóricas para níveis mais profundos. Os menores valores de transmissividade encontram-se no Domínio fissurado, sendo que sua recarga se dá principalmente através dos cursos de água encaixados em sistemas

de faturamento e por drenança a partir do manto de cobertura colúvio-eluvionar. Os valores para o Domínio fissurado não variaram com o clima, indicando que esses aquíferos possuem baixa permeabilidade e capacidade de infiltração.

As características hidroquímicas analisadas por domínio hidrogeológico permitiram apresentar algumas considerações sobre os principais processos de mineralização e evolução química na bacia do rio Verde Grande.

Em princípio, deve-se destacar que a maioria das amostras analisadas disponíveis é representativa dos Domínios aquíferos cárstico e fissurado-cárstico, sendo 10 amostras proeminentes do aquífero cárstico e 19 do fissurado-cárstico.

O Domínio aquífero fissurado, composto por granito-gnaisses, xistos e quartzitos é representado por 4 amostras. Outras 4 análises restantes são atribuídas ao Domínio aquífero granular, de depósitos sedimentares recentes. A pouca quantidade de amostras de água subterrânea para esses dois Domínios aquíferos limita, em parte, um melhor conhecimento destes últimos. É aconselhável aumentar o número de poços amostrados nesses domínios, que permitiria uma maior análise integrada e estatística dos valores hidroquímicos e a correlação com os domínios climáticos e geológicos.

Grande parte do Domínio aquífero cárstico se localiza sob Domínio climático sub-úmido, e sua distribuição espacial abrange a região sul, central e oriental da bacia do rio Verde Grande. Com relação a hidroquímica e suas correlações geológicas e climáticas, pode-se observar nesse Domínio aquífero as são águas predominantemente bicarbonatadas cálcicas com pH ligeiramente alcalino. Subdividiu-se em dois grupos com características semelhantes, de acordo com o diagrama de Chadha (1999): as águas do Grupo 1 são águas bicarbonatadas cálcicas e com menor mineralização, já as águas do Grupo 2 apresentam concentrações de cálcio, bicarbonato, STD e condutividade elétrica duas vezes maiores que as do grupo 1, sendo consideradas águas com maior tempo de contato com as rochas e de maior profundidade.

Os processos de mineralização no Domínio aquífero cárstico são comandados pela dissolução das rochas carbonáticas (calcita e dolomita). A razão $rCl^-/rHCO_3^-$ que expressa o grau ou estágio de salinização, é baixa no domínio cárstico, com tendência a diminuição da razão nas águas próximas às zonas de recarga. Verificou-se que em na maioria das amostras analisadas ocorre troca entre os íons alcalinos da água por íons alcalino-terrosos das rochas. A relação rMg^{2+}/rCa^+ indica ampla predominância de Ca^+ sobre o Mg^{2+} . A distribuição desse

índice não mostra relações que permitam inferir a localização de áreas de recarga ou descarga subterrânea, conforme sugerido por Custodio & Llamas (1983). A distribuição de alcalinidade, ao contrário, indica que o progressivo aumento desse parâmetro está relacionado ao percurso subterrâneo, com conseqüente dissolução de carbonatos, e os valores mais altos corresponderiam às áreas de descarga. Os fluxos subterrâneos nesse domínio acompanham as áreas mais acidentadas em direção ao vale do rio Verde Grande, com zonas de recargas localizadas nas cabeceiras e nos altos cursos dos afluentes da margem esquerda, e suas descargas atingem o limite central da bacia demonstrando altos valores de transmissividades, onde se encontra o limite entre as duas zonas climáticas definidas.

No Domínio fissurado-cárstico, a associação de rochas pelíticas intercaladas com rochas calcárias mostram aspectos diferenciados com relação aos tipos químicos. As águas classificam-se como bicarbonatadas cálcicas com menor predomínio das fácies cloretada sódica e bicarbonatada sódica. As amostras do clima sub-úmido obtiveram uma classificação hidroquímica dominante na fácies bicarbonatada cálcica. Pelo diagrama de Chadha, mais da metade das águas amostradas nesse domínio aquífero puderam ser enquadradas no Grupo 1 classificado como águas bicarbonatadas cálcicas-magnesianas com dureza temporária. Suas águas apresentam turbidez elevada, e teores em cálcio elevado com sódio baixo.

O Grupo 2 é representado por 4 amostras com características de águas bicarbonatadas sódicas. Os maiores teores de fluoretos estão associados ao Grupo 2 de amostras desse Domínio, e há uma associação com a concentração de fluoreto, associadas ao alto teor de sódio e baixa concentração de cálcio nas águas desse grupo. Verifica-se que em quase totalidade das amostras analisadas, é observado troca entre os íons alcalinos da água pelos íons alcalino-terrosos das rochas hospedeiras. Pode-se dizer que as águas do Grupo 2 são águas com maiores concentrações de metais alcalinos e que podem indicar fluxo subterrâneo em direção aos pontos das amostras do Grupo 1, com a diminuição dos metais alcalinos e aumento de metais terrosos. Esse domínio apresenta um fluxo subterrâneo da vertente oriental para o vale do rio Verde Grande e em direção à foz com o rio São Francisco. Grande parte das amostras de águas analisadas está localizada no clima semiárido, o que influencia diretamente a dissolução dos íons, salinização, e trocas de bases no aquífero.

No Domínio fissurado, das rochas xistosas e granito-gnáissicas, faixa leste da bacia, as águas tendem a apresentar teores elevados em alguns parâmetros, com progressivo aumento das concentrações de nitratos, sulfatos, potássio e magnésio. Os valores excepcionalmente altos de cloretos parecem associados a zonas planas de depressão do relevo sujeitas aos

efeitos de concentração por evaporação, ao norte. As altas concentrações de sulfatos podem ser associadas a ocasionais concentrações de sulfetos (pirita) presentes na região de contato de falha do Grupo Macaúbas com rochas fissuradas na região sudeste da bacia aliadas às zonas de recargas próximas.

As águas classificadas pela hidroquímica no Grupo 1 são bicarbonatadas cálcica-magnesianas, indicando contribuição geoquímica das rochas básicas presentes nesse domínio. Verifica-se que todas as amostras analisadas apresentam índice de troca de bases acima de zero, o que corresponde a um processo de estabilização das águas subterrâneas. O fluxo subterrâneo é representado pela menor dureza das águas dos pontos amostrados que se localizam nas zonas de recargas das serras orientais da bacia, e indicam aumento de dureza e concentrações iônicas à medida que atingem as porções baixas do relevo, em direção ao rio Gorutuba.

As quatro amostras analisadas do Domínio aquífero granular são de águas procedentes das coberturas detrítica-lateríticas e sedimentos aluvionares, em vista dos valores de condutividade e dureza serem maiores que para as águas do domínio cárstico e fissurado-cárstico. É mais provável que representem níveis aquíferos rasos em contato com as águas dos rios, provocando um aumento no valor desses parâmetros devido à qualidade baixa dos cursos de água na região, evidenciado principalmente pelo valor médio de concentração em nitratos bem elevado nessas águas que nos demais aquíferos estudados. De acordo com o diagrama de Chadha (1999), as águas do Grupo 1 são águas cloretadas cálcica-magnesianas.

As áreas de recarga, quando caracterizadas por depósitos sedimentares recentes (depósitos aluvionares) presentes próximos a cursos de rios são caracterizadas por águas bem mineralizadas, com totais de sólidos dissolvidos em geral elevados, devido principalmente aos seguintes fatores: a presença de sedimentos altamente lixiviados; aos níveis de água em geral pouco profundos; e a influência do rio no escoamento subterrâneo. Aliada a influência do clima semiárido, os altos teores de cloretos indicam grande evaporação sofrida por essas águas nesse domínio aquífero. As águas desse aquífero recarregam trechos do aquífero fissurado e diretamente os cursos dos rios na área nordeste da bacia.

O uso das águas subterrâneas estudadas na bacia do rio Verde Grande para o consumo humano mostrou grande presença de coliformes totais (CT) nas águas, caracterizando grande vulnerabilidade à contaminação por orgânicos. O aquífero com maior vulnerabilidade a contaminação pro CT é o Cárstico. Os valores mais restritivos observados relacionam-se aos teores excessivos de ferro total, manganês e cloretos e aos valores elevados de dureza. As

águas do Domínio Cárstico mostraram melhor qualidade para potabilidade, observando a desinfecção primária necessária para os altos valores de CT. O Domínio Fissurado-cárstico foi o que apresentou maior restrição devido a presença de teores altos de fluoretos nas águas subterrâneas. As águas do Domínio granular são águas que apresentam valores altos de cloretos e dureza total, o que pode prejudicar o paladar. No Domínio fissurado, a preocupação se concentra nas concentrações altas de metais, como o ferro, o manganês e até o bário (esse último devido a má construção e limpeza do poço). Orienta-se a verificação contínua dos poços, como limpeza, manutenção e colocação de lajes sanitárias, a fim de evitar contaminações. O órgão gestor das águas subterrâneas deve se encarregar do monitoramento contínuo dos teores acima dos padrões para consumo humana, selando poços muito contaminados, e direcionando novos locais para perfurações futuras.

As águas possuem restrições quanto ao uso na agricultura na bacia. Para a maioria das águas, há restrição média a alta quanto ao risco de salinidade e algumas poucas amostras foram caracterizadas com médio risco de adsorção de sódio e muito alto para salinidade. Ao utilizar as águas subterrâneas da bacia para irrigação, deve-se atentar para o tipo de cultivo, que seja tolerante a grandes concentrações de sal e manter os solos bem drenados a fim de evitar a adsorção do sódio pelas plantas.

Recomenda-se, para obter respostas que ficaram inconclusivas ou não puderam ser determinadas com exatidão, a execução de medidas de monitoramento e gestão de recursos hídricos subterrâneos que auxiliem na obtenção dados mais precisos e representem com atualidade a condição da bacia do rio Verde Grande, em Minas Gerais.

Propõe-se:

- Aumento dos pontos de qualidade das águas subterrâneas na bacia e realização de uma estatística avançada dos parâmetros;
- Definição dos parâmetros a serem analisados, excluindo os parâmetros que não apresentaram variações detectáveis;
- Coleta de águas de chuva para realização do método de balanço de cloretos para determinar com maior precisão os valores e as principais regiões da recarga;
- Mapeamento geológico dos domínios cársticos e fissurado-cársticos para determinação da profundidade dos litotipos, pacotes litológicos e estruturação, que podem influenciar os grupos dominantes das águas subterrâneas;

- Aumento do monitoramento fluviométrico na bacia (aumento de estações permanentes), e nos principais afluentes do rio Verde Grande para determinação exata da reserva subterrânea no âmbito da gestão de recursos hídricos.
- Realização de testes de aquíferos em poços pioneiros ou em existentes com perfil geológico conhecido.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco, Subprojeto 4.2A – Avaliação de mecanismos financeiros para o gerenciamento sustentável dos recursos hídricos da sub-bacia do rio Verde Grande. Brasília: ANA/GEF/PNUMA/ OEA. 2002. 81p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. Relatório do Diagnóstico da Bacia Hidrográfica do Rio Verde Grande. ECOPLAN Engenharia. Brasília: Ed. Revisada, Outubro, 2009. 530 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Verde Grande - Relatório Síntese. Brasília: 24 de fevereiro de 2011. 180 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. Séries Históricas – estações pluviométricas e fluviométricas, 2011. Disponível em: <www.hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb>. Acesso em: maio de 2011.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. Mapas, 2011. Disponível em: <www.hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb>. Acesso em: maio de 2011.
- ALKMIM, F. F.; MARTINS-NETO. A bacia intracratônica do São Francisco: Arcabouço estrutural e cenários evolutivos. *In*: Pinto, C.P. & Martins-Neto, M.A. Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais – SBG/MG. Belo Horizonte: 2001. p. 9-30.
- ALKMIM, F. F. O que faz de um cráton um cráton? O Cráton do São Francisco e as revelações Almeidianas ao delimitá-lo. 2004. *In*: Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C. D. R.; Brito-Neves, B. B. (eds.). Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra. 2004.
- ALKMIM F.F., CHEMALE JR. F., ENDO I. A deformação das coberturas proterozóicas do Cráton do São Francisco e o seu significado tectônico. *Rev. Escola de Minas*, v.49, n.1, p.22-38. 1996.
- ALMEIDA, F.F.M. O Cráton do São Francisco. *Rev. Bras. Geociências*, v.7, n.4, p. 349-363. 1977.
- APELLO, C. A. J.; POSTMA, D. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. 2º ed. Rotterdam: A.A. Balkema Publishers, 2005. 230 pg.
- ARNOLD, J.G.; P.M. ALLEN, R. MUTTIAH; G. BERNHARDT. Automated base flow separation and recession analysis techniques. *Groundwater* v. 33, n.6, p. 1010-1018. 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT/NBR 9896/1993.
- BABINSKI, M., KAUFMAN, J. First Direct Dating of a Neoproterozoic Post-Glacial Cap Carbonate. Short Papers. IV South American Symposium on Isotope Geology. 2005. p 321-323.
- BASTOS, C.; FERREIRA, N. Análise Climatológica da Alta Subtropical do Atlântico Sul. *In*: XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Rio de Janeiro, 2000, *Anais...* Rio de Janeiro, 2000. p. 612-619.
- BRANCO, J. J. R.; COSTA, M. T. 1961. Roteiro para a excursão Belo Horizonte- Brasília. *In*: Instituto de Pesquisas Radioativas da Universidade Federal de Minas Gerais, XIV Congresso Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte: 1961. v. 15, p. 1- 19.
- BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução Conama nº 238, de 22 de dezembro de 1997. Dispõe sobre a aprovação da Política Nacional de Controle da Desertificação. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 22 dez 1997 p. 30930.
- BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. Portaria Nº 2.914, de 12 de Dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 14 dez. 2011, Seção 1, p. 39-46.
- BRAUN O.P.G. Contribuição à estratigrafia do Grupo Bambuí. *In*: SBG, Congr. Bras. Geol., 22, 1968. Anais.... Belo Horizonte: 1968. p.155-166.
- BRITO-NEVES, B. B.; CORDANI, U. G.; TORQUATO, J. R. F. Evolução geocronológica do precambriano do Estado da Bahia. *In*: H.A.V. Inda & F.B. Duarte (eds.), Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia, Salvador: CPM-SME BA, 1980. v.3, p. 1 -101.
- CAMARGO, A.P. Balanço hídrico no Estado de São Paulo. Boletim Técnico, 116. Campinas: IAC, 1971. 28p.
- CASTANY, G. *Traité pratique des eaux souterraines*. Paris: Ed. Dunod, 1963. 657p.

- CETEC. FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. 2º Plano de Desenvolvimento Integrado do Noroeste Mineiro, Recursos Naturais. Belo Horizonte: Série de Publicações Técnicas, 1981, v. 2.
- CETEC. FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. Estudos Integrados de Recursos Naturais: Bacia do Alto São Francisco e parte Central da Área Mineira da Sudene. Hidrologia Subterrânea. Belo Horizonte: Relatório Final. 1984.
- CETEC. FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. Desenvolvimento metodológico para modelo de gerenciamento ambiental de bacias hidrográficas. Estudo de caso: Bacia do rio Verde Grande. Belo Horizonte: Relatório Final, Setembro, 1995. v.3.
- CHADHA, D. K. A. proposed new diagram for geochemical classification of natural waters and interpretation of chemical data. *Hydrogeology Journal*, v.7, p.431-439, 1999.
- CLESCERI, L. S. ; GREENBERG, A. E. ; EATON, A. D. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21ed. Washington. 2005. 561p.
- CONKLING, H. Utilization of groundwater storage in stream system development. *Transaction of the American Society of Civil Engineers*, [S.I.], v.111, p. 275-305, 1946.
- COSTA W.D. Uso e Gestão de Água Subterrânea. 2000. *In: Feitosa F.A.C. & Manuel Filho J. (eds.) Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. CPRM/REFO, Fortaleza: LABHID-UFPE, 2000. pp.: 341-367.*
- COSTA, D. A. Controle Lito-Estrutural e Estratigráfico na Hidrogeoquímica e nas Concentrações de Fluoreto no Sistema Aquífero Cárstico fissural do Grupo Bambuí, Norte de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. 131p. Dissertação (Mestrado em Geologia). Universidade Federal de Minas Gerais.
- CPRM. SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Mapa Geológico do Brasil. Escala 1:2.500.000. 2003. CD-ROM.
- CPRM. SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo: sistema de informações geográficas - SIG. = Geological Map of Brazil 1:1.000.000 scale: geographic information system GIS. SIG das 46 Folhas do Brasil ao milionésimo. Programa Geologia do Brasil. Brasília: CPRM, 2004. 41 CD-ROMs.
- CPRM. SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Mapa de Domínios/Subdomínios Hidrogeológicos do Brasil em Ambiente SIG em escala 1:1.000.000. Brasília: CPRM, 2007. DVD.
- CPRM. SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. SIAGAS - Banco de Dados do Sistema de informações das Águas Subterrâneas/ Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais. Brasília: CPRM, 2010. Disponível em <<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>>. Acesso em Abril, 2011.
- CUPOLILLO, F. *Diagnóstico hidroclimatológico da Bacia do Rio Doce*. 2008. 153 p. Tese (Doutorado em Geografia). Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais.
- CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R.. Hidrologia Subterrânea. Barcelona: Omega. 2ed. v.1, 2. 2350 p. 1983.
- DARDENNE, M. A. (a) Zonação tectônica na borda ocidental do Cráton São Francisco. 1978. *In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, XXX, Recife: 1978. Anais... v.1, p. 299-308.*
- DARDENNE, M. A. (b) Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. 1978. *In: SBG, Congr. Bras. Geol., 30, Recife: 1978. Anais... v. 2, p. 507-610.*
- D'ARRIGO H.B.P. O Descolamento Basal do Grupo Bambuí e o Alto de Sete Lagoas. Ouro Preto, DEGEO-EM-UFOP, 1995, 89 p. Dissertação (Mestrado em Geologia), Universidade Federal de Ouro Preto.
- DE VRIES, J.J. & SIMMERS, I. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal*. v.10, p. 5-17. 2002.
- DINIZ L.G. O Flúor nas águas subterrâneas do estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006. 178p. Dissertação (Mestrado em Geologia) Universidade Federal de Minas Gerais.
- DREVER, J.I. The geochemistry of natural waters. Prentice-Hall, Ed. Science. 1988. 437 pg.
- DUSSIN, I. A.; UHLEIN, A.; DOSSIN, T. M. Geologia da Faixa Móvel Espinhaço em Sua Porção Meridional - MG. *Anais do XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia*. Rio de Janeiro: 1984. v. 7. p. 3118-3132.
- ESRI SOFTWARE. ArcGis 9.3, Geographic Information System, Software. Ontario-CA.: 2006.

- FEITOSA, F.A.C.; FILHO, J.M. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. 2ª Ed. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 2000. 391p.
- FEITOSA, F.A.C.; FILHO, J.M.; FEITOSA, E.C.; DEMETRIO, J.G.A. 2008. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. 3ª Edição Revisada e Ampliada. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID. 812p.
- FETTER, C. W. Applied Hydrogeology, 3º ed. New York: Prentice-Hall Publishing Co, 1994. 691 p.
- FONSECA, M. A.; DARDENNE, M. A. Sistemas de falhamentos transcorrentes na porção norte da Faixa de Dobramentos Brasília. *In*: SBG/BA-SE, SGM/BA, Simpósio do Cráton do São Francisco, II, Anais...Salvador: 1993. p.280-282.
- FONSECA, E.; LOBATO, L. M. Metamorfismo e Alteração Hidrotermal da Sequência de Ouro Fino, Riacho dos Machados, MG. Simp. Geol. Minas Gerais, 6, 1991. *In*: Anais Rev. Esc. Minas, Ano 56, v. 45, 1992, p. 176-178.
- FREITAS A.M., PEREIRA C., COSTA, D.A. Geologia e Hidrogeologia de Jaíba, Verdelândia e Varzelândia, Norte de Minas Gerais. Belo Horizonte: 2008, 140p. Trabalho de conclusão de curso em geologia. Instituto de geociências, Universidade Federal de Minas Gerais.
- FUGITA A.M., CLARK Fo J.G. 2001. Recursos energéticos da Bacia do São Francisco: Hidrocarbonetos líquidos e gasosos. *In*: C.P. Pinto, M.A. Martins-Neto (eds). Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais. SBG MG, Belo Horizonte, p. 265-284.
- HEM, J.D. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. 3º ed. US Geological Survey Water-Supply Paper n. 2254, 1985. 272 p.
- IGAM. INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. Base georreferenciada das UPRH's em Minas Gerais. 2002. Disponível no site <www.igam.mg.gov.br>. Acesso em julho 2011.
- IGAM. INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. Banco de Dados Hidrogeológicos. Consulta ao Banco de Dados de Outorgas de Direito do Uso de Águas Subterrâneas. 2011. Disponível no site <www.igam.mg.gov.br>. Acesso em outubro de 2010.
- LERNER DN, ISSAR AS, SIMMERS I. Groundwater recharge: A guide to understanding and estimating natural recharge. IAH Int Contrib Hydrogeol 8. Hannover: Heinz Heise, 1990. 345 p.
- LIMA O.N.B. Grupo Bambuí: Estratigrafia regional no Alto Rio São Francisco e geologia dos depósitos fosfáticos da Serra da Saudade - MG. Dissertação (Mestrado em Geologia) Instituto de Geociências. 142 p. 2005. Universidade Federal de Minas Gerais.
- LOBATO, L. M.; PEDROSA-SOARES, A. C. Síntese dos Recursos Minerais do Cráton do São Francisco e Faixas Marginais em Minas Gerais. Geonomos, Belo Horizonte, v. 1, n. 1, p. 51-64. 1993.
- LOGAN, J. Interpretações de análises químicas da água. U.S. Agency for International Development. Recife: 1965. 67p.
- MACHADO, N.; SCHRANK, A.; ABREU, F.R.; KNAUER, L. G.; ALMEIDA-ABREU, P.A. Resultados preliminares da geocronologia U/Pb na Serra do Espinhaço Meridional. 1989. *In*: Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 5º Simpósio de Geologia de Brasília, 1, Belo Horizonte: SBG, 1989, v. 10, p. 171-174.
- MAGALHÃES L. Análise estrutural qualitativa dos sedimentos do Grupo Bambuí, região sudeste da Bacia do São Francisco (Faixa Sete Lagoas-Serra do Cipó). Ouro Preto, 1988, 109 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) Universidade Federal de Ouro Preto.
- MAIA, L.F.P.G. Alguns aspectos dinâmicos – climatológicos em Minas Gerais. Curso de Engenharia Agrícola, Viçosa, 1986, 164 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade Federal de Viçosa.
- MARTINS-NETO, M. A.; PINTO, C. P. A Bacia do São Francisco – Geologia e Recursos Naturais. Belo Horizonte, MG: SBG , 2001. 238p.
- MATALLO JR., H. A desertificação no mundo e no Brasil 2003. p. 9-26. *In*: SCHENKEL, C. S. & MATALLO JR., H. Desertificação. Brasília: UNESCO, 2003. 82p.
- MESTRINHO, S. S. P. A qualidade da Água Subterrânea e sua proteção - Módulo I. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas – ABAS, 2005.
- MEYBOOM P. Estimating groundwater recharge from stream hydrographs. Journal of Geophysical Research, v. 66, n.4, p. 1203–1214. 1961.

- MOURÃO M.A.A., CRUZ W.B., GONÇALVES R.L.F. Caracterização hidrogeológica da porção mineira da Bacia Hidrográfica do São Francisco. 2001. *In*: Pinto C.P. e Martins-Neto M.A. (eds.) Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais. Belo Horizonte: SBG-MG, 2001. p.327-350.
- MOURÃO, M. A. A. Caracterização Hidrogeológica do Aquífero Cauê, Quadrilátero ferrífero, MG. Belo Horizonte, 2007. 321p. Tese (Doutorado em Meio Ambiente) Departamento de Engenharia Sanitária, Universidade Federal de Minas Gerais.
- NOCE C. M.; PEDROSA-SOARES A. C.; GROSSI-SAD J. H.; BAARS F. J. GUIMARÃES M.L.V.; MOURÃO M.A.A.; OLIVEIRA M.J.R.; ROQUE N.C. Nova divisão estratigráfica regional do Grupo Macaúbas na Faixa Araçuaí: O registro de uma bacia neoproterozóica. 1993. *In*: Simp. Geol. Minas Gerais, 9. Ouro Preto, 1997. Anais... Ouro Preto: SBG/MG, 1997. v. 14, p. 29-30.
- NOCE, C.M., PEDROSA-SOARES, A.C., GROSSI-SAD, J.H., BAARS, F.J., GUIMARÃES, M.V., MOURÃO, M.A.A., OLIVEIRA, M.J.R. & ROQUE, N.C. Nova Subdivisão Estratigráfica Regional do Grupo Macaúbas na Faixa Araçuaí: O Registro de uma Bacia Neoproterozóica. Boletim do Núcleo Minas Gerais-Sociedade Brasileira de Geologia, v.14, p. 29-31, 1997.
- NOCE; C. M., PEDROSA-SOARES A. C.; SILVA, L. C. DA; ALKMIM F. F. O Embasamento Arqueano e Paleoproterozóico do Orógeno Araçuaí. Geonomos v.15, n.1, p. 17 - 23, 2007.
- PEEL, M. C. AND FINLAYSON, B. L. AND MCMAHON, T. A Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. Hydrol. Earth Syst. Sci. v.11, p. 1633–1644. 2007.
- PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. Evapo(transpi)ração. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.
- PEREIRA, S.B.; PRUSKI, F. F.; NOVAES, L. F.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M. Análise do comportamento hidrológico no rio Verde Grande. Rev. Engenharia na Agricultura, Viçosa, MG: 2005. v.13, n.1, p. 55-60.
- PFLUG, R; Observações sobre a estratigrafia da Série Minas na Região de Diamantina, Minas Gerais. DNPM, DGM, Notas prel. e estudos 142, 20 p. 1968.
- PFLUG, R.; RENGER, F. E. Estratigrafia e evolução geológica da margem SE do Cráton Sanfranciscano. 1973. *In*: 27º Congresso Brasileiro de Geologia, Aracajú. Anais do 27º Congresso de Geologia. Aracajú, SE: Sociedade Brasileira de Geologia - Núcleo do Nordeste, 1973. v. 2. p. 5-19.
- PIPER, A. M. A Graphic Procedure in Geochemical Interpretation of Water Analyses. Transactions American Geophysical Union. v. 25, p. 914-923. 1944.
- RADAMBRASIL. Folha SD.23. Brasília. Rio de Janeiro, DNPM, 1982. 660p.
- RAMOS, M. L. S.& PAIXÃO, M. M. O. M. Disponibilidade hídrica de águas subterrâneas – Produtividade de poços e reservas explotáveis dos principais sistemas aquíferos - Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio São Francisco. IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2009. 41p.
- REBOITA, M. S.; MANOEL ALONSO GAN, ROSMERI PORFÍRIO DA ROCHA E TÉRCIO AMBRIZZI. Regimes de Precipitação na América do Sul: Uma Revisão Bibliográfica. Revista Brasileira de Meteorologia, v.25, n.2, p. 185 - 204, 2010.
- REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. Águas doces no Brasil. Capital Ecológico, Uso e Conservação. 2º edição. São Paulo, Editora Escrituras. 2002.
- ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.6, p.133-137, 1998.
- RURALMINAS. Fundação Rural Mineira, Colonização e Desenvolvimento Agrário. Hidrogeologia. *In*: Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia de Afluentes do rio São Francisco, em Minas Gerais. Belo Horizonte, MMA/SRH/SEAPA/RURALMINAS/SEMAD/IGAM/ - Consórcio Ecoplan/Magna/Cab, Tomo 8, v.1, 120 p. 1999.
- SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D. A.; DERZE, G. R.; ASMUS, H. E. Geologia do Brasil; Texto explicativo do mapa geológico do Brasil e da área oceânica adjacente incluindo depósitos minerais, escala 1:2.500.000. Brasília: Departamento Nacional da Produção Mineral, 1984.
- SCHOBENHAUS, C. As tafrogêneses superpostas Espinhaço e Santo Onofre, Estado da Bahia: Revisão e novas propostas. Revista Brasileira de Geociências, v. 26, p.265-276. 1996.

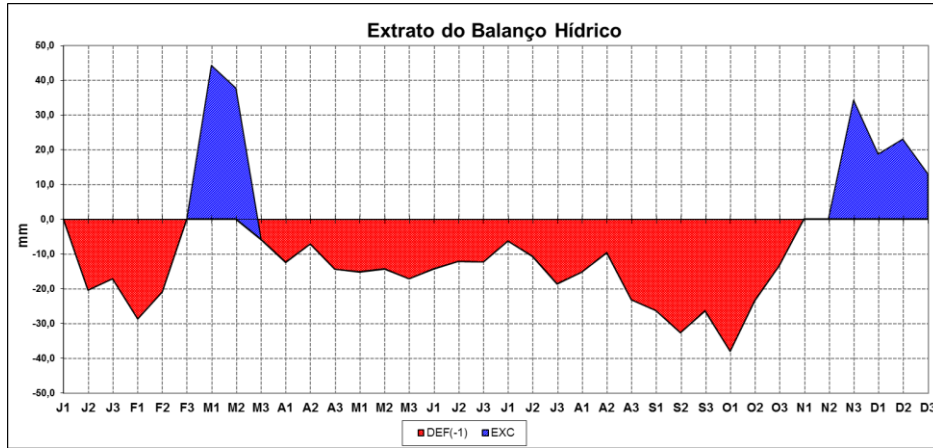
- SCHOELLER, H. L'influence du climat sur la composition chimique des eaux souterraines vadoses. Bulletin Societe Geologique de France, v. 5, n. 11, p. 267-298. 1941.
- SCHOELLER, H. Le Eaux Souterraines. Maison et Cie, Paris. Editeurs. 1962. 642p.
- SCHÖLL, W. U.; FOGAÇA, A. C. C. Estratigrafia da Serra do Espinhaço na região de Diamantina (MG). 1979. *In: Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 1, Diamantina, Atas. Belo Horizonte: SBG, 1979. v. 1, p. 55-73.*
- SGARBI, G. N. The Cretaceous Sanfranciscan Basin, Eastern Plateau of Brazil, Revista Brasileira de Geociências, n.3, p. 450-452, 2000.
- SILVA, A. B. Água Subterrânea do Carste da Bacia do Rio Verde Grande, Norte de Minas Gerais. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 1995. 97 p.
- SILVA, S.M.; *et al.* Hidroquímica das Águas Subterrâneas e Anomalias de Fluoreto em Região do Semi-Árido Mineiro. XV Cong. Brasileiro de Águas Subterrâneas. 2010. 20p.
- SOUZA, SERGIO MENIN TEIXEIRA DE. Disponibilidades Hídricas Subterrâneas no Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: Hidrossistemas. 1995. 525 p.
- STIFF, H.A. Jr. The interpretation of chemical water analysis by means of patterns: Journal of Petroleum Technology, v. 3. n. 10, p. 15-17, 1951.
- TEIXEIRA, W.; CARNEIRO, M. A.; NOCE, C. M.; MACHADO, N.; SATO, K.; TAYLOR, P. N. Pb, Sr, and Nd isotope constraints on the Archean evolution of gneissic-granitoid complexes in the southern São Francisco Craton, Brazil. Precambrian Research, n. 78, p.151-164, 1996.
- THORNTON, C.W. An approach toward a rational classification of climate. Geogr.Rev, v.38, p.55-94, 1948.
- THORNTON, C.W. & MATHER, J.R. The water balance. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104p.
- VILELA, F. T. Caracterização de Metadiamicritos Ferruginosos da Formação Nova Aurora (Grupo Macaúbas, Orógeno Araçuai) a oeste de Salinas, MG. Belo Horizonte, 2010. 135 p. Dissertação (Mestrado em Geologia). Universidade Federal de Minas Gerais.
- VIVEIROS, J.F.M., SÁ, E.L., VILELA, O.V., SANTOS, O.M. & MOREIRA, J.M.P. Geologia dos vales dos Rios Peixe Bravo e Alto Vacaria, Norte de Minas Gerais. Atas 1o. Simp. Geologia de Minas Gerais, Diamantina MG: SBG – Núcleo MG, 1979. Bol. n. 1, p. 75-88,
- VELÁSQUEZ L.N.M., Uhlein A., Fantinel L.M., Vargas A.M.D., Ferreira E.F., Castilho L.S. de, Aranha P.R.A. Investigação hidrogeológica do flúor em aquíferos carbonáticos do Médio São Francisco, MG, e epidemiologia da fluorose dentária associada. Belo Horizonte: Relatório CNPq. 2007. 130 p.
- 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 Verdelandia, Varzelândia e Jaíba, Minas Gerais. Belo Horizonte: Fapemig (EDT 83032/06) 2009. 236p.
- WATERLOO HYDROGEOLOGIC'S. Aquachem 3.7, Water Quality Data Analysis, Plotting & Modeling, Ontario-CA, Software. 2003.

10. ANEXOS

ANEXO I – RESULTADOS DO BALANÇO HÍDRICO

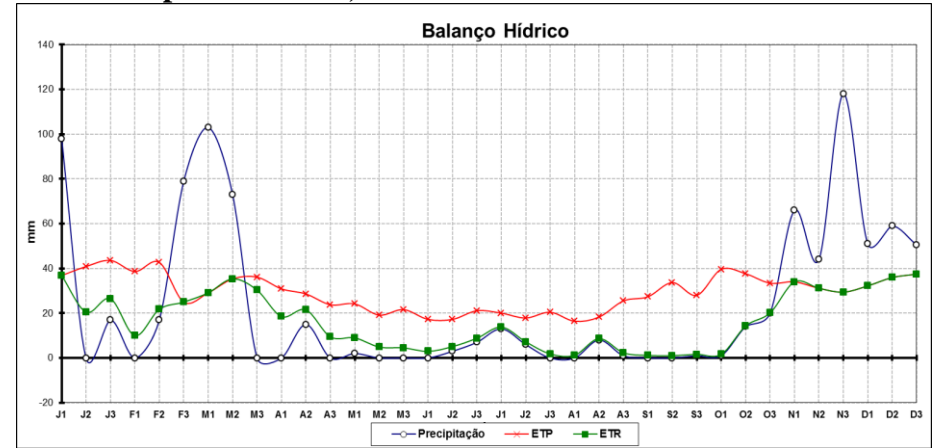
Estação Montes Claros

Representação gráfica do extrato do balanço hídrico, plotando-se DEF e EXC.

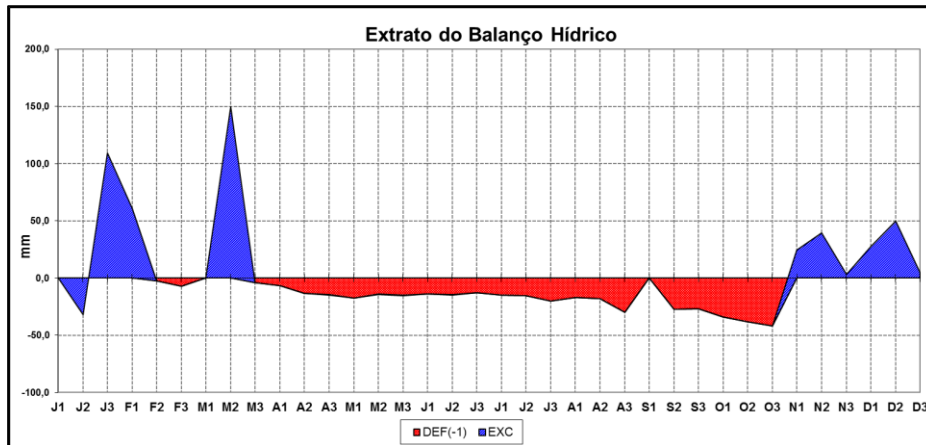


1999

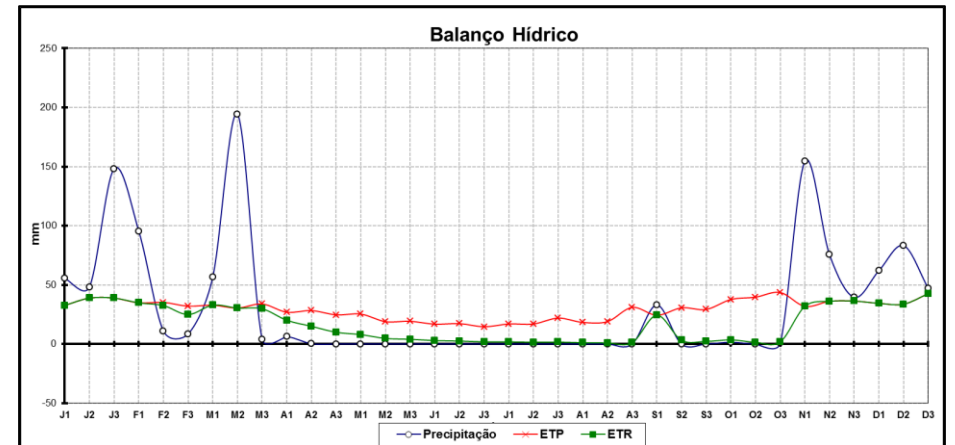
Representação gráfica completa do balanço hídrico climatológico, plotando-se P, ETP e ETR na forma de linhas.



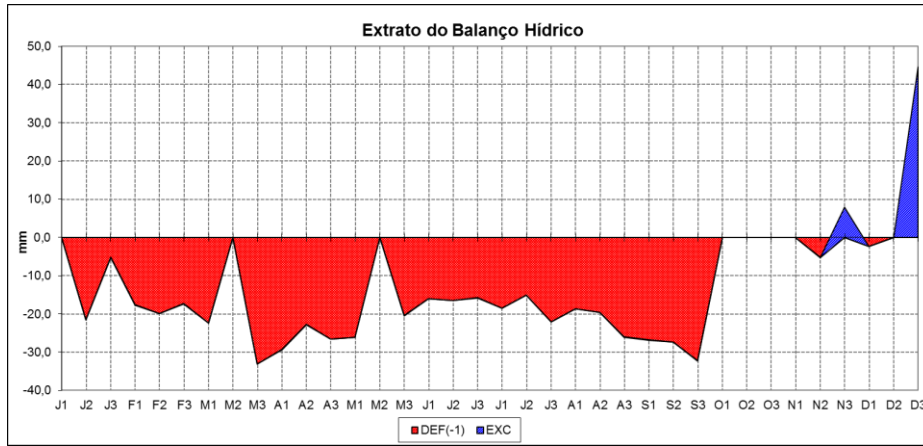
1999



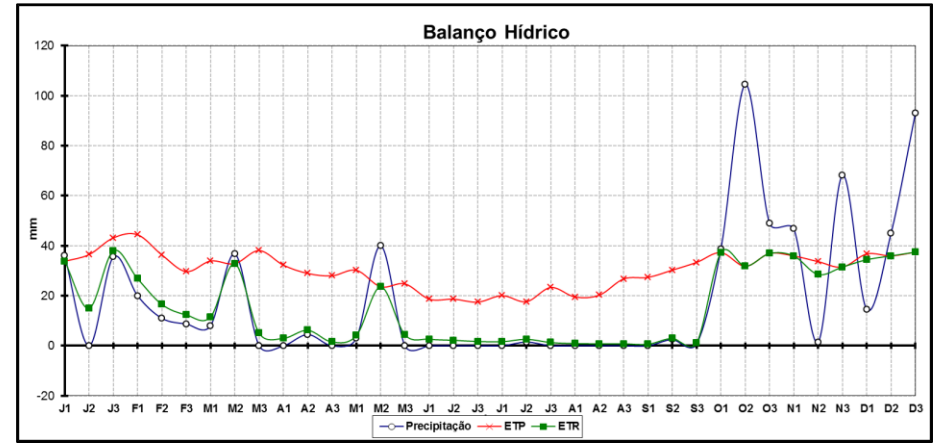
2000



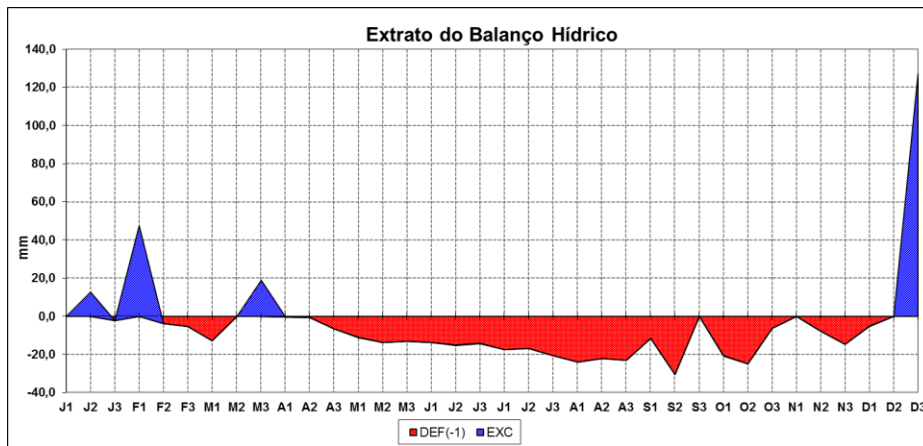
2000



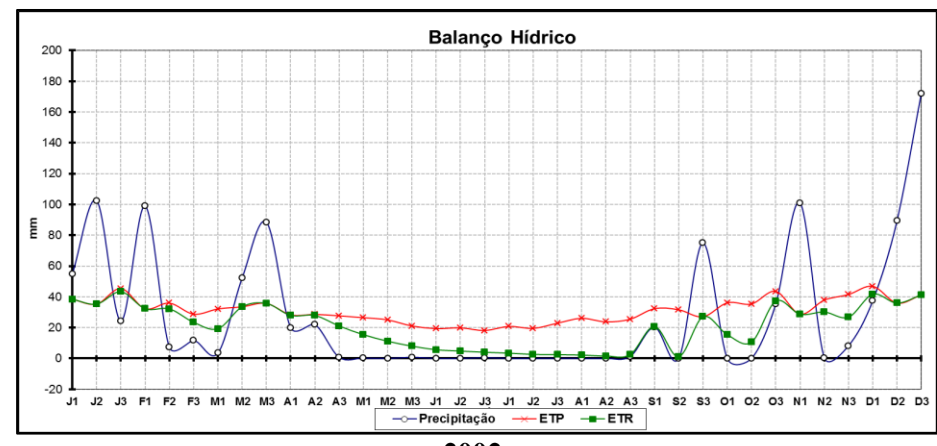
2001



2001



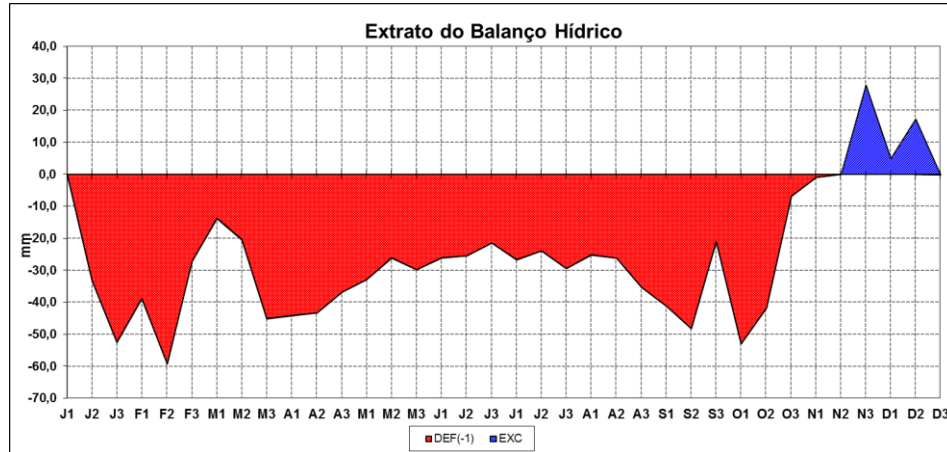
2002



2002

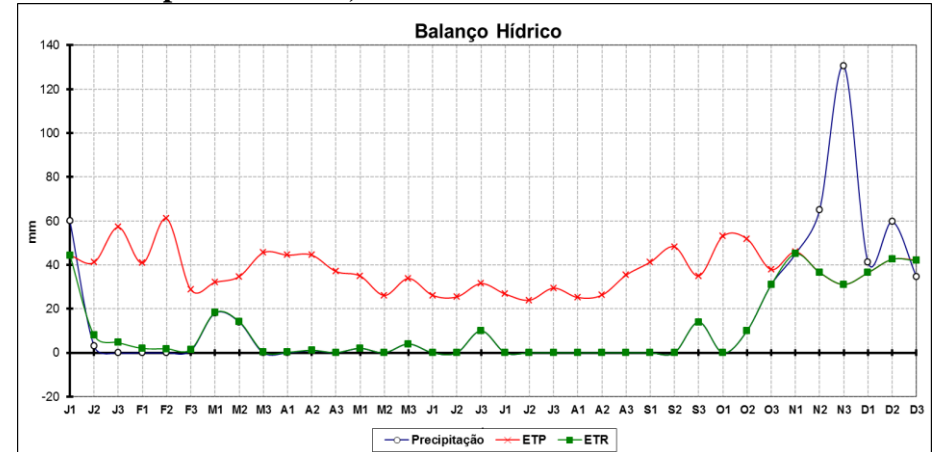
Estação Jaíba

Representação gráfica do extrato do balanço hídrico, plotando-se DEF e EXC.

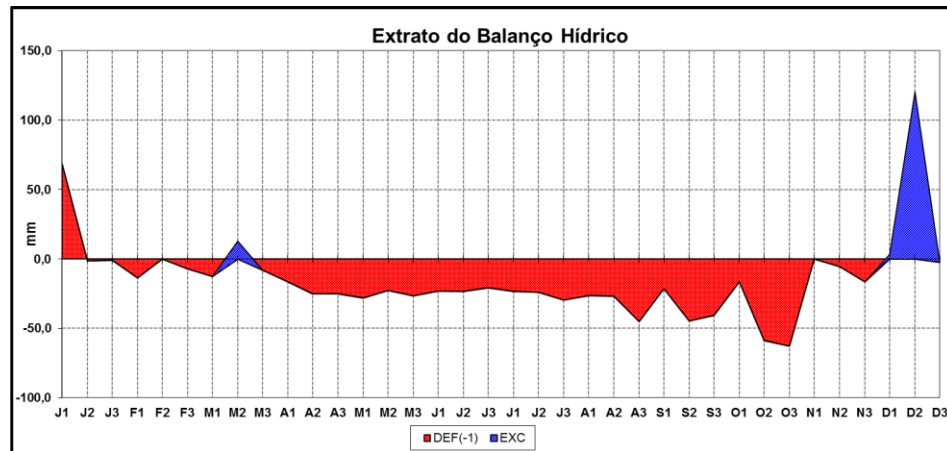


1999

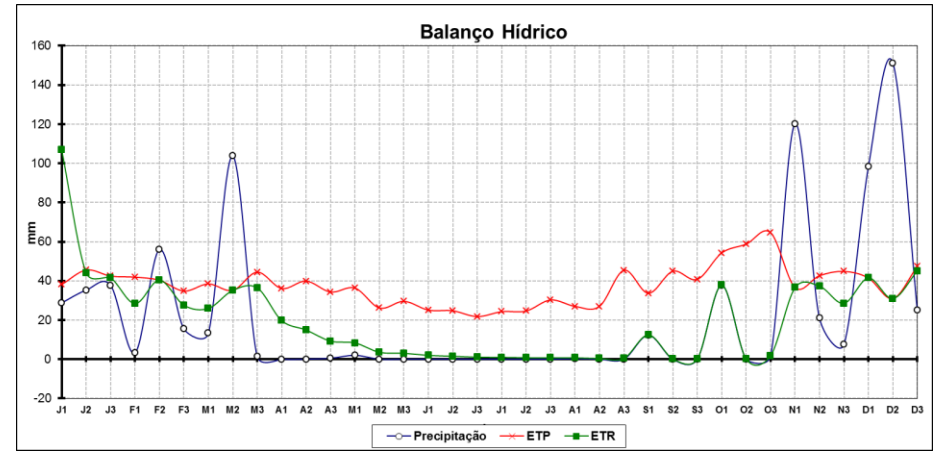
Representação gráfica completa do balanço hídrico climatológico, plotando-se P, ETP e ETR na forma de linhas.



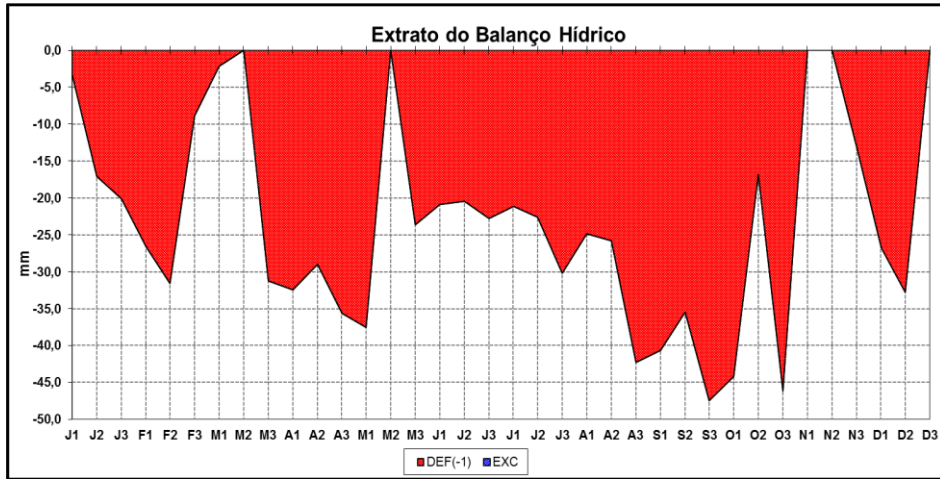
1999



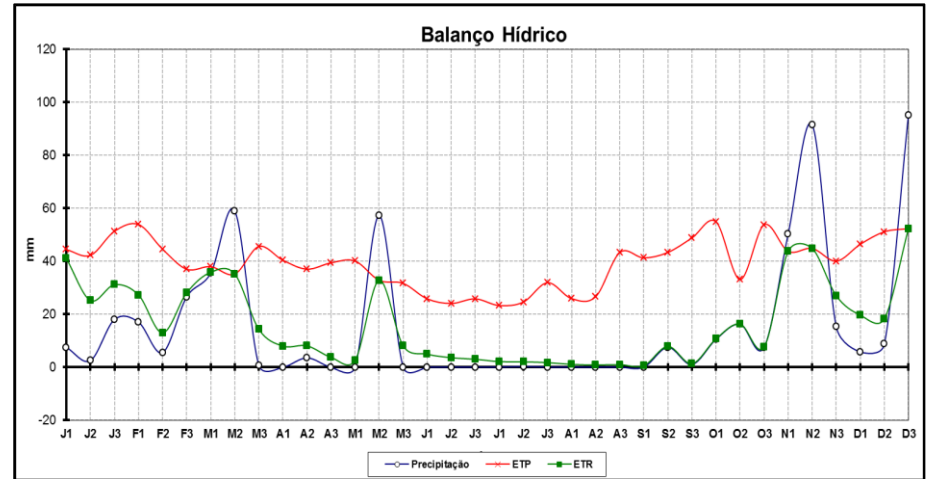
2000



2000



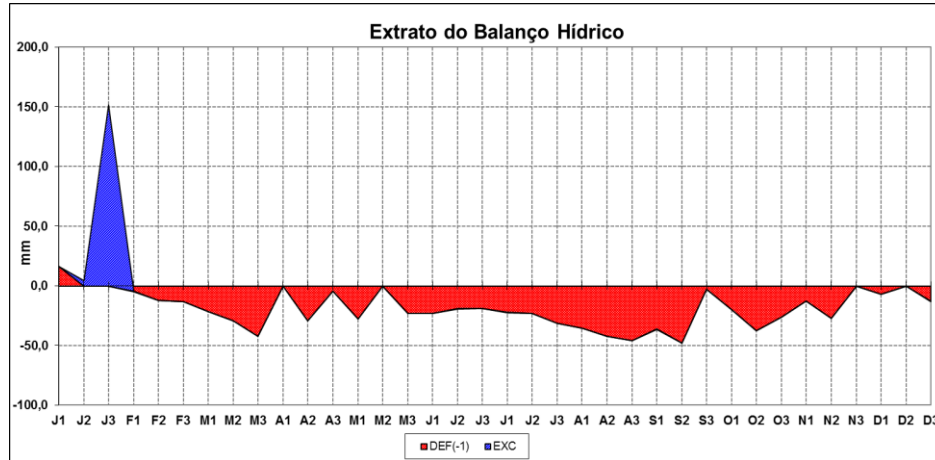
2001



2001

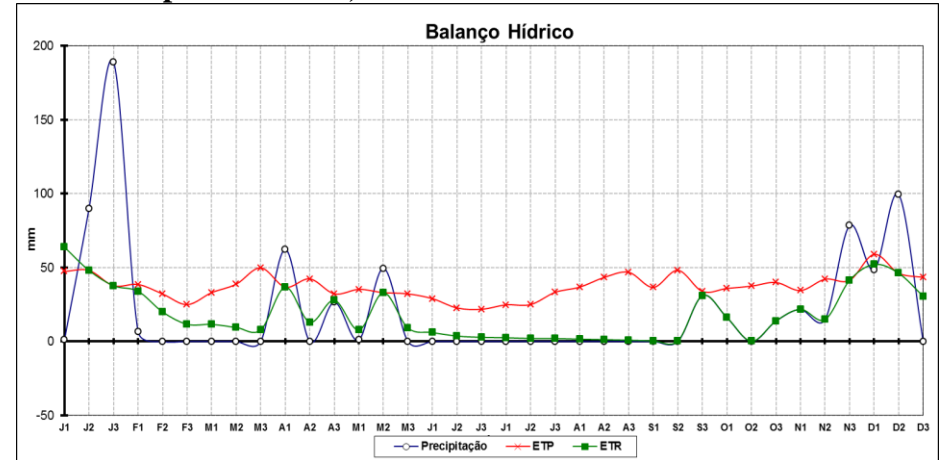
Estação Janaúba

Representação gráfica do extrato do balanço hídrico, plotando-se DEF e EXC.

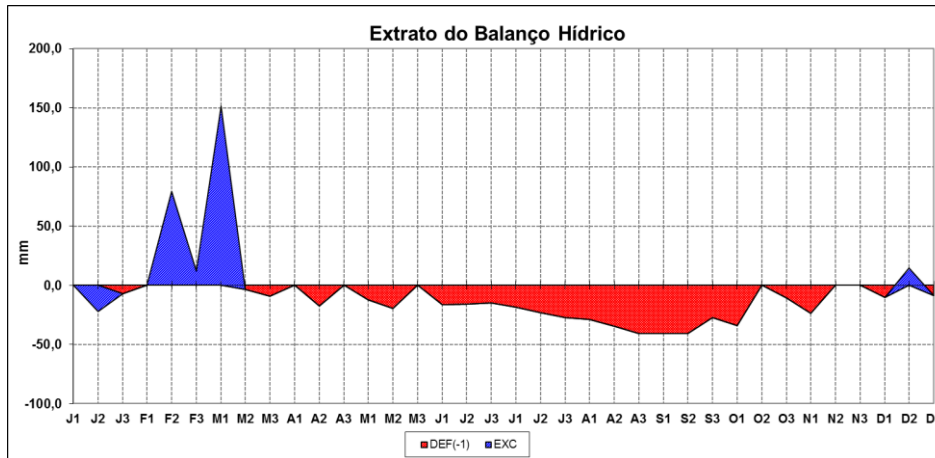


1977

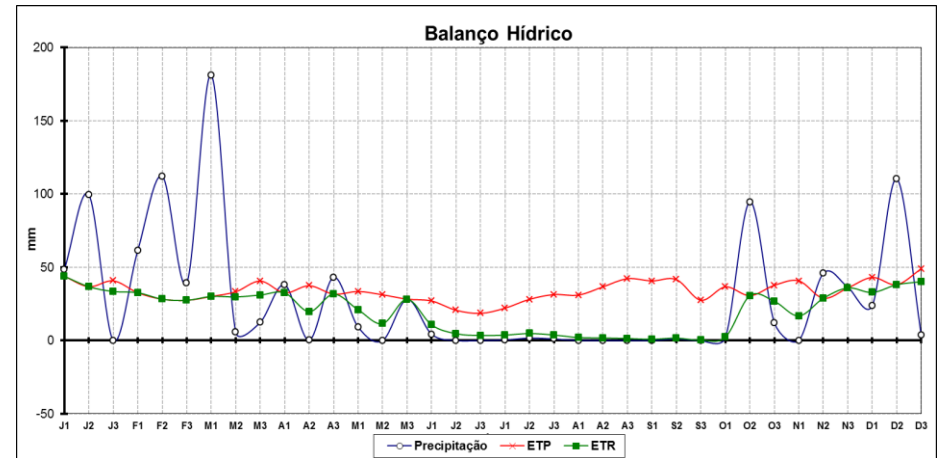
Representação gráfica completa do balanço hídrico climatológico, plotando-se P, ETP e ETR na forma de linhas.



1977



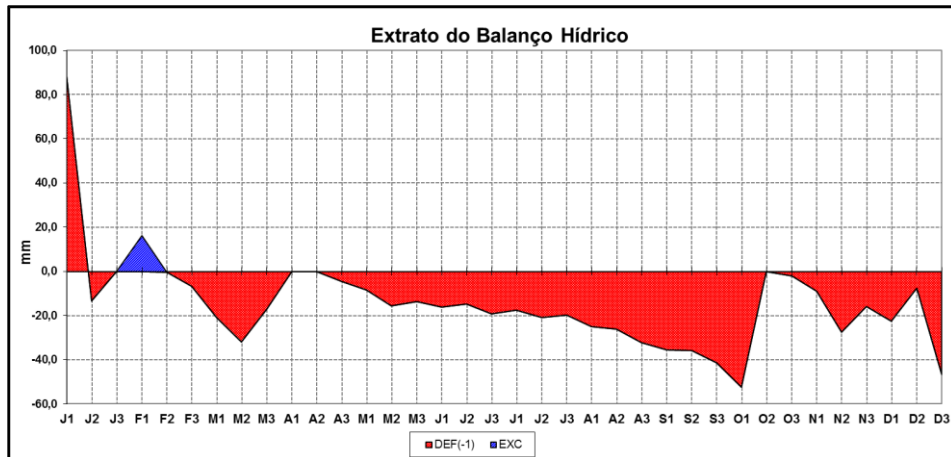
1978



1978

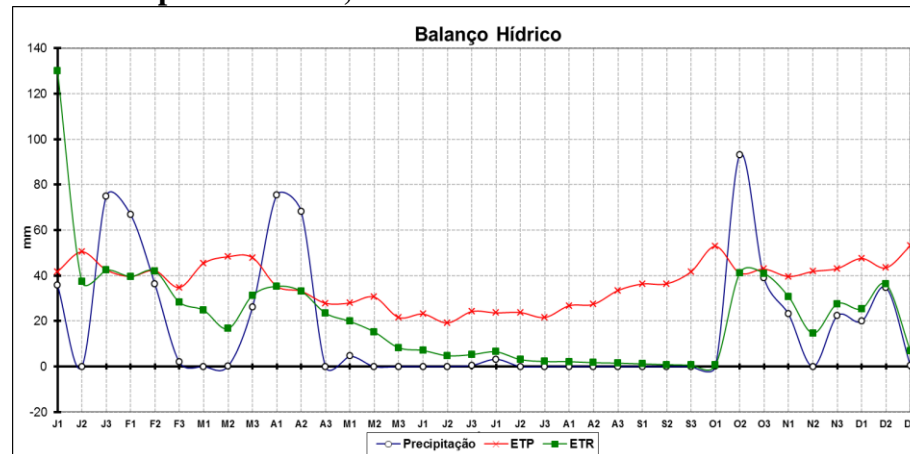
Estação Espinosa

Representação gráfica do extrato do balanço hídrico, plotando-se - DEF e EXC.

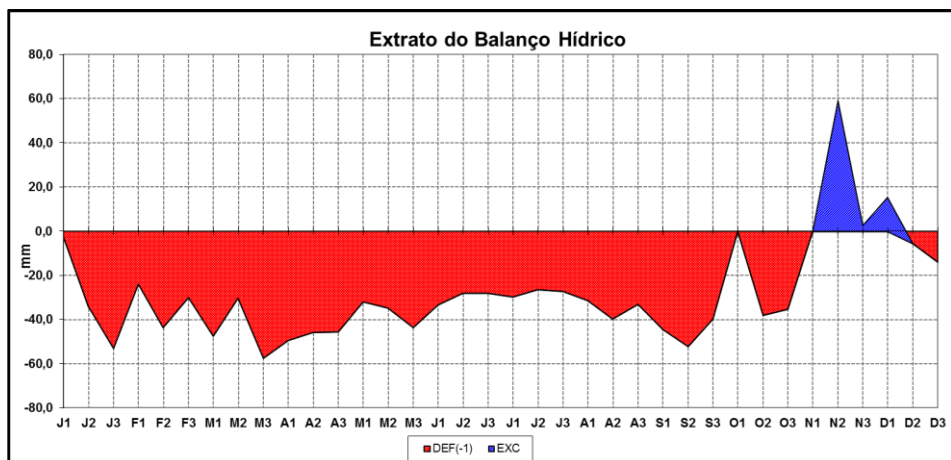


1975

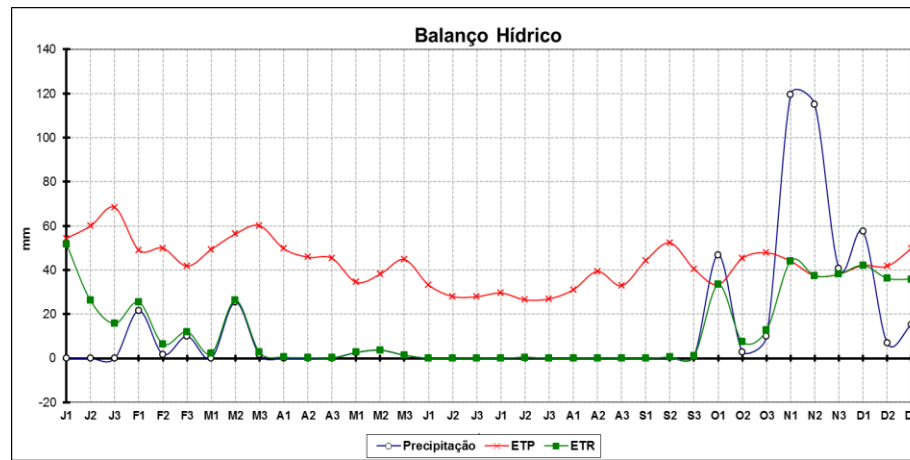
Representação gráfica completa do balanço hídrico climatológico, plotando-se P, ETP e ETR na forma de linhas.



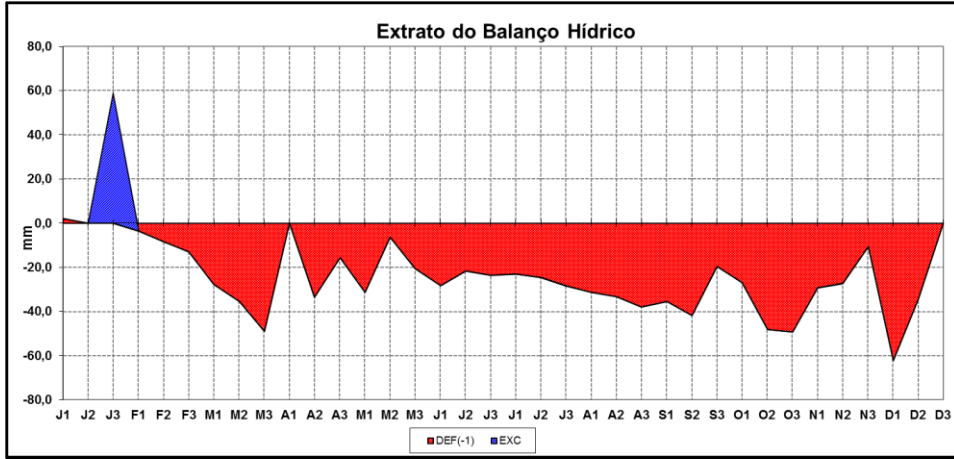
1975



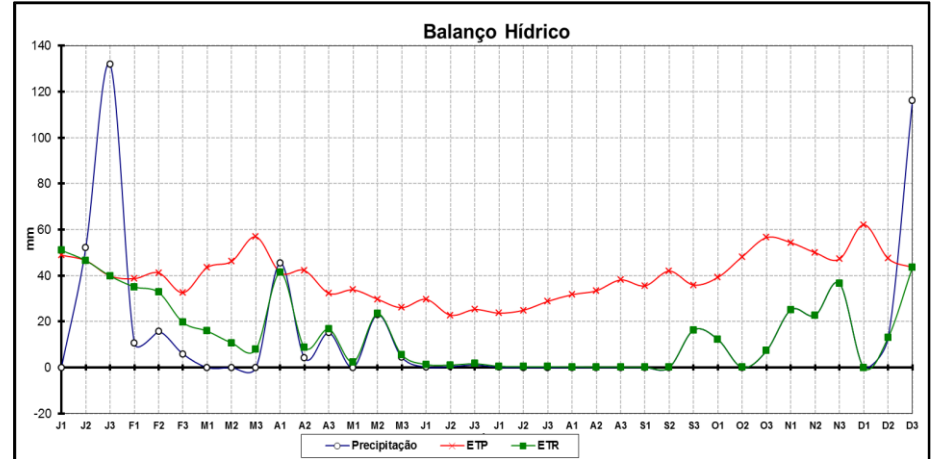
1976



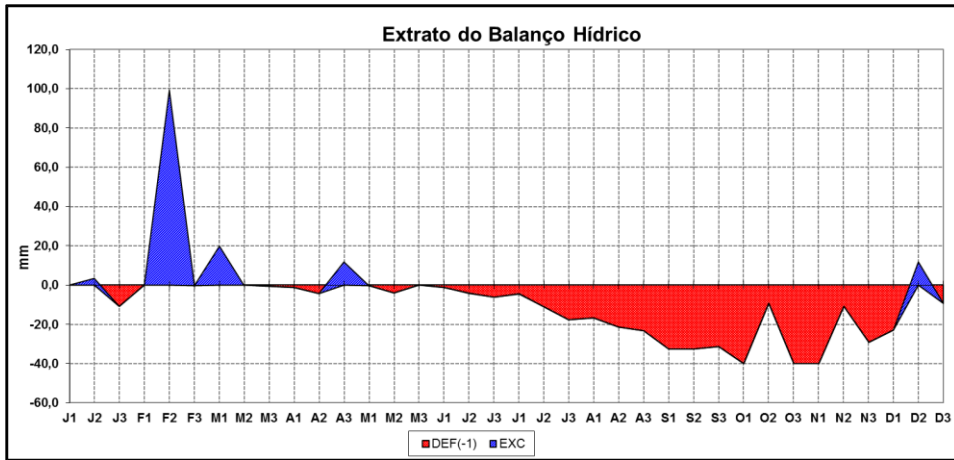
1976



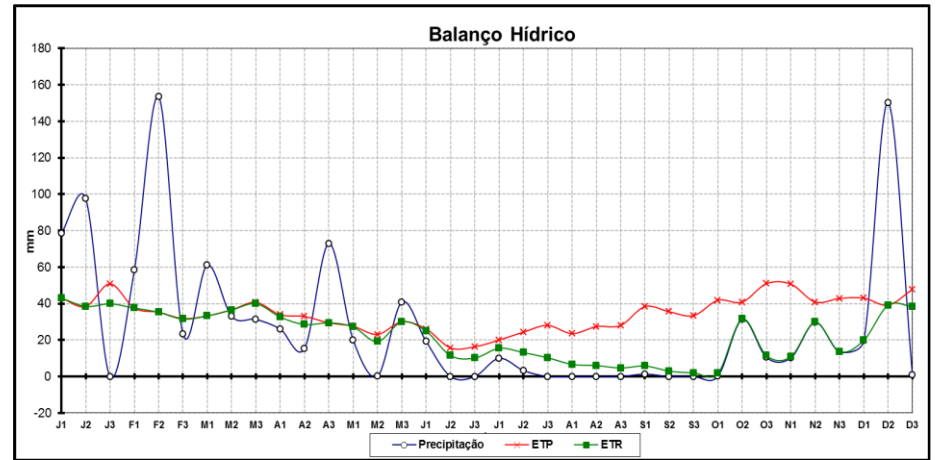
1977



1977



1978












1978

ANEXO II – FICHAS DE CAMPO DOS POÇOS TUBULARES

Anexo III – TABELA DE DESCRIÇÃO DOS POÇOS TUBULARES

| Código | Cadastro Antigo | Nome do Poço | Localidade | Município | Data de Visita | Coordenadas | | Altitude da Base do Poço | FOTOS | |
|--------|-------------------|----------------------------|----------------------------|----------------|----------------|-------------|---------|--------------------------|---|---|
| | | | | | | UTM X | UTM Y | | | |
| CE001 | 3 (rede codevasf) | Virgilândia (Baixão) | Virgilândia (Baixão) | Capitão Enéias | 28/03/2010 | 650598 | 8220298 | 552 m |  |  |
| EP001 | EPN1 | Duarte Balieiro Confecções | Beira da rodovia MG 122. | Espinosa | 20/05/2010 | 734092 | 8349305 | |  | |
| FS002 | FRS15 | Fazenda Cascabuio | Faz. Cascabuio | Francisco Sá | 27/03/2010 | 639030 | 8162139 | 630m |  |  |
| FS003 | NR | Sítio Corgão | Sítio Corgão(casa amarela) | Francisco Sá | 28/03/2010 | 662195 | 8177189 | 657m |  |  |
| FS004 | FRS31 | Fazenda Santa Maria | Poções | Francisco Sá | 28/03/2010 | 663772 | 8209899 | 587m |  |  |



| | | | | | | | | | | |
|-------|------------|----------------|--|---------------|------------|---|--|------|---|---|
| GM001 | GAM3 | Várzea do Jacú | Várzea do Jacu, ponto ao norte da comunidade de Gameleiras e Brejo dos Mártires. | Gameleiras | 23/05/2010 | 691652 | 8346336 | |  |  |
| JB020 | JA142 | Terra Boa | Assentamento Terra Boa | Jaíba | 23/05/2010 | Terra Boa 1 670061 Terra Boa 2 668716 | Terra Boa 1 8322215 Terra Boa 2 8322908 | |  |  |
| MA001 | MTZ3 | Pajeú | Pajeú, próximo à capela São João | Monte Azul | 20/05/2010 | 726348 | 8309076,9 | |  | |
| MC002 | 3100006322 | Sítio Fradinho | Cabeceiras do Rio Pacuí | Montes Claros | 26/03/2010 | 615854 | 8137257 | 886m |  |  |
| MC003 | MCL49 | Posto Novo Rio | Saída p/ Juramento Posto Novo Rio | Montes Claros | 27/03/2010 | 627665 | 8153391 | 662m |  |  |

| | | | | | | | | | | |
|--------|------------------------|---|---|----------------|------------|----------|---------|------|---|---|
| MR001 | 3100007687 (siagas) | Posto Polícia Rodoviária Estadual | Estrada BR 135 margem direita. | Mirabela | 21/03/2010 | 590370 | 8199996 | 804m |  |  |
| MR002 | MIR-6 | Poço da BR-135 | Comunidade São Bento | Mirabela | 21/03/2010 | 583122 | 8216055 | 778m |  |  |
| MTC001 | MCD10 | Faz. Brasão | Estrada Matias Cardoso a Manga | Matias Cardoso | 21/05/2010 | 641348 | 8341200 | |  |  |
| MTC002 | MCD21 | Vila Bela | Vila Bela | Matias Cardoso | 21/05/2010 | 616437 | 8370984 | |  |  |
| PP002 | PAP2* | Angicos | Próximo ao Rio Salinas, Fazenda Vargem. | Pai Pedro | 21/05/2010 | 697121,7 | 8295916 | |  |  |

| | | | | | | | | | | |
|-------|--------------------|----------------------|--|-------------------|----------------------|--------|---------|------|---|---|
| PP001 | 35 | Mirante | Mirante próximo á comunidade do lado do açude. | Pai Pedro | 20/05/2010 | 707795 | 8275243 | |  |  |
| SP001 | 37 (rede codevasf) | Poço Brejo Grande | Brejo Grande | São João da Ponte | 21/03/2010 | 605468 | 8250186 | 666m |  |  |
| SP002 | SJP2, 4, 5 | Fazenda Santa Mônica | Fazenda Santa Mônica | São João da Ponte | 21/03/2010 | 633994 | 8230132 | 525m |  |  |
| SP003 | SJP12 | Poço da Manga 8 | Faz. Sementes Tolentino | São João da Ponte | 22/03/2010 e 12/3/11 | 614258 | 8228969 | 660m |  |  |
| MC006 | 3100006318 | Rio do sítio | Córrego do sítio | Montes Claros | 06/03/2011 | 633601 | 8130344 | 673 |  |  |

| | | | | | | | | | | |
|-------|------------|-------------------|----------------------------|---------------------|------------|--------|---------|-----|---|---|
| MC005 | MCL135 | Faz. Buritis | Faz. Buritis | Montes Claros | 07/03/2011 | 598508 | 8152769 | 847 |  |  |
| MZ005 | MTZ5 | Poço da copasa | 6 km após a cidade | Monte Azul | 08/03/2011 | 727862 | 8329049 | 650 |  |  |
| EP006 | EPN6 | Comunidade Catitú | Poço da Copasa | Espinosa | 08/03/2011 | 719574 | 8372953 | 500 |  |  |
| EP004 | EPN4 | Piranhas | Próximo a Juremal | Espinosa | 08/03/2011 | 702902 | 8376191 | 476 |  |  |
| RM001 | 3100010149 | Poço Copasa | Do lado da Policia militar | Riacho dos Machados | 09/03/2011 | 661569 | 8229839 | |  |  |

Anexo II – TABELA DE DESCRIÇÃO DOS PONTOS CADASTRADOS EM CAMPO

| Código | Cadastro Antigo | Nome do Poço | Localidade | Município | Data de Visita | Coordenadas | | Altitude da Base | N.A. (m) | Observações | FOTOS | |
|--------|-----------------|----------------|------------------------------------|----------------|----------------|-------------|-----------|------------------|----------|--|---|---|
| | | | | | | UTM X | UTM Y | | | | | |
| JB021 | JA167 | Furado Novo | Faz. Nova esperança ou Serra Verde | Jaíba | 22/05/2010 | 670287 | 8305829 | | | O poço está localizado na Fazenda Terra Morena. A entrada para o ponto se faz no entrocamento com placa Fazenda Terra Morena e Fazenda Santa Amélia. Fz. de Luciano Pereira Pegô | | |
| VD022 | VER21 | Poço Velho | Faz. Santo Antonio do Bom Jardim | Verdelândia | 11/03/2011 | 6692620 | 8288738 | | | Dono: João Pereira Barbosa/ João Coragem Perto da Fazenda Colonial. | | |
| FS007 | 3100000724 | Faz. São Paulo | BR122 | Francisco Sá | 07/03/2011 | 638135 | 8181454 | | | Passa pela BR122 por uam casa de porteira branca a direita, ve-se uma placa indicando a Faz. São paulo, e logo vira a direita, por estrada de terra, que só passa com carro traçado. | | |
| PP004 | PAP19 | Poço Copasa | Na cidade | Pai Pedro | 09/03/2011 | 706986 | 8282887 | | | Poço é na única fazenda que existe na cidade, no fundão. | | |
| MTC006 | MCD20 | Agrobetânia | Faz. Betânia | Matias Cardoso | 11/03/2011 | 653495 | 8366723 | | | Perto de Gado Bravo. | | |
| MC004 | 3100007729 | Água Santa | Água Santa - Barroão | Montes Claros | 26/03/2010 | 621969 | 8130298 | 958m | | Próximo ao posto Planalto, na BR 135, entrar em estrada de terra, descer, passa a igreja e vira a direita. |  |  |
| VZ006 | VZ006 | | BREJO DO MUTAMBAL | VARZELÂNDIA | 25/05/2010 | 607374 | 8280673 | | | | | |
| VZ001 | VZ001 | | BEBEDOURO | VARZELÂNDIA | 26/05/2010 | 598396 | 8264904 | | | | | |
| VD001 | VD001 | | SEBO | VERDELÂNDIA | 26/05/2010 | 630018 | 8261749 | | | | | |
| VD003 | VD003 | | FAZENDA SAPÉ | VERDELÂNDIA | 01/06/2010 | 653665 | 8271476 | | | | | |
| VD013 | VD013 | | FAZENDA COLONIAL | VERDELÂNDIA | 02/06/2010 | 630188 | 8277074 | | | | | |
| VD021 | VD021 | LEILA 01 | AMARGOSO | VERDELÂNDIA | 06/06/2010 | 644726 | 8287781 | | | | | |
| JB003 | JB003 | | NH1 | JAÍBA | 06/06/2010 | 613129 | 8328286 | | | | | |
| JB007 | JB007 | | FAZENDA LAGOA DO MEIO | JAÍBA | 01/06/2010 | 628755 | 8328191.9 | | | | | |
| JB008 | JB008 | | FAZENDA PIONEIRA | JAÍBA | 01/06/2010 | 633270 | 8323859 | | | | | |

ANEXO III – DADOS EXISTENTES DOS POÇOS TUBULARES

| Código Antigo | Código Atual | UTMX | UTMY | Município | UniGeológicas | Perfil | Tipo Aquífero | Unidade Aquífera | Entradas d'água (m) |
|---------------|--------------|----------|-----------|---------------------|---|---|----------------------|--|---------------------|
| 3 | CE001 | 651091 | 8219830 | Capitão Enéas | Precambriano - Grupo Bambuí | 0 a 14,0 m- argila; 14,0 a 24,0 m- calcário alterado; 24,0 a 80,0 m- calcário | Cárstico | Calcário-G. Bambuí | 22,7 - 35,0 |
| EPN1 | EP001 | 734381 | 8349242 | Espinosa | Terciário-Quaternário/Cobertura Detrítica/Manto de Alteração | Argila Arenosa | Granular | Arenoso-Cobertura Detrítica/Manto Alteração | 46; 49 |
| EPN4 | EP004 | 702902 | 8376191 | Espinosa | Terciário-Quaternário/Cobertura Detrítica/Manto de Alteração | Terciário-Quaternário/Cobertura Detrítica/Manto de Alteração | Granular | Arenoso-Cobertura Detrítica/Manto Alteração | |
| EPN6 | EP006 | 719574 | 8372953 | Espinosa | Argila | Terciário-Quaternário/Cobertura Detrítica/Manto de Alteração | Granular | Arenoso-Cobertura Detrítica/Manto Alteração | |
| FRS15 | FS002 | 639030 | 8162139 | Francisco Sá | Préambriano Grupo Bambuí | Calcário | Cárstico | Calcário/Siltito-Bambuí | |
| FRS | FS003 | 662195 | 8177189 | Francisco Sá | Préambriano Grupo Bambuí | Calcário | Cárstico | Calcário/Siltito-Bambuí | |
| FRS31 | FS004 | 663772 | 8209899 | Francisco Sá | Préambriano Grupo Bambuí | Não Informado | Fissurado | NÃO INFORMADO | |
| 310000724 | FS007 | 638135 | 8181454 | Francisco Sá | Sub-grupo Paraopeba | | Cárstico | | |
| GAM3 | GM001 | 691652 | 8346336 | Gameleiras | Préambriano Grupo Bambuí | Siltito | Fissurado - Cárstico | Calcário/Siltito-Bambuí | |
| JB003 | JB003 | 613129 | 8328286 | Jaíba | Préambriano Grupo Bambuí | calcário oolítico | Fissurado - Cárstico | | |
| JB007 | JB007 | 628765 | 8328191 | Jaíba | Préambriano Grupo Bambuí | calcário oolítico | Fissurado - Cárstico | | |
| JB008 | JB008 | 633270 | 8323859 | Jaíba | Préambriano Grupo Bambuí | calcários oolíticos de 20 a 80 m. | Fissurado - Cárstico | | 18-25 e 25-75 |
| JAI42 | JB020 | 669604 | 8327023 | Jaíba | Préambriano Grupo Bambuí | Não Informado | Fissurado - Cárstico | Não Informado | |
| JAI67 | JB021 | 670287 | 8305829 | Jaíba | Préambriano Grupo Bambuí | Calcário | Fissurado - Cárstico | Não Informado | |
| MTZ3 | MA001 | 726348 | 8309078 | Monte Azul | Não Informado | Cobertura detrítica/Manto de alteração | Fissurado | Não Informado | |
| 8322 | MC002 | 615854 | 8137257 | Montes Claros | Form. Lagoa do Jacaré | Calcário | Cárstico | | |
| MCL49 | MC003 | 627665 | 8153391 | Montes Claros | Form. Lagoa do Jacaré | Calcário | Cárstico | | |
| 3100007729 | MC004 | 621969 | 8130298 | Montes Claros | Form. Lagoa do Jacaré | Calcário | Cárstico | | |
| 3100006318 | MC006 | 633601 | 8130344 | Montes Claros | Form. Lagoa do Jacaré | Calcário | Cárstico | | |
| 7687 | MR001 | 591753 | 8196236 | Mirabela | Form. Lagoa do Jacaré | Calcário | Cárstico | | |
| MIR06 | MR002 | 583122 | 8216055 | Mirabela | Préambriano Grupo Bambuí | Calcário Bambuí | Cárstico | Calcário Bambuí | |
| MCD10 | MTC001 | 643391 | 8342281 | Matias Cardoso | Préambriano Grupo Bambuí | Calcário Bambuí | Fissurado - Cárstico | Não Informado | 0 |
| MCD21 | MTC002 | 616377 | 8370883 | Matias Cardoso | Préambriano Grupo Bambuí | Calcário Bambuí | Fissurado - Cárstico | Calcário Bambuí | |
| MCD20 | MTC006 | 653495 | 8366723 | Matias Cardoso | Préambriano Grupo Bambuí | Calcário Bambuí | Fissurado - Cárstico | Calcário Bambuí | |
| MTZ25 | MZ005 | 727862 | 8329049 | Monte Azul | Migmatito-Associação Gnáisses-Granitos Diversos. | Migmatito | Fissurado | Migmatito-Associação Gnáisses-Granitos Diversos. | |
| 35 | PP001 | 707795 | 8275213 | Pai Pedro | Complexo Porteirinha | Cobertura detrítica/Manto de alteração | Fissurado | Migmatito-Associação Gnáisses-Granitos Diversos. | |
| PAP2* | PP002 | 697121,7 | 8295916 | Pai Pedro | Não Informado | Não Informado | Fissurado | Não Informado | |
| PAP19 | PP004 | 706986 | 8282887 | Pai Pedro | Terciário-Quaternário/Cobertura Detrítica/Manto de Alteração; Precambriano-Associação Xistos-Gnáisses-Migmatitos | Argila Arenosa | Granular | Cascalho-Cobertura Detrítica/Manto de Alteração | |
| 3100010149 | RM001 | 714020,3 | 8229839 | Riacho dos Machados | Complexo Porteirinha | Cobertura detrítica/Manto de alteração | Fissurado | Migmatito-Associação Gnáisses-Granitos Diversos. | |
| 37 | SP001 | 606345 | 8246944 | São João da Ponte | Cobertura detrítica/Manto de alteração | 0 a 24,0m- argilite arenoso; 24,0 a 50,0m- calcário | Cárstico | Calcário Bambuí | 45,0 - 46,0 |
| SJP2, 4, 5 | SP002 | 633994 | 8230132 | São João da Ponte | Préambriano Grupo Bambuí | Cobertura detrítica/Manto de alteração | Fissurado - Cárstico | Calcário Bambuí | |
| SJP12 | SP003 | 614258 | 8228969 | São João da Ponte | Préambriano Grupo Bambuí | Não Informado | Fissurado - Cárstico | Não Informado | |
| VD001 | VD001 | 630018 | 8261749 | Verdelândia | Préambriano Grupo Bambuí | calcários e siltitos | Fissurado - Cárstico | | |
| VD003 | VD003 | 653665 | 8271476 | Verdelândia | Préambriano Grupo Bambuí | calcários e siltitos | Fissurado - Cárstico | | |
| VD013 | VD013 | 659135 | 8294480 | Verdelândia | Préambriano Grupo Bambuí | calcários e siltitos | Fissurado - Cárstico | | |
| VER21 | VD020 | 669262 | 8288737,9 | Verdelândia | Préambriano Grupo Bambuí | calcários e siltitos | Fissurado - Cárstico | | |
| LEILA01 | VD021 | 644726 | 8287781 | Verdelândia | Préambriano Grupo Bambuí | Calcários oolíticos | Fissurado - Cárstico | | |
| VER21 | VD022 | 669262 | 8288737,9 | Verdelândia | Préambriano Grupo Bambuí | Calcário | Fissurado - Cárstico | Não Informado | |
| VZ001 | VZ001 | 598396 | 8284904 | Varzelândia | Préambriano Grupo Bambuí | calcários e siltitos | Fissurado - Cárstico | | |
| VZ006 | VZ006 | 607374 | 8280673 | Varzelândia | Lagoa do Jacaré | calcários e siltitos | Fissurado - Cárstico | | 16,0 e 21,0 |

ANEXO IV - ANÁLISES HIDROQUÍMICAS REALIZADAS PELO CETEC-MG

| Poço | Data Amostragem | Hora amostragem | Condição de tempo | Condutividade elétrica, in loco | EH | pH, in loco | Sólidos dissolvidos totais in loco | Temperatura da água | Temperatura do ar | Alcalinidade de bicarbonato | Cloreto total | Condutividade elétrica, Lab | Cor verdadeira | Dureza de cálcio | Dureza de magnésio | Dureza total | Fenóis totais | Fluoreto ionizado | Fósforo total | Nitrato | Nitrito | Nitrogênio amoniacal total | Nitrogênio orgânico |
|---------------------|-----------------|-----------------|-------------------|---------------------------------|------|-------------|------------------------------------|---------------------|-------------------|-----------------------------|---------------|-----------------------------|----------------|------------------|--------------------|--------------|---------------|-------------------|---------------|---------|---------|----------------------------|---------------------|
| | | | | µS/cm | mV | unid. de pH | ppm | °C | oC | mg/L CaCO3 | mg/L | µS/cm | UPt | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L | mg N/L | mg N/L | mg/L | mg/L |
| CE001 | 19-10-2011 | 17:00 | Nublado | 863,60 | 258 | 6,80 | 632,90 | 24,9 | 19,0 | 376,0 | 57,00 | 811,0 | 10,0 | 407,00 | 5,30 | 412,0 | 0,002 | 0,290 | 0,020 | 2,930 | 0,001 | 0,100 | 0,540 |
| EP001 | 25-10-2011 | 09:45 | Bom | 2391,00 | 94 | 6,84 | 1863,00 | 26,3 | 25,0 | 263,0 | 698,00 | 2490,0 | 10,0 | 516,00 | 214,00 | 730,0 | 0,002 | 1,200 | 0,070 | 5,520 | 0,003 | 0,100 | 0,560 |
| EP004 | 26-10-2011 | 12:20 | Bom | 1216,00 | 72 | 6,79 | 902,40 | 28,4 | 28,0 | 341,0 | 260,00 | 1112,0 | 20,0 | 488,00 | 10,20 | 499,0 | 0,002 | 0,240 | 0,020 | 5,440 | 0,009 | 0,100 | 0,650 |
| EP006 | 25-10-2011 | 11:15 | Bom | 1157,00 | 12 | 6,80 | 853,00 | 28,5 | 26,0 | 251,0 | 207,00 | 1205,0 | 10,0 | 454,00 | 56,10 | 510,0 | 0,002 | 0,320 | 0,020 | 0,200 | 0,011 | 0,100 | 0,120 |
| FS002 | 13-10-2011 | 09:30 | Bom | 444,80 | 133 | 7,92 | 316,80 | 25,4 | 28,0 | 290,0 | 1,87 | 451,0 | 10,0 | 216,00 | 23,60 | 240,0 | 0,002 | 0,100 | 0,020 | 0,100 | 0,003 | 0,100 | 0,100 |
| FS003 | 13-10-2011 | 11:00 | Bom | 1240,00 | 150 | 6,81 | 924,50 | 25,1 | 27,0 | 340,0 | 143,00 | 1295,0 | 10,0 | 453,00 | 56,50 | 510,0 | 0,002 | 0,320 | 0,020 | 0,190 | 0,003 | 0,100 | 0,110 |
| FS004 | 10-11-2011 | 15:30 | Bom | 2034,00 | 150 | 6,60 | 1565,00 | 26,0 | 30,0 | 341,0 | 137,00 | 2006,0 | 10,0 | 987,00 | 204,00 | 1191,0 | 0,002 | 0,100 | 0,020 | 1,520 | 0,004 | 0,100 | 0,250 |
| FS007 | 19-10-2011 | 18:00 | Nublado | 908,50 | 250 | 6,97 | 670,70 | 24,5 | 18,0 | 383,0 | 55,20 | 815,0 | 10,0 | 459,00 | 26,60 | 486,0 | 0,002 | 0,180 | 0,020 | 1,240 | 0,002 | 0,100 | 0,400 |
| GM001 | 26-10-2011 | 14:15 | Bom | 490,20 | 52 | 6,86 | 348,70 | 29,2 | 29,0 | 240,0 | 30,80 | 451,0 | 10,0 | 176,00 | 51,20 | 227,0 | 0,002 | 0,100 | 0,030 | 0,730 | 0,003 | 0,100 | 0,170 |
| JB003 | 17-11-2011 | 12:40 | Bom | 525,80 | - | 8,07 | 374,40 | 27,7 | 28,0 | 260,0 | 14,40 | 502,0 | 10,0 | 26,80 | 1,00 | 27,2 | 0,002 | 3,860 | 0,020 | 0,020 | 0,012 | 0,190 | 0,100 |
| JB007 | 28-11-2011 | 13:10 | Bom | 590,70 | - | 7,68 | 421,30 | 28,0 | 30,0 | 256,0 | 52,60 | 653,0 | 18,0 | 180,00 | 15,60 | 196,0 | 0,002 | 1,020 | 0,020 | 0,020 | 0,008 | 0,100 | 0,140 |
| JB008 | 17-11-2011 | 10:30 | Bom | 647,70 | - | 7,06 | 465,10 | 26,8 | 30,0 | 325,0 | 30,10 | 594,0 | 10,0 | 166,00 | 45,90 | 212,0 | 0,002 | 0,360 | 0,020 | 0,020 | 0,001 | 0,270 | 0,100 |
| JB020 | 30-11-2011 | 12:00 | Bom | 1023,00 | - | 7,47 | 751,40 | 26,8 | 30,0 | 338,0 | 80,00 | 1078,0 | 10,0 | 205,00 | 6,30 | 212,0 | 0,002 | 0,210 | 0,020 | 0,300 | 0,004 | 0,100 | 0,210 |
| JB021 | 30-11-2011 | 10:10 | Bom | 557,80 | - | 7,87 | 398,70 | 27,3 | 30,0 | 259,0 | 38,40 | 596,0 | 10,0 | 49,60 | 13,40 | 63,1 | 0,002 | 0,600 | 0,020 | 0,020 | 0,001 | 0,150 | 0,100 |
| MA001 | 25-10-2011 | 16:45 | Bom | 1133,00 | 111 | 6,74 | 838,00 | 27,6 | 30,0 | 382,0 | 164,00 | 1167,0 | 10,0 | 377,00 | 227,00 | 603,0 | 0,002 | 0,370 | 0,030 | 8,430 | 0,003 | 0,100 | 0,490 |
| MC002 | 10-11-2011 | 10:30 | Bom | 268,90 | 85 | 7,32 | 187,90 | 23,8 | 26,0 | 146,0 | 0,67 | 272,0 | 10,0 | 33,50 | 4,20 | 37,6 | 0,002 | 0,160 | 0,030 | 0,020 | 0,005 | 0,120 | 0,100 |
| MC003 | 12-10-2011 | 11:30 | Bom | 464,20 | 28 | 7,25 | 329,40 | 26,7 | 30,0 | 260,0 | 0,50 | 470,0 | 10,0 | 212,00 | 46,10 | 258,0 | 0,002 | 0,160 | 0,020 | 0,030 | 0,001 | 0,100 | 0,100 |
| MC004 | 14-10-2011 | 09:30 | Bom | 310,80 | 99 | 7,34 | 218,40 | 24,0 | 27,0 | 104,0 | 2,82 | 320,0 | 10,0 | 155,00 | 27,70 | 183,0 | 0,002 | 0,110 | 0,040 | 0,330 | 0,002 | 0,100 | 0,100 |
| MC006 | 14-10-2011 | 11:30 | Bom | 226,00 | 127 | 6,97 | 156,20 | 25,6 | 28,0 | 88,2 | 1,25 | 231,0 | 92,0 | 94,50 | 5,00 | 100,0 | 0,002 | 0,100 | 0,080 | 0,580 | 0,007 | 0,100 | 0,360 |
| MR001 | 24-10-2011 | 11:30 | Bom | 289,20 | 50 | 7,07 | 201,70 | 25,4 | 24,0 | 162,0 | 0,50 | 295,0 | 10,0 | 162,00 | 2,00 | 164,0 | 0,002 | 0,100 | 0,040 | 0,180 | 0,001 | 0,100 | 0,100 |
| MR002 | 24-10-2011 | 09:00 | Bom | 316,40 | 51 | 7,59 | 221,80 | 24,6 | 22,0 | 169,0 | 1,63 | 320,0 | 12,0 | 128,00 | 18,80 | 147,0 | 0,002 | 0,200 | 0,020 | 0,160 | 0,003 | 0,100 | 0,120 |
| MTC001 | 22-05-2011 | --- | Bom | 536,50 | 156 | 7,19 | 376,50 | 26,8 | 30,0 | 236,0 | 26,20 | 571,0 | <10 | 279,00 | 41,00 | 320,0 | <0,002 | 0,250 | <0,02 | 1,230 | 0,004 | <0,10 | 0,330 |
| MTC002 | 28-11-2011 | 14:40 | Bom | 694,00 | - | 7,97 | 498,60 | 27,8 | 30,0 | 243,0 | 71,60 | 774,0 | 27,0 | 57,20 | 32,60 | 89,8 | 0,002 | 6,250 | 0,020 | 0,020 | 0,002 | 0,470 | 0,100 |
| MTC006 | 29-11-2011 | 12:15 | Bom | 774,20 | - | 7,32 | 562,00 | 25,0 | 26,4 | 169,0 | 42,90 | 786,0 | 10,0 | 334,00 | 4,60 | 339,0 | 0,002 | 0,200 | 0,020 | 0,220 | 0,002 | 0,100 | 0,280 |
| MZ005 | 20-10-2011 | 13:15 | Bom | 373,00 | -19 | 7,11 | 265,80 | 24,5 | 25,0 | 193,0 | 4,96 | 383,0 | 77,0 | 199,00 | 11,10 | 210,0 | 0,002 | 0,110 | 0,020 | 0,090 | 0,005 | 0,100 | 0,110 |
| PP001 | 27-10-2011 | 12:30 | Bom | 1477,00 | 54 | 6,63 | 1104,00 | 28,8 | 30,0 | 336,0 | 324,00 | 1380,0 | 10,0 | 454,00 | 39,70 | 493,0 | 0,002 | 1,400 | 0,120 | 8,510 | 0,004 | 0,100 | 0,430 |
| PP002 | 27-10-2011 | 09:20 | Bom | 866,00 | 64 | 7,38 | 629,40 | 27,0 | 22,0 | 390,0 | 33,00 | 807,0 | 10,0 | 188,00 | 59,20 | 247,0 | 0,002 | 0,100 | 0,020 | 1,390 | 0,002 | 0,100 | 0,180 |
| PP004 | 27-10-2011 | 10:40 | Bom | 913,00 | 82 | 6,62 | 664,90 | 28,5 | 24,0 | 376,0 | 91,20 | 911,0 | 10,0 | 392,00 | 65,50 | 458,0 | 0,002 | 0,130 | 0,020 | 2,490 | 0,006 | 0,100 | 0,630 |
| RM001 | 10-10-2011 | 12:15 | Bom | 10,14 | 68 | 7,05 | 6,67 | 26,5 | 28,0 | 230,0 | 28,40 | 519,0 | 10,0 | 161,00 | 91,60 | 252,0 | 0,002 | 0,120 | 0,020 | 1,460 | 0,002 | 0,100 | 0,500 |
| SP001 | 15-11-2011 | 12:30 | Bom | 634,00 | - | 6,71 | 454,60 | 26,6 | 26,0 | 354,0 | 8,05 | 645,0 | 10,0 | 370,00 | 9,20 | 379,0 | 0,002 | 0,360 | 0,020 | 0,710 | 0,001 | 0,100 | 0,160 |
| SP002 | 23-11-2011 | 15:10 | Chuvoso | 995,20 | - | 7,11 | 732,50 | 26,3 | 23,0 | 361,0 | 122,00 | 1000,0 | 10,0 | 413,00 | 5,80 | 419,0 | 0,002 | 0,380 | 0,020 | 1,390 | 0,006 | 0,100 | 0,620 |
| SP003 | 23-11-2011 | 17:45 | Chuvoso | 427,30 | - | 6,48 | 304,80 | 25,0 | 25,8 | 208,0 | 1,50 | 433,0 | 10,0 | 211,00 | 2,50 | 213,0 | 0,002 | 0,170 | 0,020 | 0,690 | 0,001 | 0,100 | 0,180 |
| VD001 | 31-05-2011 | 13:50 | Bom | 649,10 | 100 | 6,74 | 464,80 | 26,0 | 29,0 | 339,0 | 29,90 | 691,0 | <10 | 315,00 | 51,80 | 367,0 | <0,002 | 0,530 | <0,02 | 1,250 | 0,001 | 0,200 | 0,100 |
| VD003 | 15-11-2011 | 17:00 | Bom | 2255,00 | - | 6,42 | 1745,00 | 26,2 | 22,0 | 380,0 | 593,00 | 2309,0 | 10,0 | 909,00 | 297,00 | 1206,0 | 0,002 | 0,230 | 0,020 | 0,380 | 0,001 | 0,100 | 0,100 |
| VD013 | 16-11-2011 | 14:10 | Bom | 557,20 | - | 7,89 | 395,00 | 28,0 | 30,0 | 393,0 | 37,30 | 546,0 | 10,0 | 391,00 | 3,80 | 394,0 | 0,002 | 0,430 | 0,020 | 3,180 | 0,022 | 0,210 | 0,370 |
| VD020 | 16-11-2011 | 13:00 | Bom | 1197,00 | - | 7,26 | 881,30 | 27,3 | 28,0 | 381,0 | 186,00 | 1185,0 | 10,0 | 491,00 | 47,90 | 539,0 | 0,002 | 0,410 | 0,020 | 0,610 | 0,003 | 0,100 | 0,100 |
| VD021 | 23-05-2011 | 16:00 | Bom | 558,80 | -112 | 6,93 | 418,50 | 27,0 | 28,0 | 115,0 | 132,00 | 582,0 | 12,0 | 140,00 | 77,70 | 218,0 | <0,002 | 0,160 | <0,02 | 3,340 | 0,003 | 0,160 | 0,230 |
| VD022 | 16-11-2011 | 10:00 | Bom | 854,60 | - | 6,98 | 616,60 | 27,0 | 28,0 | 351,0 | 39,60 | 852,0 | 10,0 | 451,00 | 10,00 | 461,0 | 0,002 | 0,510 | 0,020 | 10,790 | 0,003 | 0,100 | 0,100 |
| VZ001 | 15-11-2011 | 14:00 | Bom | 552,70 | - | 7,10 | 394,30 | 26,8 | 26,0 | 269,0 | 21,10 | 557,0 | 10,0 | 234,00 | 8,10 | 242,0 | 0,002 | 0,530 | 0,100 | 0,440 | 0,001 | 0,100 | 0,130 |
| VZ006 | 29-04-2011 | 15:40 | Bom | 655,7 | 112 | 6,61 | 474,00 | 24,6 | 28,0 | 335,0 | 17,20 | 683,0 | 18,0 | 312,00 | 41,80 | 353,0 | <0,002 | 0,360 | 0,040 | 1,520 | 0,005 | <0,10 | 0,220 |
| Limites de detecção | | | | | | 0,010 | | | | 1,0 | 0,50 | 1,0 | 10,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,002 | 0,1 | 0,02 | 0,02 | 0,001 | 0,1 | 0,1 |

| Poço | Óleos e graxas | pH, Lab | Sólidos dissolvidos totais lab | Sulfato total | Sulfeto | Turbidez | Coliformes termotolerantes | Coliformes totais | Alumínio Dissolvido | Alumínio Total | Arsênio Total | Bário Total | Boro total | Cádmio Total | Cálcio Dissolvido | Cálcio Total | Chumbo Total | Cobre Dissolvido | Cobre Total | Cromo Total | Estanho Total | Estrôncio Total | Ferro Dissolvido |
|---------------------|----------------|-------------|--------------------------------|---------------|---------|----------|----------------------------|-------------------|---------------------|----------------|---------------|-------------|------------|--------------|-------------------|--------------|--------------|------------------|-------------|-------------|---------------|-----------------|------------------|
| | mg/L | unid. de pH | mg/L | mg/L | mg/L | NTU | NMP/10 OmL | NMP/1 00mL | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L |
| CE001 | 15,000 | 7,9 | 602,0 | 59,8 | 0,5 | 1,190 | 4,0 | 8,0 | 0,117 | 0,138 | 0,000 | 0,068 | 0,070 | 0,001 | 151,10 | 148,50 | 0,005 | 0,004 | 0,005 | 0,040 | 0,300 | 1,011 | 0,030 |
| EP001 | 15,000 | 7,2 | 1724,0 | 47,9 | 0,5 | 0,840 | 2,0 | 1600,0 | 0,100 | 0,118 | 0,000 | 0,232 | 0,070 | 0,001 | 62,10 | 154,60 | 0,005 | 0,004 | 0,007 | 0,040 | 0,300 | 1,732 | 0,030 |
| EP004 | 15,000 | 7,4 | 870,0 | 48,9 | 0,5 | 4,540 | 29,0 | 500,0 | 0,109 | 0,127 | 0,000 | 0,112 | 0,070 | 0,001 | 172,10 | 169,20 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,040 | 0,300 | 0,902 | 0,030 |
| EP006 | 15,000 | 7,1 | 860,0 | 46,0 | 0,5 | 3,130 | 12,0 | 900,0 | 0,152 | 0,100 | 0,000 | 0,096 | 0,070 | 0,001 | 161,20 | 146,00 | 0,005 | 0,006 | 0,005 | 0,040 | 0,300 | 1,085 | 0,030 |
| FS002 | 15,000 | 8,1 | 288,0 | 21,8 | 0,5 | 2,120 | 2,0 | 30,0 | 0,100 | 0,100 | 0,000 | 0,015 | 0,070 | 0,001 | 76,30 | 71,60 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,040 | 0,300 | 0,604 | 0,030 |
| FS003 | 15,000 | 7,2 | 742,0 | 143,0 | 0,5 | 3,610 | 30,0 | 240,0 | 0,106 | 0,153 | 0,000 | 0,101 | 0,070 | 0,001 | 141,30 | 139,30 | 0,005 | 0,004 | 0,013 | 0,040 | 0,300 | 1,544 | 0,030 |
| FS004 | 15,000 | 7,0 | 1872,0 | 511,0 | 0,5 | 3,910 | 9,0 | 1600,0 | 0,196 | 0,232 | 0,000 | 0,023 | 0,070 | 0,001 | 342,00 | 358,00 | 0,005 | 0,010 | 0,011 | 0,040 | 0,300 | 2,406 | 0,168 |
| FS007 | 15,000 | 7,6 | 652,0 | 82,2 | 0,5 | 4,240 | 4,0 | 1600,0 | 0,104 | 0,119 | 0,000 | 0,077 | 0,070 | 0,001 | 164,60 | 163,50 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,040 | 0,300 | 1,315 | 0,030 |
| GM001 | 15,000 | 7,6 | 302,0 | 5,0 | 0,5 | 0,500 | 1600,0 | 1600,0 | 0,100 | 0,100 | 0,000 | 0,054 | 0,070 | 0,001 | 59,10 | 55,30 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,040 | 0,300 | 0,331 | 0,030 |
| JB003 | 15,000 | 8,3 | 388,0 | 7,9 | 0,5 | 0,650 | 2,0 | 2,0 | 0,201 | 0,164 | 0,000 | 0,045 | 0,818 | 0,001 | 7,16 | 5,43 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,040 | 0,300 | 0,312 | 0,040 |
| JB007 | 15,000 | 7,6 | 372,0 | 18,1 | 0,5 | 85,700 | 280,0 | 1600,0 | 0,100 | 0,361 | 0,000 | 0,113 | 0,234 | 0,001 | 54,40 | 54,00 | 0,005 | 0,004 | 0,020 | 0,040 | 0,300 | 0,661 | 0,030 |
| JB008 | 15,000 | 7,5 | 426,0 | 12,3 | 0,5 | 1,160 | 2,0 | 2,0 | 0,100 | 0,100 | 0,000 | 0,140 | 0,070 | 0,001 | 58,60 | 55,40 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,040 | 0,300 | 1,428 | 0,030 |
| JB020 | 15,000 | 7,4 | 678,0 | 75,9 | 0,5 | 0,500 | - | - | 0,100 | 0,100 | 0,000 | 0,097 | 0,101 | 0,001 | 69,70 | 67,50 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,040 | 0,300 | 4,223 | 0,030 |
| JB021 | 15,000 | 7,7 | 514,0 | 13,0 | 0,5 | 1,360 | 22,0 | 1600,0 | 0,100 | 0,100 | 0,000 | 0,051 | 0,087 | 0,001 | 21,20 | 16,30 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,040 | 0,300 | 0,556 | 0,030 |
| MA001 | 15,000 | 7,0 | 730,0 | 20,6 | 0,5 | 0,500 | 2,0 | 2,0 | 0,103 | 0,151 | 0,000 | 0,128 | 0,070 | 0,001 | 122,60 | 116,70 | 0,005 | 0,006 | 0,005 | 0,040 | 0,300 | 0,665 | 0,030 |
| MC002 | 15,000 | 7,5 | 185,0 | 7,2 | 0,5 | 3,870 | 2,0 | 38,0 | 0,100 | 0,100 | 0,000 | 0,014 | 0,070 | 0,001 | 24,00 | 13,27 | 0,005 | 0,004 | 0,011 | 0,040 | 0,300 | 0,597 | 0,097 |
| MC003 | 15,000 | 7,1 | 324,0 | 5,0 | 0,5 | 10,100 | 1600,0 | 1600,0 | 0,100 | 0,100 | 0,000 | 0,123 | 0,070 | 0,001 | 78,70 | 73,80 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,040 | 0,300 | 0,420 | 0,030 |
| MC004 | 15,000 | 7,5 | 220,0 | 5,0 | 0,5 | 0,880 | 2,0 | 17,0 | 0,100 | 0,100 | 0,000 | 0,050 | 0,070 | 0,001 | 63,10 | 60,20 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,040 | 0,300 | 0,165 | 0,030 |
| MC006 | 15,000 | 7,2 | 208,0 | 5,0 | 0,5 | 31,000 | 14,0 | 1600,0 | 0,100 | 0,100 | 0,000 | 0,005 | 0,070 | 0,001 | 30,60 | 28,30 | 0,005 | 0,004 | 0,037 | 0,040 | 0,300 | 0,201 | 0,030 |
| MR001 | 15,000 | 7,5 | 180,0 | 5,0 | 0,5 | 0,960 | 8,0 | 80,0 | 0,100 | 0,100 | 0,000 | 0,044 | 0,070 | 0,001 | 61,60 | 58,40 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,040 | 0,300 | 0,188 | 0,030 |
| MR002 | 15,000 | 7,5 | 220,0 | 5,5 | 0,5 | 1,030 | 70,0 | 110,0 | 0,100 | 0,100 | 0,000 | 0,052 | 0,080 | 0,001 | 47,70 | 44,60 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,040 | 0,300 | 0,826 | 0,030 |
| MTC001 | - | 7,5 | 340,0 | 17,7 | <0,5 | 1,300 | <2 | 4,0 | <0,10 | <0,10 | <0,0003 | 0,021 | <0,07 | <0,0005 | 95,20 | 93,10 | <0,005 | <0,004 | <0,004 | <0,04 | <0,30 | 0,385 | <0,03 |
| MTC002 | 15,000 | 7,7 | 484,0 | 7,2 | 0,5 | 1,820 | 8,0 | 300,0 | 0,100 | 0,100 | 0,000 | 0,314 | 0,771 | 0,001 | 12,38 | 11,00 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,040 | 0,300 | 1,274 | 0,034 |
| MTC006 | 15,000 | 7,0 | 574,0 | 24,3 | 0,5 | 1,040 | 350,0 | 2300,0 | 0,111 | 0,118 | 0,000 | 0,048 | 0,070 | 0,001 | 157,10 | 152,70 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,040 | 0,300 | 0,780 | 0,030 |
| MZ005 | 15,000 | 7,7 | 248,0 | 5,6 | 0,5 | 16,100 | 2,0 | 130,0 | 0,100 | 0,158 | 0,000 | 0,026 | 0,070 | 0,001 | 74,10 | 71,80 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,040 | 0,300 | 0,190 | 0,030 |
| PP001 | 15,000 | 7,4 | 1002,0 | 16,5 | 0,5 | 0,500 | 1600,0 | 1600,0 | 0,133 | 0,120 | 0,000 | 1,106 | 0,070 | 0,001 | 135,40 | 134,00 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,040 | 0,300 | 5,430 | 0,030 |
| PP002 | 15,000 | 7,5 | 476,0 | 47,8 | 0,5 | 0,500 | 2,0 | 8,0 | 0,100 | 0,100 | 0,000 | 0,060 | 0,070 | 0,001 | 61,90 | 59,50 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,040 | 0,300 | 0,590 | 0,030 |
| PP004 | 15,000 | 7,0 | 572,0 | 14,9 | 0,5 | 0,500 | 2,0 | 2,0 | 0,100 | 0,149 | 0,000 | 0,161 | 0,070 | 0,001 | 105,70 | 107,00 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,040 | 0,300 | 0,198 | 0,030 |
| RM001 | 15,000 | 7,7 | 313,0 | 7,4 | 0,5 | 0,500 | 23,0 | 23,0 | 0,100 | 0,100 | 0,000 | 0,134 | 0,070 | 0,001 | 53,60 | 52,50 | 0,005 | 0,005 | 0,004 | 0,040 | 0,300 | 0,039 | 0,030 |
| SP001 | 15,000 | 7,1 | 486,0 | 7,0 | 0,5 | 0,520 | 11,0 | 1600,0 | 0,100 | 0,100 | 0,000 | 0,021 | 0,070 | 0,001 | 124,50 | 130,50 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,040 | 0,300 | 0,557 | 0,030 |
| SP002 | 15,000 | 7,8 | 714,0 | 30,9 | 0,5 | 0,640 | 2,0 | 240,0 | 0,100 | 0,100 | 0,000 | 0,115 | 0,070 | 0,001 | 63,60 | 146,90 | 0,005 | 0,004 | 0,005 | 0,040 | 0,300 | 1,876 | 0,030 |
| SP003 | 15,000 | 7,6 | 298,0 | 5,0 | 0,5 | 1,130 | 10,0 | 300,0 | 0,100 | 0,100 | 0,000 | 0,029 | 0,070 | 0,001 | 91,80 | 94,60 | 0,005 | 0,004 | 0,006 | 0,040 | 0,300 | 0,300 | 0,046 |
| VD001 | - | 7,1 | 412,0 | 15,7 | <0,5 | <0,50 | 4,0 | 4,0 | <0,10 | <0,10 | <0,0003 | 0,030 | <0,07 | <0,0005 | 111,50 | 108,00 | <0,005 | <0,004 | <0,004 | <0,04 | <0,30 | 0,558 | <0,03 |
| VD003 | 15,000 | 6,8 | 1548,0 | 101,0 | 0,5 | 0,610 | 2,0 | 130,0 | 0,166 | 0,100 | 0,000 | 0,067 | 0,070 | 0,001 | 303,00 | 301,00 | 0,005 | 0,007 | 0,004 | 0,040 | 0,300 | 1,460 | 0,030 |
| VD013 | 15,000 | 8,2 | 402,0 | 21,3 | 0,5 | 0,610 | 4,0 | 500,0 | 0,100 | 0,100 | 0,000 | 0,038 | 0,227 | 0,001 | 66,90 | 70,80 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,040 | 0,300 | 0,409 | 0,030 |
| VD020 | 15,000 | 7,8 | 790,0 | 14,4 | 0,5 | 0,630 | 2,0 | 4,0 | 0,103 | 0,100 | 0,000 | 0,038 | 0,070 | 0,001 | 145,40 | 153,40 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,040 | 0,300 | 1,322 | 0,030 |
| VD021 | - | 7,6 | 343,0 | <5,0 | <0,5 | 60,700 | 11,0 | >1600 | <0,10 | 0,172 | <0,0003 | 0,216 | <0,07 | <0,0005 | 53,30 | 51,00 | <0,005 | <0,004 | <0,004 | <0,04 | <0,30 | 0,539 | 0,050 |
| VD022 | 15,000 | 7,4 | 642,0 | 22,0 | 0,5 | 0,600 | 80,0 | >1600 | 0,113 | 0,214 | 0,000 | 0,031 | 0,070 | 0,001 | 172,10 | 165,60 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,040 | 0,300 | 0,918 | 0,030 |
| VZ001 | 15,000 | 7,4 | 366,0 | 10,4 | 0,5 | 0,790 | 2,0 | 900,0 | 0,100 | 0,100 | 0,000 | 0,204 | 0,191 | 0,001 | 96,20 | 87,40 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,040 | 0,300 | 0,397 | 0,030 |
| VZ006 | - | 7,2 | 444,0 | 20,8 | <0,5 | 3,450 | <2 | <2 | <0,10 | <0,10 | <0,0003 | 0,045 | <0,07 | <0,0005 | 111,10 | 114,00 | <0,005 | <0,004 | <0,004 | <0,04 | <0,30 | 1,004 | <0,03 |
| Limites de detecção | 15,0 | 0,1 | | 5,0 | 0,5 | 0,5 | 2,0 | 2,0 | 0,1 | 0,1 | 0,0003 | 0,005 | 0,07 | 0,0005 | 1,00 | 1,00 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,040 | 0,3 | 0,005 | 0,03 |

| Poço | Ferro Total | Lítio Total | Magnésio Dissolvido | Magnésio Total | Manganês Dissolvido | Manganês Total | Mercurio Total | Molibdênio Total | Níquel Total | Potássio Dissolvido | Potássio Total | Selênio Total | Silício Dissolvido | Sódio Dissolvido | Sódio Total | Vanádio Total | Zinco Total |
|---------------------|-------------|-------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|----------------|------------------|--------------|---------------------|----------------|---------------|--------------------|------------------|-------------|---------------|-------------|
| | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L | µg/L | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L |
| CE001 | 0,135 | 0,008 | 14,280 | 14,040 | 0,014 | 0,003 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 1,562 | 1,552 | 0,001 | 11,460 | 20,100 | 20,100 | 0,01 | 0,094 |
| EP001 | 0,030 | 0,041 | 1,624 | 50,700 | 0,003 | 0,007 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 1,128 | 22,600 | 0,003 | 6,800 | 0,873 | 226,000 | 0,01 | 0,062 |
| EP004 | 0,820 | 0,031 | 25,100 | 24,100 | 0,008 | 0,005 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 5,630 | 5,380 | 0,001 | 15,250 | 49,800 | 47,900 | 0,01 | 0,067 |
| EP006 | 0,450 | 0,022 | 56,500 | 26,800 | 0,005 | 0,268 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 23,600 | 6,410 | 0,001 | 30,410 | 228,000 | 47,500 | 0,01 | 0,530 |
| FS002 | 0,142 | 0,009 | 8,650 | 8,080 | 0,003 | 0,003 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 1,940 | 1,862 | 0,001 | 15,050 | 14,100 | 13,290 | 0,01 | 0,192 |
| FS003 | 0,496 | 0,005 | 21,500 | 21,200 | 0,716 | 0,734 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 1,516 | 1,431 | 0,001 | 10,650 | 111,100 | 109,200 | 0,01 | 0,060 |
| FS004 | 0,186 | 0,075 | 55,900 | 55,800 | 0,046 | 0,041 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 3,750 | 3,440 | 0,011 | 14,180 | 73,700 | 94,800 | 0,01 | 0,226 |
| FS007 | 0,677 | 0,010 | 15,510 | 15,260 | 0,011 | 0,014 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 2,230 | 2,270 | 0,001 | 10,980 | 22,000 | 21,900 | 0,01 | 0,183 |
| GM001 | 0,030 | 0,031 | 15,560 | 14,640 | 0,004 | 0,018 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 1,940 | 1,614 | 0,001 | 14,770 | 30,000 | 28,800 | 0,01 | 0,056 |
| JB003 | 0,036 | 0,282 | 3,070 | 2,230 | 0,011 | 0,008 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 3,020 | 2,650 | 0,001 | 7,250 | 120,000 | 120,900 | 0,01 | 0,020 |
| JB007 | 3,678 | 0,064 | 14,040 | 11,080 | 0,003 | 0,060 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 1,436 | 1,289 | 0,001 | 12,640 | 61,800 | 63,000 | 0,01 | 0,039 |
| JB008 | 0,124 | 0,058 | 18,770 | 14,900 | 0,048 | 0,039 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 1,755 | 1,313 | 0,001 | 11,430 | 68,800 | 69,000 | 0,01 | 0,067 |
| JB020 | 0,030 | 0,043 | 26,400 | 21,500 | 0,060 | 0,052 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 1,817 | 1,461 | 0,001 | 10,550 | 131,800 | 131,800 | 0,01 | 0,095 |
| JB021 | 0,037 | 0,028 | 4,180 | 3,550 | 0,003 | 0,013 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 1,234 | 0,916 | 0,001 | 8,200 | 114,900 | 116,900 | 0,01 | 0,020 |
| MA001 | 0,093 | 0,005 | 37,300 | 35,800 | 0,012 | 0,004 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 6,070 | 5,710 | 0,001 | 21,370 | 67,600 | 65,400 | 0,01 | 0,049 |
| MC002 | 0,656 | 0,032 | 4,220 | 2,223 | 0,011 | 0,011 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 1,411 | 1,055 | 0,001 | 10,230 | 51,700 | 60,400 | 0,01 | 0,033 |
| MC003 | 0,030 | 0,011 | 12,920 | 11,950 | 0,009 | 0,004 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 2,480 | 2,390 | 0,001 | 13,800 | 10,430 | 9,130 | 0,01 | 0,036 |
| MC004 | 0,084 | 0,005 | 4,070 | 3,700 | 0,019 | 0,005 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 1,742 | 1,677 | 0,002 | 7,970 | 5,090 | 3,220 | 0,01 | 0,034 |
| MC006 | 5,950 | 0,006 | 6,290 | 6,110 | 0,006 | 0,008 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 1,185 | 1,125 | 0,001 | 19,260 | 11,930 | 11,260 | 0,01 | 0,062 |
| MR001 | 0,085 | 0,005 | 1,655 | 1,518 | 0,003 | 0,003 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 1,094 | 1,092 | 0,001 | 6,690 | 1,185 | 0,733 | 0,01 | 0,040 |
| MR002 | 0,056 | 0,015 | 4,740 | 4,310 | 0,015 | 0,018 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 2,210 | 2,080 | 0,003 | 8,540 | 16,860 | 15,720 | 0,02 | 0,030 |
| MTC001 | <0,03 | 0,007 | 6,470 | 5,390 | 0,010 | <0,003 | <0,20 | <0,20 | <0,004 | 1,560 | 1,592 | <0,0005 | 6,130 | 7,640 | 5,970 | - | 0,062 |
| MTC002 | 0,192 | 0,206 | 5,830 | 4,660 | 0,004 | 0,003 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 2,170 | 1,770 | 0,001 | 7,270 | 154,300 | 157,500 | 0,01 | 0,025 |
| MTC006 | 0,030 | 0,007 | 4,800 | 3,680 | 0,005 | 0,003 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 1,116 | 0,765 | 0,001 | 7,810 | 13,780 | 9,610 | 0,01 | 0,077 |
| MZ005 | 2,765 | 0,005 | 2,890 | 2,780 | 0,034 | 0,058 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 0,689 | 0,727 | 0,001 | 6,400 | 2,530 | 2,380 | 0,01 | 0,036 |
| PP001 | 0,961 | 0,024 | 27,300 | 26,700 | 0,180 | 0,193 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 19,700 | 19,420 | 0,001 | 28,830 | 119,700 | 119,200 | 0,01 | 0,060 |
| PP002 | 0,030 | 0,031 | 21,700 | 21,100 | 0,003 | 0,003 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 8,260 | 7,930 | 0,001 | 11,180 | 99,200 | 96,800 | 0,01 | 0,044 |
| PP004 | 0,030 | 0,013 | 38,100 | 38,100 | 0,031 | 0,033 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 3,680 | 3,480 | 0,001 | 11,880 | 35,000 | 32,900 | 0,01 | 0,047 |
| RM001 | 0,030 | 0,005 | 30,100 | 29,300 | 0,005 | 0,003 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 2,770 | 2,750 | 0,001 | 10,580 | 7,100 | 6,800 | 0,01 | 0,046 |
| SP001 | 0,030 | 0,022 | 11,260 | 10,030 | 0,008 | 0,006 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 1,165 | 0,905 | 0,001 | 8,240 | 7,860 | 9,150 | 0,01 | 0,044 |
| SP002 | 0,065 | 0,030 | 1,785 | 15,910 | 0,003 | 0,025 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 0,587 | 1,343 | 0,001 | 6,210 | 2,352 | 39,640 | 0,01 | 0,064 |
| SP003 | 0,094 | 0,019 | 4,810 | 1,793 | 0,009 | 0,003 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 1,491 | 0,940 | 0,001 | 10,930 | 3,331 | 3,440 | 0,01 | 0,036 |
| VD001 | <0,03 | 0,010 | 9,170 | 8,820 | <0,003 | <0,003 | <0,20 | <0,20 | <0,004 | 2,320 | 2,330 | <0,0005 | 8,660 | 11,300 | 10,670 | - | 0,087 |
| VD003 | 0,030 | 0,054 | 48,800 | 21,100 | 0,035 | 0,016 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 2,460 | 1,910 | 0,001 | 11,590 | 99,900 | 114,400 | 0,01 | 0,076 |
| VD013 | 0,030 | 0,068 | 8,660 | 6,770 | 0,004 | 0,003 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 2,330 | 2,040 | 0,001 | 18,040 | 45,460 | 44,030 | 0,01 | 0,032 |
| VD020 | 0,030 | 0,082 | 27,000 | 11,370 | 0,013 | 0,006 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 2,860 | 2,450 | 0,001 | 15,570 | 71,700 | 87,200 | 0,01 | 0,072 |
| VD021 | 9,730 | 0,015 | 11,440 | 11,640 | 0,214 | 0,279 | <0,20 | <0,20 | <0,004 | 17,250 | 17,603 | <0,0005 | 2,150 | 15,610 | 15,660 | - | 0,090 |
| VD022 | 0,030 | 0,005 | 6,100 | 4,240 | 0,003 | 0,003 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 3,910 | 3,630 | 0,001 | 13,230 | 11,960 | 10,510 | 0,01 | 0,080 |
| VZ001 | 0,030 | 0,062 | 5,010 | 2,240 | 0,003 | 0,003 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 4,010 | 3,720 | 0,001 | 11,110 | 30,080 | 28,640 | 0,01 | 0,033 |
| VZ006 | 0,254 | 0,019 | 7,900 | 8,170 | 0,023 | 0,024 | <0,20 | <0,20 | <0,004 | 1,920 | 1,980 | <0,0005 | 9,120 | 13,180 | 13,840 | - | 0,166 |
| Limites de detecção | 0,03 | 0,005 | 0,1 | 0,1 | 0,003 | 0,003 | 0,20 | 0,20 | 0,004 | 0,1 | 0,1 | 0,001 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,01 | 0,02 |