

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

ASPECTOS HIDRODINÂMICOS E
QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS
NAS SUB-BACIAS DO RIO VERDE GRANDE,
JEQUITAÍ E PACUÍ – MG

Maria do Carmo Fonte Boa Souza

Belo Horizonte

2013

**ASPECTOS HIDRODINÂMICOS E AVALIAÇÃO DA
QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NAS
SUB-BACIAS DO RIO VERDE GRANDE,
JEQUITAÍ E PACUÍ – MG**

Maria do Carmo Fonte Boa Souza

Maria do Carmo Fonte Boa Souza

**ASPECTOS HIDRODINÂMICOS E AVALIAÇÃO DA
QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NAS
SUB-BACIAS DO RIO VERDE GRANDE,
JEQUITAÍ E PACUÍ – MG**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Meio Ambiente

Linha de pesquisa: Caracterização, prevenção e controle da poluição

Orientador: Sílvia Maria Alves Corrêa Oliveira

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2013

Página com as assinaturas dos membros da banca examinadora, fornecida pelo Colegiado do Programa

AGRADECIMENTOS

Com muito carinho, quero agradecer a todas as pessoas que com seu amor, vivência ou conhecimento me ajudaram a concretizar este projeto. Em especial, agradeço:

Aos meus amados pais, Theresa e Rafael, por terem me apoiado e ajudado sempre, pelo esforço na minha formação, pelo exemplo, pela dedicação e amor incondicionais. Ao meu filho César, que enche de alegria a minha vida, motivador da minha busca por aperfeiçoamento profissional. À minha sobrinha Clarissa, à Rosana e ao Gilberto pelo entusiasmo demonstrado diante dos meus sonhos.

Aos colegas de trabalho e amigos Ilmar Bastos Santos (*in memoriam*), Miriam Regina Cardoso de Oliveira, Maricene Menezes de Oliveira Mattos Paixão e Maria Goretti Hausmann pela ajuda, incentivo, paciência e ensinamentos. Às amigas Mara Lúcia Nascimento e Marleize Barbosa pelo carinho e apoio, sempre.

À minha professora orientadora Sílvia Maria Alves Corrêa Oliveira pelo estímulo, dedicação e ensinamentos, fundamentais ao desenvolvimento deste projeto, e pela segurança e disponibilidade na condução da pesquisa.

Ao professor Celso de Oliveira Loureiro, exemplo de humanidade e sabedoria, pelo privilégio do seu convívio, pelo profissionalismo e pelos ensinamentos que levarei por toda a vida. Ao professor Eduardo Delano pelo incentivo em tão boa hora.

Aos colegas Ana Laura Cerqueira Trindade e João Pedro Ribeiro pela ajuda, disposição e boa vontade. À Olívia, pelas trocas de experiências e sábios conselhos. Ao Guilherme e à Nádia Antônia pelo apoio referente aos mapas. À secretária Iara, pelo pronto atendimento e amizade.

À CPRM- Regional MG e à COPASA pelo apoio técnico dado por seus funcionários Sandra Fernandes da Silva e Fernando Alves Carneiro. À Codevasf pelo apoio financeiro ao projeto de monitoramento das águas no norte do Estado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais pela oportunidade. Ao IGAM pela parceria neste projeto.

RESUMO

A escassez de água em regiões semiáridas torna os recursos hídricos subterrâneos uma importante alternativa de abastecimento, particularmente quando a demanda por este recurso hídrico é elevada. Nestes casos, o uso das águas subterrâneas pode viabilizar a implantação de planos regionais de desenvolvimento econômico. Exemplo disso é o sistema aquífero Bambuí, na região do médio rio São Francisco, em Minas Gerais, que apresenta relativa limitação de disponibilidade de águas superficiais e subterrâneas, associada a pressões crescentes. O objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade das águas subterrâneas deste sistema na UPGRH SF10 – sub-bacia do rio Verde Grande – e UPGRH SF6 – sub-bacia dos rios Jequitaiá e Pacuí, com ênfase nos possíveis usos destas águas, bem como estimar alguns aspectos hidrodinâmicos. Foram utilizados dados secundários do monitoramento executado pelo IGAM, no período entre 2005 e 2011 e em 60 poços profundos, em média, na região, tendo sido selecionados resultados de 22 parâmetros físico-químicos, os quais foram empregados na avaliação da qualidade das águas, incluindo sua adequação para diferentes usos. Em relação ao total de poços monitorados, no período, as águas subterrâneas na região estudada podem ser consideradas inadequadas para fins de consumo humano em 87% dos poços, sendo que 64% apresentaram águas inadequadas por aspectos organolépticos, exclusivamente. Para outros usos: 75% de amostras de água de poços foram inadequadas para recreação, 32% para irrigação e 23% para fins de irrigação.

O valor do gradiente hidráulico médio é de 0,34 e o escoamento subterrâneo é, em grande parte, no sentido do fluxo predominante, ou seja, SW-NE, embora haja fluxos também nos sentidos dos vales dos rios Verde Grande e Jequitaiá, acompanhando o relevo da região. Os parâmetros físico-químicos das amostras de água apresentaram elevada variabilidade, a exemplo da CE que variou entre 10 e 8.774 $\mu\text{S}/\text{cm}$, variabilidade esta característica dos ambientes cársticos e cársticos-fissurados que prevalecem na região de estudo. As águas têm, em sua maioria, caráter neutro a levemente alcalino, são muito duras e com salinidade tolerável ($\text{CE} < 1.500 \mu\text{S}/\text{cm}$). A relação entre os principais íons que predomina é a seguinte: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$. Há variações hidroquímicas espaciais significativas nas águas subterrâneas, observada por meio da análise de cluster – técnica estatística multivariada, associada aos resultados dos testes de Kruskal-Wallis e de comparações múltiplas, para 18 parâmetros físico-químicos. Alguns parâmetros aumentam no decorrer do fluxo subterrâneo, outros tiveram ocorrência localizada atribuída a aspectos geológicos.

ABSTRACT

Water shortage in semiarid regions makes groundwater an important alternative supply, particularly when demand for this water resource is high. In these cases, the use of groundwater may enable the implementation of regional plans for economic development. One example is the Bambuí aquifer system in the region São Francisco average river, in Minas Gerais, which presents limitations on the availability of surface and groundwater, associated with an increasing demand. The main objective of this study is to evaluate the quality of groundwater in Bambuí aquifer in UPGRH SF10 - sub-basin of the Verde Grande river and UPGRH SF6 - sub-basin of the Jequitáí and Pacuí rivers, with emphasis on the possible uses of these waters, and estimate some hydrodynamic aspects. The research used secondary data from the monitoring executed by IGAM in the period between 2005 and 2011 and by 60 deep wells on average in the region, having been selected results of 22 physical-chemical parameters, which were used in the assessment of water quality including their suitability for different uses. In relation to total wells monitored in the period, the groundwater in the study area can be considered unsuitable for human consumption in 87% of the wells, of which 64% had inadequate water only in function of organoleptic aspects. For other uses were as follows: 75% of wells showed water samples unsuitable for recreation, 32% for irrigation purposes and 23% for watering purposes, and in all cases for at least one sampling during monitoring. The average value of the hydraulic gradient is 0.34 and the groundwater flow is for the most part, in the flow direction dominant, i.e. SW-NE, although there are also flows in the directions of the valleys of the Verde Grande river and Jequitáí river, accompanying the topography of the region. The physic-chemical parameters of the water samples showed high variability, such as the EC ranged between 10 and 8774 $\mu\text{S}/\text{cm}$. This variability is characteristic of karst environments and karst-fissured prevailing in the study region. In the study area, the waters have mostly neutral to slightly alkaline character, have high hardness and are classified as water with tolerable levels of salinity ($\text{EC} < 1500 \mu\text{S}/\text{cm}$). The relationship between the primary ions is as follows: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$. There are significant spatial variations in hydrochemical groundwater, observed by cluster analysis - multivariate statistical technique, associated with results of the *Kruskal-Wallis* Tests and Multiple Comparisons Tests to 18 physicochemical parameters. Some parameters increase during the underground flow, others have attributed the occurrence of localized geological features.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	X
LISTA DE QUADROS	XI
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	XII
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 OBJETIVO GERAL	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	4
3.1 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO	4
3.1.1 <i>Municípios e população</i>	4
3.1.2 <i>Aspectos hidrológicos</i>	7
3.1.3 <i>Aspectos Fisiográficos</i>	12
3.2 HIDROGEOQUÍMICA DOS AQUÍFEROS.....	20
3.2.1 <i>Qualidade das águas subterrâneas</i>	22
3.3 TRATAMENTO DE DADOS DE MONITORAMENTO DE QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	28
3.3.1 <i>Análises geoespaciais</i>	29
3.3.2 <i>Estatísticas multivariadas</i>	33
3.3.3 <i>Análise da qualidade das águas subterrâneas na região de estudo</i>	41
4 METODOLOGIA.....	43
4.1 ORGANIZAÇÃO E CONSOLIDAÇÃO DO BANCO DE DADOS E DESCRIÇÃO DO MONITORAMENTO EXECUTADO PELO IGAM	43
4.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS DE MONITORAMENTO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA ÁREA DE ESTUDO.....	47
4.2.1 <i>Estatística descritiva</i>	47
4.2.2 <i>Análise de Cluster</i>	48
4.2.3 <i>Análise Fatorial</i>	48
4.2.4 <i>Testes não-paramétricos</i>	48
4.3 VERIFICAÇÃO DO ATENDIMENTO DOS RESULTADOS FÍSICO-QUÍMICOS AOS PADRÕES AMBIENTAIS LEGAIS E RECOMENDADOS	49
4.4 AVALIAÇÃO DO AQUÍFERO BAMBUÍ NA ÁREA DE ESTUDO	50
4.4.1 <i>Classificação hidroquímica das águas subterrâneas</i>	50
4.4.2 <i>Determinação dos fluxos subterrâneos na área de estudo e do gradiente hidráulico médio</i>	50
4.4.3 <i>Estimativas das variações espaciais para as concentrações dos principais parâmetros físico-químicos</i>	51
4.4.4 <i>Resumo dos poços de monitoramento utilizados em cada etapa metodológica</i>	52
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
5.1 ORGANIZAÇÃO E CONSOLIDAÇÃO DO BANCO DE DADOS E DESCRIÇÃO DO MONITORAMENTO EXECUTADO PELO IGAM	55
5.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DE CONCENTRAÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA ÁREA DE ESTUDO	57
5.2.1 <i>Estatística descritiva</i>	57

5.2.2	<i>Análise de Cluster</i>	60
5.2.3	<i>Análise Fatorial</i>	64
5.2.4	<i>Testes Não-Paramétricos</i>	67
5.3	VERIFICAÇÃO DO ATENDIMENTO DOS RESULTADOS FÍSICO-QUÍMICOS DO MONITORAMENTO AOS PADRÕES AMBIENTAIS LEGAIS E RECOMENDADOS	82
5.3.1	<i>Padrões legais</i>	82
5.3.2	<i>Padrões recomendados para uso das águas na irrigação</i>	102
5.4	ASPECTOS GERAIS DO AQUÍFERO BAMBUÍ NA ÁREA DE ESTUDO	104
5.4.1	<i>Classificação hidroquímica das águas subterrâneas</i>	104
5.4.2	<i>Determinação dos fluxos subterrâneos na área de estudo e do gradiente hidráulico médio</i>	107
6	RECOMENDAÇÕES	133
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Mapa de localização em Minas Gerais das sub-bacias dos rios Jequitai e Pacuí – UPGRH SF6 (em amarelo) e do rio Verde Grande – UPGRH SF10 (em vermelho).....	4
FIGURA 2: Avaliação oferta/demanda do abastecimento de água potável em Minas Gerais – (abastecimento satisfatório ou insatisfatório e requisitos – projeção para 2015), com destaque para os municípios da área de estudo.	8
FIGURA 3: Distribuição espacial de poços cadastrados no Siagas, com destaque – em vermelho – para os poços concentrados na área de estudo.	9
FIGURA 4: Mapa de localização com as principais sedes municipais e cursos de água da UPGRH SF6 – Sub-bacia dos rios Jequitai e Pacuí.	15
FIGURA 5: Mapa de localização com as principais sedes municipais e cursos de água da Sub-bacia do rio Verde Grande.	16
FIGURA 6: Localização dos pontos de monitoramento das águas subterrâneas na área de estudo – distribuição espacial nas três fases do monitoramento.....	56
FIGURA 7: Dendograma da Análise de Cluster para os poços das UPGRH SF6 e UPGRH SF10 – Sub-bacias dos rios Jequitai e Pacuí e do rio Verde Grande – resultados de 22 parâmetros em amostras de água de 60 poços da fase III (2010-2011), incluídos os resultados das fases anteriores dos poços mantidos na fase III (21 poços).....	60
FIGURA 8: Agrupamentos dos poços de monitoramento distribuídos na área de estudo – UPGRH SF6 e UPGRH SF10, bem como os poços que se mantiveram isolados, pelo critério de semelhança hidroquímica apontada pela Análise de Cluster.	62
FIGURA 9: Dendograma da Análise de Cluster para a UPGRH SF6 – sub-bacia dos rios Jequitai-Pacuí – resultados de 22 parâmetros em amostras de água de 19 poços da fase 3 (2010 e 2011), incluídos os resultados das fases anteriores dos poços mantidos na fase 3 (7 poços).....	63
FIGURA 10: Dendograma da Análise de Cluster para a UPGRH SF10 – sub-bacia do rio Verde Grande – resultados de 22 parâmetros em amostras de água de 40 poços da fase 3 (2010 e 2011), incluídos os resultados das fases anteriores dos poços mantidos na fase 3 (14 poços).....	64
FIGURA 11: Localização do poço de monitoramento FD001, na sub-bacia dos rios Jequitai e Pacuí – UPGRH SF6, que se manteve isolado na AC, e os gráficos box-plot para os parâmetros pH, alcalinidade de bicarbonato e fósforo total, na mesma sub-bacia.	68
FIGURA 12: Localização do poço de monitoramento PP001, na sub-bacia do rio Verde Grande – UPGRH SF10, que se manteve isolado na AC, e os gráficos box-plot para os parâmetros bário total e potássio dissolvido, na mesma sub-bacia.	69
FIGURA 13: Localização do poço de monitoramento EP001, na sub-bacia do rio Verde Grande – UPGRH SF10, que se manteve isolado na AC, e os gráficos box-plot para os parâmetros nitrato, cloretos totais e sódio total, na mesma sub-bacia.....	70
FIGURA 14: Localização do poço de monitoramento VD021, na sub-bacia do rio Verde Grande – UPGRH SF10, que se manteve isolado na AC, e os gráficos box-plot para os parâmetros magnésio dissolvido e cloreto total, na mesma sub-bacia.	71
FIGURA 15: Localização dos poços de monitoramento JB007 e JB003, na área sub-bacia do rio Verde Grande – UPGRH SF10, com concentrações significativamente diferentes, mostradas nos gráficos box-plot, para os parâmetros turbidez e fluoreto, respectivamente.....	72
FIGURA 16: Gráficos <i>box-whisker</i> para manganês total: (a) UPGRH SF6 e (b) UPGRH SF10; com respectivos p-valores dos testes de <i>Kruskal-Wallis</i>	74
FIGURA 17: Gráficos <i>box-whisker</i> para alcalinidade de bicarbonato: (a) UPGRH SF6 e (b) UPGRH SF10; com respectivos p-valores dos testes de <i>Kruskal-Wallis</i>	75

FIGURA 18: Gráficos <i>box-whisker</i> para fluoreto: (a) UPGRH SF6 e (b) UPGRH SF10; com respectivos p-valores dos testes de <i>Kruskal-Wallis</i>	76
FIGURA 19: Gráficos de medianas dos resultados significativos do teste de Mann-Whitney, nos períodos secos e chuvosos, para os poços monitorados (configuração da rede na Fase III) - UPGRH SF6.	78
FIGURA 20: Gráficos de medianas dos resultados do teste de Mann-Whitney, nos períodos secos e chuvosos, para os poços monitorados (configuração da rede na Fase III) - UPGRH SF6 (b) na UPGRH SF10.	80
FIGURA 21: Gráfico de barras mostrando a frequência de violações a limites legais (Portaria MS nº 2914/2011 e Resolução Conama nº 396/2008) para consumo humano exclusivamente, por parâmetro físico-químico associado à violação, nas UPGRH SF6 e SF10, para o período 2010-2011.....	84
FIGURA 22: Percentuais relativos de violação de padrões legais relacionados a consumo humano e com risco à saúde – número de violações de cada parâmetro em relação ao número total de violações do grupo de parâmetros especificados, em um dado poço.	88
FIGURA 23: Percentuais relativos de violação de padrões legais relacionados a consumo humano e com caráter organoléptico – número de violações de cada parâmetro em relação ao número total de violações do grupo de parâmetros especificados, em um dado poço.	91
FIGURA 24: Percentuais relativos de violação de padrões legais relacionados à dessedentação animal – número de violações de cada parâmetro em relação ao número total de violações do grupo de parâmetros especificados, em um dado poço.	93
FIGURA 25: Percentuais relativos de violação de padrões legais relacionados à irrigação – número de violações de cada parâmetro em relação ao número total de violações do grupo de parâmetros especificados, em um dado poço.	95
FIGURA 26: Percentuais relativos de violação de padrões legais relacionados à recreação – número de violações de cada parâmetro em relação ao número total de violações do grupo de parâmetros especificados, em um dado poço.	97
FIGURA 27: Gráficos de série temporal para os valores medidos de concentração de chumbo – mg/L – em alguns poços comuns entre diferentes fases do monitoramento, selecionados: (a) BC001, SP001, LP001, SL001 (comuns entre fases 1 e 3); e (b) JB003, VD014, VZ001 e VD001 (comuns entre fases 2 e 3).....	101
FIGURA 28: Diagrama de Wilcox – medianas das concentrações da RAS e da CE – 127 poços monitorados no período de 2005 a 2011 (escala semilogaritmica).	103
FIGURA 29: Diagrama trilinear de Piper para as medianas das concentrações iônicas nos 127 poços monitorados no período de 2005 a 2011.	106
FIGURA 30: Mapa das cotas dos níveis estáticos em 33 poços medidos em períodos chuvosos (campanhas de 2010 a 2012) – por interpolação simples triangular – as setas indicam os prováveis fluxos regionais em função de gradientes hidráulicos localizados.....	108
FIGURA 31: Evolução dos resultados (medianas) dos íons principais monitoradas em seis seções hidroquímicas sequenciais ao longo do fluxo predominante das águas subterrâneas na área de estudo para (a) ânions e (b) cátions.	111
FIGURA 32: Plumas de isotores da alcalinidade de bicarbonato (mg/L): (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos.	112
FIGURA 33: Plumas de isotores do cloreto total (mg/L): (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos.	113
FIGURA 34: Plumas de isotores do sulfato total (mg/L): (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos.	113

FIGURA 35: Plumas de isóteores do cálcio dissolvido (mg/L): (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos.	114
FIGURA 36: Plumas de isóteores do sódio total (mg/L): (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos.	114
FIGURA 37: Plumas de isóteores do magnésio dissolvido (mg/L): (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos.	115
FIGURA 38: Plumas de isóteores do chumbo total: (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos (mg/L); e (c) evolução dos resultados (medianas) dos parâmetros físico-químicos monitorados em seções hidroquímicas sequenciais ao longo do fluxo predominante das águas subterrâneas na área de estudo (mmol/L).	117
FIGURA 39: Plumas de isóteores de fenóis: (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos (mg/L); e (c) evolução dos resultados (medianas) dos parâmetros físico-químicos monitorados em seções hidroquímicas sequenciais ao longo do fluxo predominante das águas subterrâneas na área de estudo (mmol/L).	118
FIGURA 40: Plumas de isóteores do cobre total: (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos (mg/L); e (c) evolução dos resultados (medianas) dos parâmetros físico-químicos monitorados em seções hidroquímicas sequenciais ao longo do fluxo predominante das águas subterrâneas na área de estudo (mmol/L).	120
FIGURA 41: Plumas de isóteores do alumínio total: (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos (mg/L); e (c) evolução dos resultados (medianas) dos parâmetros físico-químicos monitorados em seções hidroquímicas sequenciais ao longo do fluxo predominante das águas subterrâneas na área de estudo (mmol/L).	121
FIGURA 42: Plumas de isóteores do zinco total: (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos (mg/L); e (c) evolução dos resultados (medianas) dos parâmetros físico-químicos monitorados em seções hidroquímicas sequenciais ao longo do fluxo predominante das águas subterrâneas na área de estudo (mmol/L).	122

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Resumo das principais características das três fases do monitoramento executado pelo IGAM nas águas subterrâneas da área de estudo (Projeto CODEVASF).	44
TABELA 2: Resumo com a identificação dos poços cujos resultados foram utilizados para cada etapa da metodologia.	54
TABELA 3 – Resumo da estatística descritiva para a composição das águas subterrâneas na área de estudo - 22 parâmetros selecionados.	58
TABELA 4: Resumo da AF com os respectivos fatores para as águas da UPGRH SF6 – baseada em 22 parâmetros selecionados e 19 poços – configuração da fase III da rede de monitoramento – destaque para os parâmetros que foram mostrados pela técnica apenas para a UPGRH SF6 (em negrito e azul).	65
TABELA 5: Resumo da AF com os respectivos fatores para as águas da UPGRH SF10 – baseada em 22 parâmetros selecionados e 41 poços – configuração da fase III da rede de monitoramento – destaque para os parâmetros que foram mostrados pela técnica apenas para a UPGRH SF10 (em negrito e azul).	65
TABELA 6 – Resultados do teste U de Mann-Whitney aplicados para as UPGRH SF6 e SF10, para os 22 parâmetros selecionados e para os poços da configuração da Fase III, agrupados por período – seco ou chuvoso (resultados destacados são significativamente diferentes ao nível de significância de 0,05, ou seja, p-valor < 0,05).	81
TABELA 7: Resumo do percentual de violações dos padrões legais (Portaria MS nº 2914/2011 e Resolução Conama nº 396/2008), em relação ao número total de medições e de poços – para as medições de 127 poços no período de monitoramento compreendido entre 2005 e 2011.	83
TABELA 8: Percentual de violação dos padrões legais (Portaria MS nº 2914/2011 e Resolução Conama nº 396/2008), em relação ao número total de medições por poços e por tipo de uso – para a fase III do monitoramento compreendida entre 2010 e 2011.	86
TABELA 9: Limites legais, valores máximos observados no conjunto de dados, poços correspondentes aos valores máximos observados e relação entre o máximo observado e o limite legal, por parâmetro (127 poços, três fases do monitoramento).	98

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Municípios que compõem a UPGRH SF6 e respectivas população, área e densidade populacional.....	5
QUADRO 2– Municípios que compõem a UPGRH SF10 e respectivas população, área e densidade populacional.....	6
QUADRO 3 – Elementos presentes na maior parte das águas subterrâneas naturais – íons fundamentais, menores e elementos- traço.....	24
QUADRO 4: Valores característicos dos parâmetros comumente monitorados nas águas subterrâneas.....	25
QUADRO 5: Resumo das referências citadas referente à aplicação de geoestatísticas a dados de qualidade de aquíferos – principais aspectos metodológicos e conclusões dos estudos (literatura internacional).....	32
QUADRO 6: Resumo das referências citadas e que tratam da aplicação de técnicas estatísticas multivariadas a dados de qualidade de aquíferos – principais aspectos metodológicos e conclusões dos estudos (literatura internacional).....	40

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Análise de Clusters
AF	Análise Fatorial
ANA	Agência Nacional de Águas
APHA	American Public Health Association
BIRD	Banco Internacional de Reconstrução e Desenvolvimento
CETEC	Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais
CBH	Comitê de Bacia Hidrográfica
CODEVASF	Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e Parnaíba
Conama	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
Ga	Bilhões de anos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Metrologia
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
LD	Limite de detecção do método
Ma	Milhões de anos
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
MS	Ministério da Saúde
NAVFAC	Naval Facilities Engineering Command
NBR	Norma brasileira
RAS	Razão de adsorção de sódio
SBG	Sociedade Brasileira de Geologia
Siagas	Sistema de Informações de Água Subterrâneas
UFV	Universidade Federal de Viçosa
UPGRH	Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos
USGS	United State Geological Survey
UTM	Universal Transversa de Mercator
VMP	Valor máximo permitido
WHO	World Health Organization

1 INTRODUÇÃO

Em vista da crescente escassez de água que vem atingindo grande parte da população mundial, os recursos hídricos subterrâneos têm se tornado uma importante alternativa de abastecimento, com significativo potencial econômico. Embora haja controvérsias a respeito das quantidades disponíveis dos recursos hídricos subterrâneos e ainda seja necessária uma melhor cobertura de mapeamentos hidrogeológicos, inclusive regionais, estima-se que eles podem representar cerca de 20% da água doce disponível (LIMA, 2001; Von SPERLING, 2006). Para fins domésticos, 61% da população brasileira é abastecida por águas subterrâneas, sendo 6% por poços rasos, 12% por fontes e 43% por poços profundos. Estima-se que 15,6% dos domicílios utilizam exclusivamente água subterrânea, no país (ANA, 2005).

No Brasil, o uso das águas subterrâneas para abastecimento doméstico, industrial e agropecuário tem aumentado, especialmente em locais com escassez ou intermitência das águas superficiais. Nas regiões metropolitanas, observa-se um crescimento vertiginoso do uso destas águas, por possibilitarem maior regularidade de vazões e menor custo aos usuários (SILVA *et al.*, 2010). Além disso, o uso dos aquíferos constitui uma importante alternativa diante da tendência de aumento dos custos de tratamento e de distribuição das águas superficiais em âmbito local, regional, e até mesmo mundial. O crescimento da demanda, particularmente em áreas onde o abastecimento de superfície é limitado – caso de regiões áridas e semiáridas – e a contínua deterioração da qualidade da água de superfície resultam em aumento das pressões em relação ao uso desses recursos, mundialmente. Em muitos aquíferos já se observa a superexploração. Desta forma, torna-se obrigatório um gerenciamento adequado das águas subterrâneas de modo a vencer os desafios que surgem a partir desta demanda (SOMLYODY & VARIS, 2006; MARTINS, 2007; TUNDISI, 2008; VAUX, 2011).

Os municípios ao norte do Estado de Minas Gerais estão situados, predominantemente, no sistema aquífero do Grupo Bambuí, em clima semiárido e de relativa escassez de águas superficiais. O quadro de escassez de águas de superfície tem levado ao uso intenso do aquífero, o que é demonstrado a partir de dados do Sistema de Informações de Água Subterrâneas – Siagas, desenvolvido pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM e da Agência Nacional de Águas - ANA. Do total estimado de 53.000 poços (cadastrados e não cadastrados) em Minas Gerais, cerca de 20.000 estão nos municípios das sub-bacias dos rios Jequitaiá e Pacuí - UPGRH SF6 e do rio Verde Grande - UPGRH SF10, ou seja, 37,8% do

número total no Estado encontra-se na região de estudo que corresponde, em extensão, a apenas 12% do território mineiro (ANA, 2012-b; CPRM, 2012). Os principais usos das águas subterrâneas na região compreendem consumo humano, irrigação e dessedentação animal (SANTOS *et al.*, 2010; CBH JEQUITAÍ E PACUÍ, 2010).

Apesar dessa imensa demanda, o sistema aquífero Bambuí apresenta baixa disponibilidade hídrica subterrânea, associada à relativa fragilidade geológica (VASCONCELOS, 2010; ANA, 2011). O domínio Cárstico-Fissural com predomínio de rochas calcárias confere heterogeneidade em termos de disponibilidade hídrica e produtividade de poços e, localmente, pode apresentar salinização das águas.

No sentido de conhecer a qualidade hídrica na região, o IGAM vem monitorando as águas subterrâneas na região norte do Estado de Minas Gerais, mais especificamente, nas referidas sub-bacias. As medições são executadas atualmente por meio de poços profundos, já tendo sido concluídas 13 campanhas semestrais compreendidas no período entre 2005 e 2011, com exceção do 2º semestre de 2006 e do 1º semestre de 2007. A avaliação e a interpretação dos resultados obtidos nesse monitoramento ambiental pode permitir acompanhar a evolução espaço-temporal da qualidade das águas e sua adequação aos usos efetuados e pretendidos; compreender melhor a qualidade das águas subterrâneas na área monitorada; estimar valores de fundo (*backgrounds*); verificar o atendimento aos padrões legais e a outros valores de referência (como os de intervenção), tendo em conta os diferentes usos das águas; apontar tendências de aumento/redução das concentrações dos parâmetros de qualidade no decorrer do tempo; determinar a distribuição espacial das concentrações destes parâmetros na área de estudo; identificar comportamentos similares entre diferentes pontos de monitoramento, indicar a existência ou não de pontos com qualidade da água equivalente; estabelecer possível inter-relação entre as variáveis de um conjunto de dados de monitoramento, dentre outros.

A metodologia de avaliação dos resultados do monitoramento utilizada no presente trabalho pode vir a subsidiar medidas de gestão buscando assegurar a sustentabilidade do uso do recurso hídrico subterrâneo na área de estudo e poderá, futuramente, indicar melhoria do programa de monitoramento e ainda, eventualmente, vir a ser aplicada em outros aquíferos monitorados.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Caracterizar aspectos hidrodinâmicos e avaliar a qualidade das águas do aquífero Bambuí na porção mineira das sub-bacias do rio Verde Grande – UPGRH SF10 – e dos rios Jequitaiá e Pacuí – UPGRH SF6.

2.2 Objetivos específicos

- Pesquisar tendências espaciais dos principais parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas, na porção mineira das Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos - UPGRH SF10 e UPGRH SF6.
- Estimar a distribuição geográfica das concentrações dos principais parâmetros – avaliação em seções hidroquímicas sucessivas no sentido do escoamento predominante do aquífero e mapeamento de isotores (interpolação).
- Determinar os parâmetros físico-químicos mais representativos para o monitoramento da qualidade das águas subterrâneas na área de estudo.
- Investigar possível interferência sazonal nas concentrações dos principais parâmetros físico-químicos do aquífero na área de estudo.
- Avaliar o nível de atendimento dos parâmetros físico-químicos a limites legais e a padrões ambientais recomendados.
- Analisar e mapear os níveis estáticos das águas subterrâneas.
- Estimar os fluxos subterrâneos regionais e o gradiente hidráulico médio do aquífero Bambuí na área de estudo.

3 REVISÃO DA LITERATURA

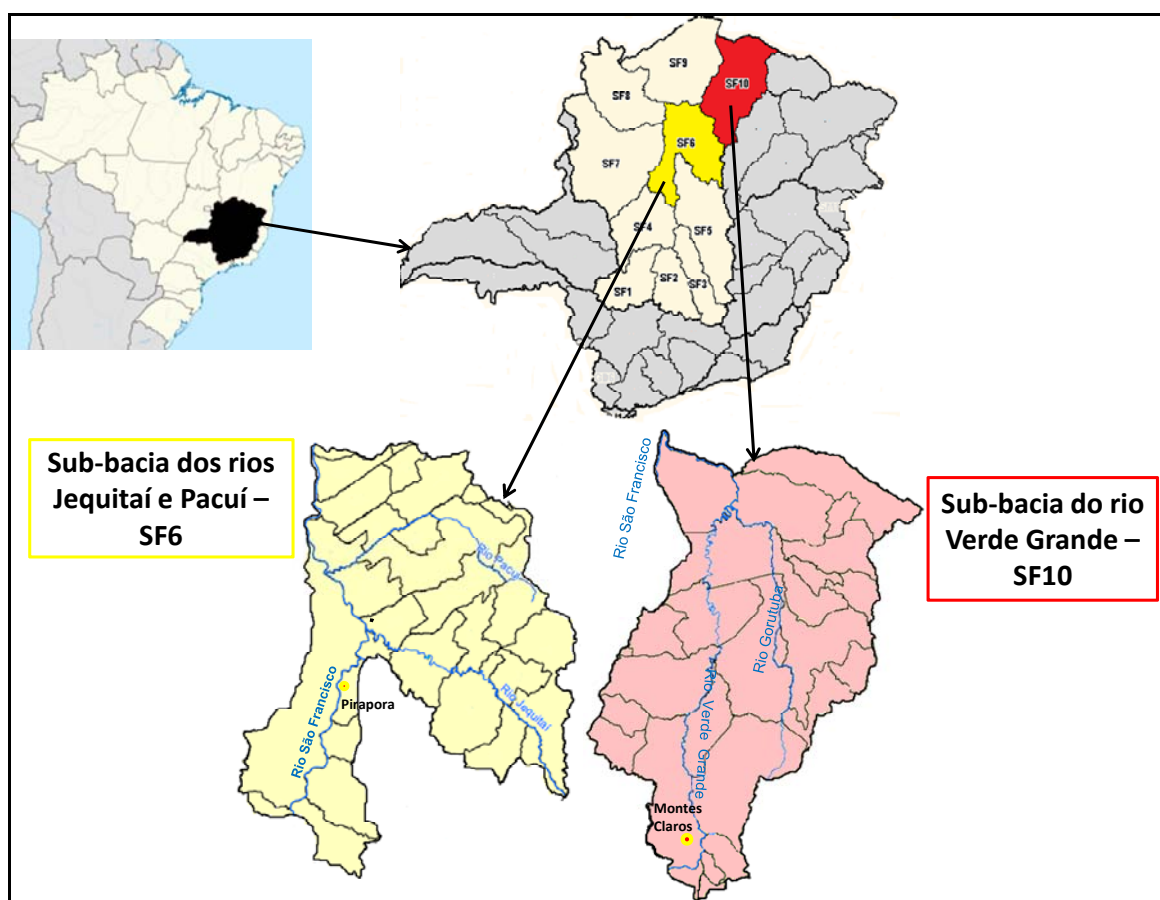
3.1 Principais características da área de estudo

3.1.1 Municípios e população

A mesorregião do Norte de Minas, uma das doze do estado de Minas Gerais, tem área de 128.454,108 km² e população de 1.591.507 habitantes, englobando 89 municípios.

A área de estudo, no Norte de Minas Gerais, corresponde a, aproximadamente, 52.175 km², sendo que 27.219 km² correspondem à porção mineira da UPGRH SF10 – Sub-bacia do rio Verde Grande e 24.956 km² são da UPGRH SF6 – Sub-bacia dos rios Jequitai e Pacuí, integralmente em Minas Gerais (IGAM, 2012 – a e b). Esta área detém 35,5% do sistema aquífero Bambuí e sua localização está ilustrada na figura 1.

FIGURA 1: Mapa de localização em Minas Gerais das sub-bacias dos rios Jequitai e Pacuí – UPGRH SF6 (em amarelo) e do rio Verde Grande – UPGRH SF10 (em vermelho).



Fonte: Adaptado de CBH JEQUITAI E PACUÍ, 2010 e de ANA, 2011.

Os Quadros 1 e 2 mostram os municípios que compõem as UPGRH SF6 e UPGRH SF10, respectivamente, ou seja, municípios cujos territórios pertençam, integral ou parcialmente, a estas sub-bacias, bem como suas populações, territórios e densidades populacionais.

QUADRO 1 - Municípios que compõem a UPGRH SF6 e respectivas população, área e densidade populacional.

Nº	MUNICÍPIO	POPULAÇÃO (habitantes)	ÁREA (km ²)	DENSIDADE (habitantes/ km ²)
1	Montes Claros	370.216	3.582,03	103,4
2	Pirapora	53.832	575,46	93,5
3	Brasília de Minas	31.356	1.398,56	22,4
4	Mirabela	13.116	720,83	18,2
5	Icaraí de Minas	10.963	616,58	17,8
6	Várzea da Palma	36.439	2.195,65	16,6
7	São Francisco	54.180	3.299,80	16,4
8	Luislândia	6.443	424,75	15,2
9	Bocaiúva	47.236	3.232,66	14,6
10	Ubaí	11.818	820,87	14,4
11	Coração de Jesus	26.079	2.236,24	11,7
12	Engenheiro Navarro	7.128	631,97	11,3
13	Claro dos Poções	7.712	705,96	10,9
14	Três Marias	29.036	2.675,15	10,9
15	São João do Pacuí	4.120	420,46	9,8
16	Ibiaí	7.928	870,45	9,1
17	Campo Azul	3.701	506,46	7,3
18	Lagoa dos Patos	4.191	599,45	7
19	Ponto Chique	4.014	602,37	6,7
20	Buenópolis	10.281	1.610,96	6,4
21	Jequitaiá	7.893	1.268,28	6,2
22	Joaquim Felício	4.371	791,1	5,5
23	São João da Lagoa	4.695	989,85	4,7
24	Buritizeiro	27.076	7.225,59	3,7
25	Francisco Dumont	4.920	1.553,33	3,2
26	São Gonçalo do Abaeté	6.390	2.687,41	2,4
27	Lassance	6.474	3.213,58	2
			DENSIDADE MÉDIA	16,7

Fonte: IGAM, 2012-a; IGAM, 2012-b; IBGE, 2012-b.

QUADRO 2– Municípios que compõem a UPGRH SF10 e respectivas população, área e densidade populacional.

Nº	MUNICÍPIO	POPULAÇÃO (habitantes)	ÁREA (km ²)	DENSIDADE (habitantes/ km ²)
1	Montes Claros	370.216	3.582,03	103,4
2	Nova Porteirinha	7.400	121,02	61,1
3	Janaúba	67.587	2.188,84	30,9
4	Mato Verde	12.609	474,45	26,6
5	Varzelândia	19.108	803,91	23,8
6	Monte Azul	21.717	991,57	21,9
7	Mamonas	6.349	290,28	21,9
8	Porteirinha	37.588	1.806,25	20,8
9	Glaucilândia	2.992	145,63	20,5
10	Mirabela	13.116	720,83	18,2
11	Catuti	5.067	285,99	17,7
12	Ibiracatu	6.098	359,22	17,0
13	Espinosa	31.134	1.876,40	16,6
14	Capitão Enéas	14.372	970,34	14,8
15	Bocaiúva	47.236	3.232,66	14,6
16	São João da Ponte	25.257	1.849,19	13,7
17	Patis	5.642	444,65	12,7
18	Jaíba	34.539	2.740,28	12,6
19	Guaraciama	4.756	392,05	12,1
20	Juramento	4.146	432,01	9,6
21	Francisco Sá	25.116	2.749,39	9,1
22	Serranópolis de Minas	4.484	553,10	8,1
23	Pai Pedro	5.950	785,11	7,6
24	Riacho dos Machados	9.361	1.308,54	7,2
25	Verdelândia	8.523	1.451,86	5,9
26	Matias Cardoso	10.188	1.938,43	5,3
27	Gameleiras	5.121	1.733,40	3,0
			DENSIDADE MÉDIA	19,9

Fonte: IGAM, 2012-a; IGAM, 2012-b; IBGE, 2012-b.

Com exceção de cinco municípios (Montes Claros, Janaúba, Pirapora, Buritizeiro e Várzea da Palma), na área de estudo, assim como no restante do Norte de Minas, prevalecem municípios com maior percentual de população rural em relação à urbana. Comparativamente com as demais regiões do Estado, somente perde, em termos de quantidade da população rural, para a mesorregião do Jequitinhonha.

Nos anos 70, foram introduzidas culturas comerciais como o reflorestamento e a cafeicultura, por meio de iniciativas governamentais, em uma tentativa de reverter o quadro de predomínio da agricultura de subsistência na região do Norte de Minas. Entretanto, não houve modificação considerável na estrutura produtiva e não se observou resultados que consistissem em solução para a pobreza e a desigualdade social (SCHVARTZMAN, 2007).

3.1.2 Aspectos hidrológicos

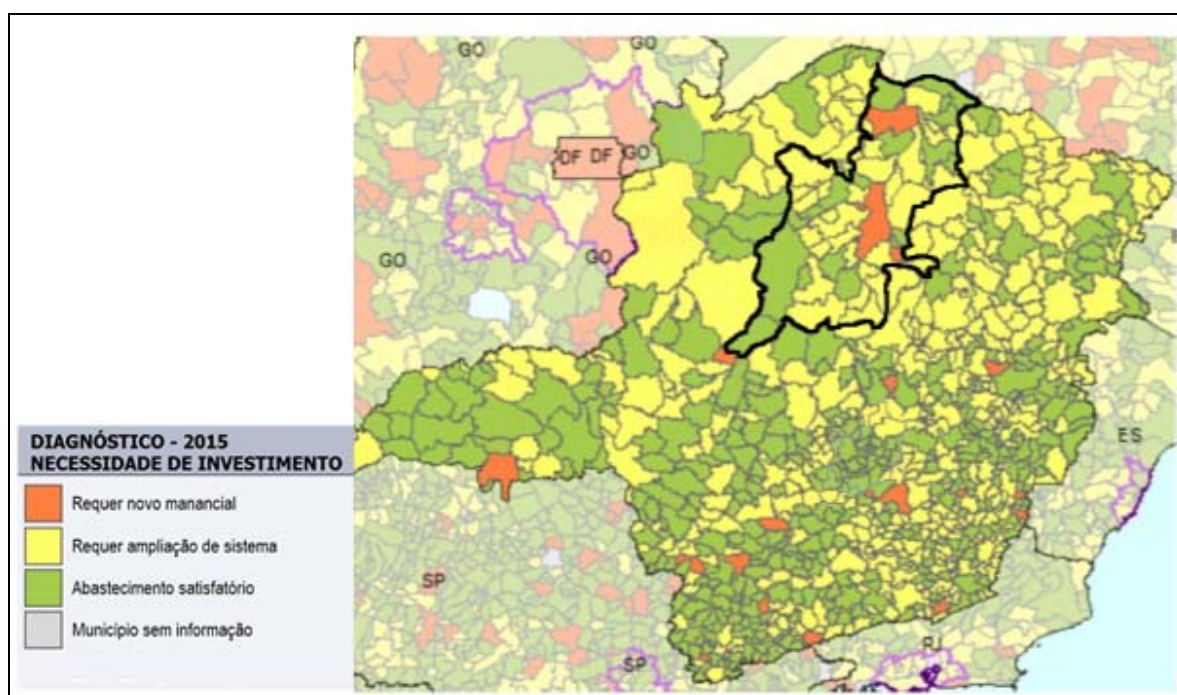
Embora seja consenso geral, como comentado por Schwartzman (2007), que uma das questões fundamentais para o progresso e o desenvolvimento social relaciona-se ao acesso à água potável e ao controle do potencial da água como recurso produtivo. Andrade (2006) destaca que é discutível que a disponibilidade do recurso assegure o desenvolvimento e a redução da degradação ambiental. A autora exemplifica com as diferenças observadas na própria bacia do rio São Francisco. Na região do Alto São Francisco (sub-bacia do rio das Velhas) é produzida mais de 50% da vazão do rio e há geração de grande parte do PIB da bacia. Por outro lado, é nesta região que ocorre desperdício considerável de água nas cidades, chegando a 40% do total consumido e é onde é gerada grande parte da poluição urbana e rural. Já no Médio, Sub-Médio e Baixo São Francisco, comunidades ditas isoladas, que se localizam próximas às margens do rio, não são beneficiadas por esta proximidade, sendo que muitas não têm acesso à água potável. Segundo a autora, este quadro mostra o equívoco em associar-se disponibilidade hídrica com desenvolvimento e preservação ambiental, haja vista que as áreas com maior disponibilidade hídrica podem apresentar contextos de pouco acesso à água e, portanto, de baixo desenvolvimento.

Com intuito de aumentar o acesso à água, especialmente nas regiões em que a água superficial torna-se um elemento limitante do desenvolvimento econômico, é preciso minimizar este déficit por meio de uma ou mais medidas associadas, tais como o armazenamento superficial, o aproveitamento adequado de fontes alternativas (águas subterrâneas, águas pluviais); o aperfeiçoamento das técnicas de irrigação e de drenagem; e o reúso (YUAN *et al.*, 2003; MILLER, 2006).

Em Minas Gerais e com relação ao abastecimento urbano, aproximadamente 20% dos municípios são abastecidos por mananciais subterrâneos e outros 20% por águas superficiais e subterrâneas, simultaneamente. Uma avaliação de oferta/demanda desenvolvida pela ANA (2012-a) mostra que 50% das sedes urbanas no Estado não têm abastecimento satisfatório ou

não têm garantidas as demandas futuras. Quanto aos municípios pertencentes às UPGRH SF6 e SF10, destacados na figura 2, o mesmo diagnóstico demonstra que eles têm o mesmo percentual de abastecimento insatisfatório, em comparação com o restante do Estado, sendo que 11% dos municípios necessitam da exploração de novos mananciais, e 39% requerem ampliação do sistema de abastecimento de água potável.

FIGURA 2: Avaliação oferta/demanda do abastecimento de água potável em Minas Gerais – (abastecimento satisfatório ou insatisfatório e requisitos – projeção para 2015), com destaque para os municípios da área de estudo.

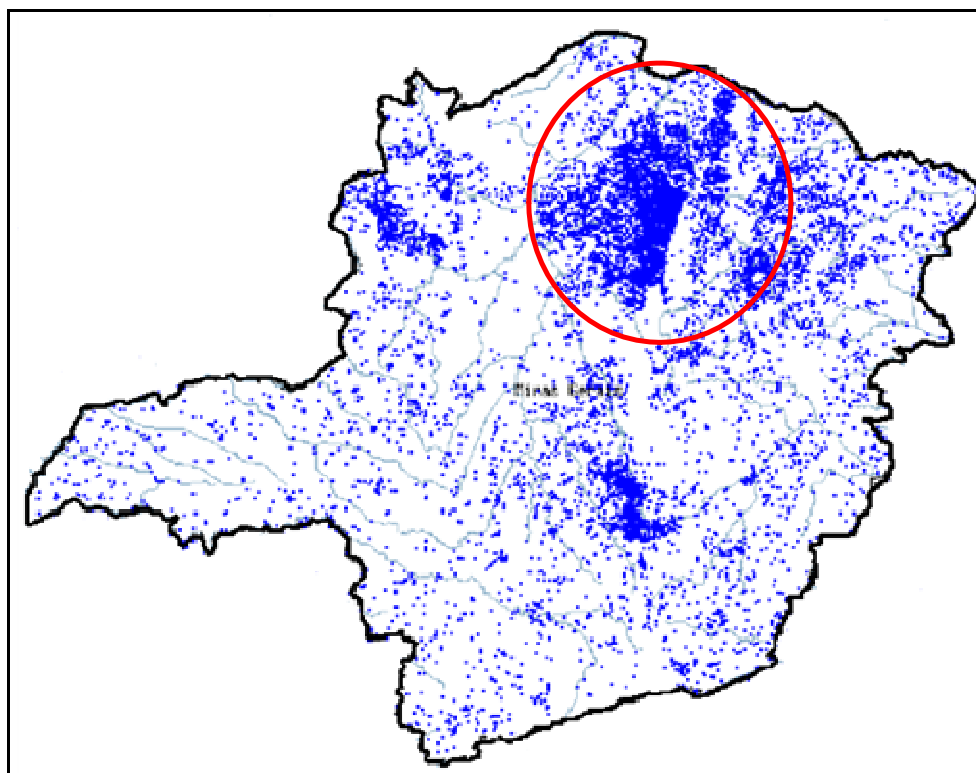


Fonte: Adaptado de ANA, 2012(a).

A elevada pressão sobre os recursos hídricos subterrâneos em parte da região norte de Minas Gerais é ilustrada na figura 3, que indica os poços de extração cadastrados no Siagas – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas da CPRM – para o Estado, incluindo poços de abastecimento público e de abastecimento doméstico, até o ano de 2012.

Fica evidente, a partir da figura 3, que há um adensamento de poços, ou seja, uma demanda maior na região norte de Minas, incluídas as UPGRH SF6 e SF10, o que pode ser explicado pela escassez de água superficial. Observa-se ainda concentração de poços de extração, em menor extensão, na região metropolitana da capital e no noroeste do Estado.

FIGURA 3: Distribuição espacial de poços cadastrados no Siagas, com destaque – em vermelho – para os poços concentrados na área de estudo.



Fonte: Adaptado de CPRM, 2012.

De acordo com dados disponibilizados pelo Siagas estão cadastrados, desde 1958 até hoje no Brasil, cerca de 224.500 poços tubulares. A ANA (2012-b) estima que o cadastramento de poços corresponda a cerca de 40% dos existentes. Portanto, seriam, de acordo com esta estimativa, 640.000 poços no Brasil, dos quais 53.000 no Estado de Minas Gerais, ou seja, cerca de 8%.

Conforme mencionado, do total de poços cadastrados em Minas Gerais, são 7.019 nos municípios das UPGRH SF6 e UPGRH SF10. Mantido o critério de estimativa da ANA, seriam cerca de 20.000 poços (cadastrados e não cadastrados), ou seja, 37,8% do número total no Estado encontra-se na região de estudo que corresponde, em extensão, a apenas 12% do território mineiro.

Atualmente e tendo como referência os pontos de captação de água bruta, os mananciais de abastecimento público foram caracterizados pela ANA (2012-a) quanto à tipologia das fontes hídricas (superficiais ou subterrâneas). Nos municípios da região de estudo 56% deles são abastecidos por sistemas isolados de águas subterrâneas, enquanto este índice, em todo o

Estado, é bem menor, 20%. Portanto, é evidente a importância da demanda pelos recursos hídricos subterrâneos nesta região.

O uso da água subterrânea concentra-se, em Minas Gerais, na bacia do rio Verde Grande e na bacia do rio Riachão (afluente do rio Pacuí) e em alguns municípios das microrregiões administrativas de Unaí e Montes Claros, e é utilizada principalmente para consumo humano, irrigação e dessedentação animal (CPRM, 2009).

Quanto ao potencial hídrico subterrâneo na região, o mesmo foi classificado como médio pelos critérios da ANA & IGAM (2006) e como baixo segundo estudo desenvolvido por MME & BIRD (2009). Relatório da ANA aponta reservas exploráveis de apenas 47 m³/s, no domínio cárstico-fissurado e menciona que a faixa mais comum de vazões dos poços está entre 5 e 60 m³/h para profundidades, geralmente, entre 50 e 150 m (ANA, 2006). De acordo com MME & BIRD (2009), é grande o número de poços improdutivo, embora a produtividade aumente para o sul e o leste, devido ao aumento da pluviometria, que favorece o desenvolvimento da cobertura intemperizada e facilita a recarga do aquífero.

As relações entre os rios de superfície e os aportes de águas subterrâneas que eles recebem dos aquíferos com características cársticas dependem das condições climatológicas, geográficas e geológicas. No caso da sub-bacia do rio Verde Grande, por exemplo, cuja área representa 5% da área da bacia do rio São Francisco, a contribuição potencial é de 4,8% em função da precipitação ser menor do que a precipitação média na bacia do São Francisco. Nesta sub-bacia, a partir do balanço hídrico e com base nas vazões médias em m³/s, a evapotranspiração corresponde a 48% da vazão total das águas, a precipitação a 50% e as vazões superficiais a 2% (UFV, 2009). Por outro lado, nos carstes, as águas infiltradas no subsolo pela absorção do escoamento superficial podem voltar à mesma bacia hidrográfica, mais a jusante, ou desviar-se para outra bacia hidrográfica ou outros aquíferos (SILVA, 2008).

Com relação ao balanço hídrico, pesquisas em toda a área da bacia do rio São Francisco, foram realizadas na década de 80, a partir da metodologia para cálculo do balanço hídrico de Thornthwaite e Matter e adotando 100 mm como a Capacidade de Armazenamento do Solo – CAD. Tais estudos mostraram que há diminuição da precipitação efetiva do sul (cabecera do rio das Velhas) para o norte (na sub-bacia do rio Verde Grande). A evapotranspiração real varia menos espacialmente, mas ainda assim apresenta valores maiores (750 mm/ano) na

porção nordeste da sub-bacia do rio Verde Grande e no vale principal do rio São Francisco próximo à divisa com a Bahia. Tendência coerente se observa para o excedente hídrico que apresenta os menores valores (< 50 mm/ano) ao norte da região. Em direção às bordas leste (encostas da serra do Espinhaço) e oeste (afluentes da margem esquerda do rio São Francisco), os autores observaram aumentos gradativos dos excedentes hídricos até valores entre 600 e 700 mm/ano, nas extremidades da bacia. O período do excedente apresenta comportamento análogo: maior (seis meses) ao sul da região e decrescente até atingir um mês (janeiro) nas margens do rio São Francisco na divisa de Minas Gerais com a Bahia. Os autores mencionam que grande parte da bacia tem quatro meses de período do excedente hídrico (entre dezembro a março) (NIMER & BRANDÃO, 1989 *apud* PATRUS *et al.*, 2001).

Observa-se certa lacuna na literatura a respeito de dados de recarga das águas subterrâneas na região de estudo, de modo geral. Embora haja poucas informações quanto a valores de taxas de infiltração, sabe-se que na região norte de Minas Gerais, a renovação das águas subterrâneas é ineficiente. A recarga anual no aquífero fissurado é estimada em apenas $1.471 \text{ m}^3/\text{km}^2$. Esta ineficiência é atribuída pelos autores, não só às condições climáticas, mas também à escassez de coberturas inconsolidadas. Com base no escoamento subterrâneo total, determinaram-se valores de infiltração nos sedimentos do sistema intersticial (sobreposto ao sistema cárstico) entre 10 e 20% da precipitação anual (CPRM, 1978 & CPRM, 1980 *apud* MME & BIRD, 2009).

Estudos hidrológicos desenvolvidos nas sub-bacias dos rios: Urucuia, Carinhanha e Verde Grande indicaram, em termos médios diários anuais de precipitação e vazão, que a sub-bacia do rio Verde Grande é a que apresenta a maior capacidade de recarga dos aquíferos, ou seja, a menor relação entre vazão média e precipitação média (4,06%) (UFV, 2009).

Estudo mais recente em que foi feito o monitoramento hidrológico em duas dolinas e em seis zonas de interflúvio, nos municípios de Varzelândia e Verdelândia (UPGRH SF10), demonstrou que a infiltração direta nas áreas de interflúvio é inexpressiva, e evidenciou a importância das dolinas na recarga localizada, a qual é favorecida pelas condições de chuvas intensas concentradas e que promovem elevado escoamento superficial (BRAGA *et al.*, 2010).

3.1.3 Aspectos Fisiográficos

Clima

A mesorregião do Norte de Minas apresenta chuvas escassas (precipitação acumulada inferior a 900 mm/ano, precipitação média anual entre 600 e 1.400mm), altas temperaturas (média anual de 24 °C, média máxima de 32°C e média mínima de 18°C), baixo índice de nebulosidade, grande incidência de radiação solar e evaporação estimada de 2.900 mm anuais. Estas características, típicas de clima semiárido, tornam essa região muito suscetível à seca. Do total do território desta região, 9,84% pertencem ao polígono das secas (BRASIL, 2005; IBGE, 2010).

O Norte de Minas caracteriza-se por duas estações bem definidas, em termos de precipitações: uma chuvosa que vai de outubro a março, quando ocorre cerca de 90% da chuva anual, e outra seca que vai de abril a setembro. Segundo a classificação climática de Köppen, o clima é do tipo Aw, tropical quente, sendo que o subtipo predominante é o semiárido. Já o clima Cwa, mesotérmico de altitude com verões quentes e chuvosos e inverno seco com temperaturas mais amenas, está restrito às porções mais elevadas da Serra do Espinhaço, na borda oriental (ANA, 2002; ANA, 2011). Há evidências do aumento das temperaturas médias do ar de sul para norte no médio superior do São Francisco e também há variação no sentido transversal, aumentando das bordas para a região central da bacia Sanfranciscana (PATRUS *et al.*, 2001), incluída a área de estudo.

Os longos períodos de estiagem dificultam as condições de vida da população e, em alguns casos, provocam êxodo de parte da sua população rural. O problema da seca, não se deve somente ao déficit hídrico, mas também à irregularidade pluviométrica com acentuada concentração no período chuvoso (MARTÍNEZ, 2007).

A evaporação, como consequência das altas temperaturas e dos elevados níveis de insolação, associada à precipitação relativamente baixa leva ao chamado déficit hídrico, ou seja, as altas taxas de evapotranspiração ultrapassam, durante parte do ano, às taxas de precipitação. As regiões com déficit hídrico, caso dos ambientes áridos e semiáridos, apresentam maior susceptibilidade à salinização do solo e dos aquíferos (MEDEIROS, 2004).

Relevo

Na depressão São Franciscana, incluída a região de estudo, predominam extensas áreas aplainadas e dissecadas, superfícies onduladas, colinas e as áreas de relevo cárstico peculiar, como dolinas e uvalas, desenvolvidas em sua maior parte sobre rochas pertencentes ao Grupo Bambuí, resultantes de processos morfoclimáticos. Também ocorrem planaltos formados por relevos tabulares predominantemente areníticos entrecortados por cabeceiras de drenagem pouco aprofundados, regionalmente conhecidos como chapadas (CAMPOS & DARDENNE, 1997).

Os principais remanescentes do Planalto do São Francisco, na sub-bacia do rio Jequitaí, são representados pelas Serras do Cabral e da Água Fria, na porção Sul, e pelas Serras dos Fonseca e das Porteiras, na porção Norte. Na sub-bacia do rio Verde Grande, destacam-se a Serra do Espinhaço, a leste, e a Serra Central, sendo que a sub-bacia é limitada ao norte pelo Monte Alto, localizado no estado da Bahia. (CBH Jequitaí-Pacuí, 2010; ANA, 2011).

Biomass e percentual de ocupação

No que se refere à vegetação natural, observa-se dependência em relação ao clima, à topografia e à natureza do solo, na medida em que estes condicionam o volume de água retido no solo. Nas UPGRH SF6 e SF10, de acordo com as condições naturais, observam-se dois tipos principais de vegetação:

- a) **Cerrado:** predomina nas microrregiões de clima úmido e sub-úmido e de solos de baixa fertilidade (típicos de savana tropical, deficientes em nutrientes e ricos em ferro e alumínio). O Cerrado abriga plantas de aparência seca; pequenas árvores de troncos retorcidos entre arbustos diversos, distribuídos de forma esparsa em um solo coberto de gramíneas.
- b) **Caatinga:** é uma expressão tupi-guarani para mata branca e constitui bioma típico de regiões áridas ou semiáridas, sendo o único exclusivamente brasileiro. É a vegetação da região de estudo caracterizada pela ocorrência de cactáceas e bromeliáceas, especialmente em solos rasos, com exposições rochosas ou com abundância de cascalhos. (SCHOBER, 2002; SILVA & ROSA, 2009).

Há ainda as áreas de contato ou de transição desses tipos de vegetação dominantes (caatinga e cerrado), denominadas Matas Secas, bem como as matas ciliares (ou matas de galerias nas margens de cursos d'água) onde a cobertura aluvio-coluvionar e o solo são mais espessos e

férteis e os campos de Altitude ou Rupestres (SILVA & TABARELLI, 2004; SANTOS *et al.*, 2007). As matas ciliares apresentam vegetação arbustiva de maior porte associada à vegetação rasteira predominante. Próximo às nascentes, nas veredas, desenvolve-se vegetação característica, em cujo estrato arbustivo predomina o buriti (MARTÍNEZ, 2007).

Silva & Rosa (2009) comentam que toda a área da UPGRH SF6 encontra-se no bioma Cerrado e porção considerável da UPGRH SF10. O tipo de cobertura vegetal implica em distintos comportamentos nos atributos do solo e da água, sendo que as coberturas nativas são importantes na produção e na conservação dos mananciais hídricos. Estima-se que 75% dos biomas estejam preservados, já que as áreas antropizadas nos vales do São Francisco e do Parnaíba correspondem a 24,8% da área total, segundo a Codevasf – Companhia do Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (2010).

A degradação ambiental associada à exploração desordenada dos recursos naturais no Norte de Minas Gerais inclui o desmatamento visando à: silvicultura (incluído o florestamento com espécies exóticas), atividades pecuárias e agrícolas (incluindo as extensivas) e carvoarias. Somam-se a isto as queimadas e outras técnicas incorretas de manejo de terras para a prática da agricultura. Estes fatores contribuem para níveis de erosão acelerada, assoreamento de rios e córregos, alterações no ciclo hidrológico natural, dentre outros impactos ambientais negativos (ALMEIDA & PEREIRA, 2005; LEITE *et al.*, 2010).

Leite e colaboradores (2010) estimam que, na área antropizada (25% da área total), a distribuição das atividades possa ser feita da seguinte forma: 44% ocupado por pastagem, 25% por solo exposto, 20% destinado ao reflorestamento, 8,5% destinada à agricultura e 2,5% de vegetação natural (áreas de preservação obrigatória – APP e reserva legal). Os autores atribuem o percentual considerável do solo exposto (25% da área antropizada) a: ocorrência de processos erosivos advindos do desgaste do solo em áreas de pastagem altamente degradadas; existência de terras em fase de preparação para o cultivo de eucalipto e da agricultura; e ao desmatamento, o qual empobrece e retira a vegetação natural deixando-a vulnerável as ações do escoamento superficial que progressivamente agrava o quadro erosivo pelo qual a área do alto Riachão está submetida.

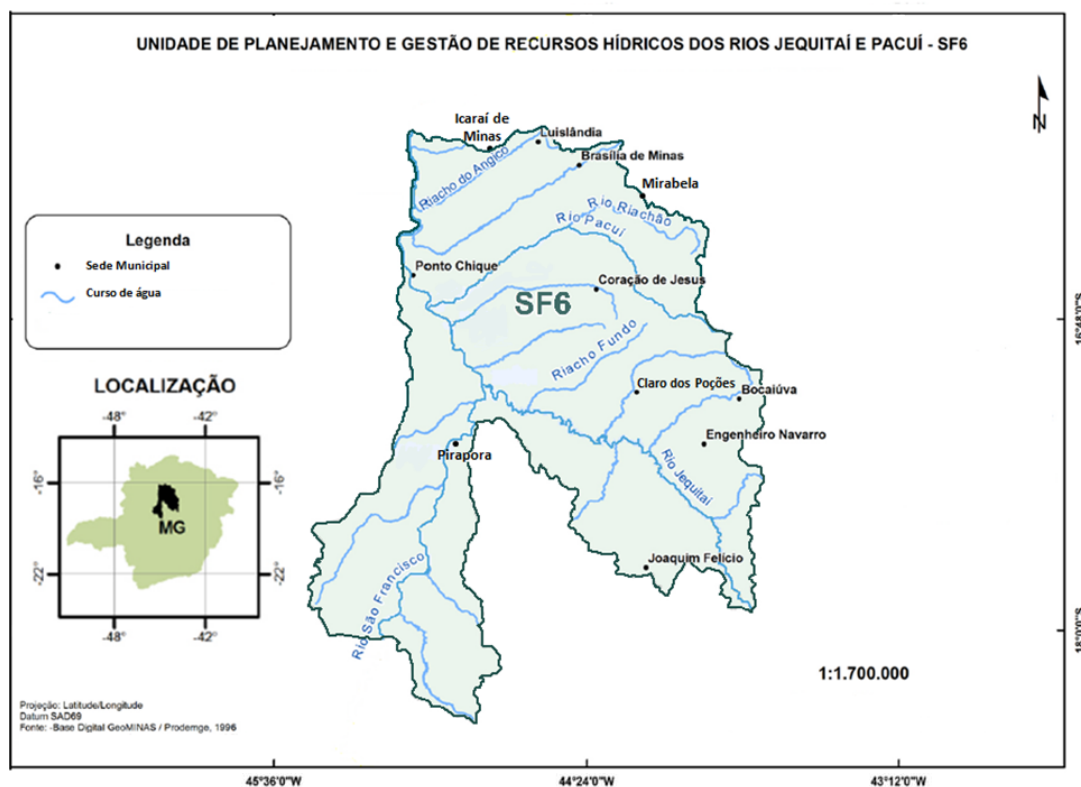
Hidrografia

A bacia hidrográfica do rio São Francisco drena quase metade da área do Estado, cerca de 236.000 km², incluindo as regiões central, oeste, noroeste e norte (ANA & IGAM, 2006).

Devido à sua extensão e aos diferentes ambientes percorridos, ela se divide em quatro unidades fisiográficas: na região do Alto São Francisco, correspondente a 19% da área da bacia, que vai da nascente até a cidade de Pirapora, MG; no Médio São Francisco, que se estende de Pirapora a Remanso, BA, correspondente a 55% da bacia; no submédio São Francisco, de Remanso até Paulo Afonso, BA (24% da bacia) e no Baixo São Francisco, que vai de Paulo Afonso até a foz (7% da bacia). A região estudada insere-se na região fisiográfica do médio rio São Francisco.

Na UPGRH SF6, os principais cursos de água afluentes da margem direita do rio São Francisco são, de montante para jusante no rio principal: rio Jequitaiá, riacho do Barro, riacho Canabrava, rio Pacuí, rio Paracatu e riacho do Angico (desaguamentos na região de Jequitaiá, Lagoa dos Patos, Ibiaí e Ponto Chique). Os principais cursos de água, ainda na UPGRH SF6, afluentes da margem esquerda do rio São Francisco são os rios do Formoso e Jatobá (municípios de Pirapora e Buritizeiro). A figura 4 mostra os principais cursos de água na UPGRH SF6.

FIGURA 4: Mapa de localização com as principais sedes municipais e cursos de água da UPGRH SF6 – Sub-bacia dos rios Jequitaiá e Pacuí.

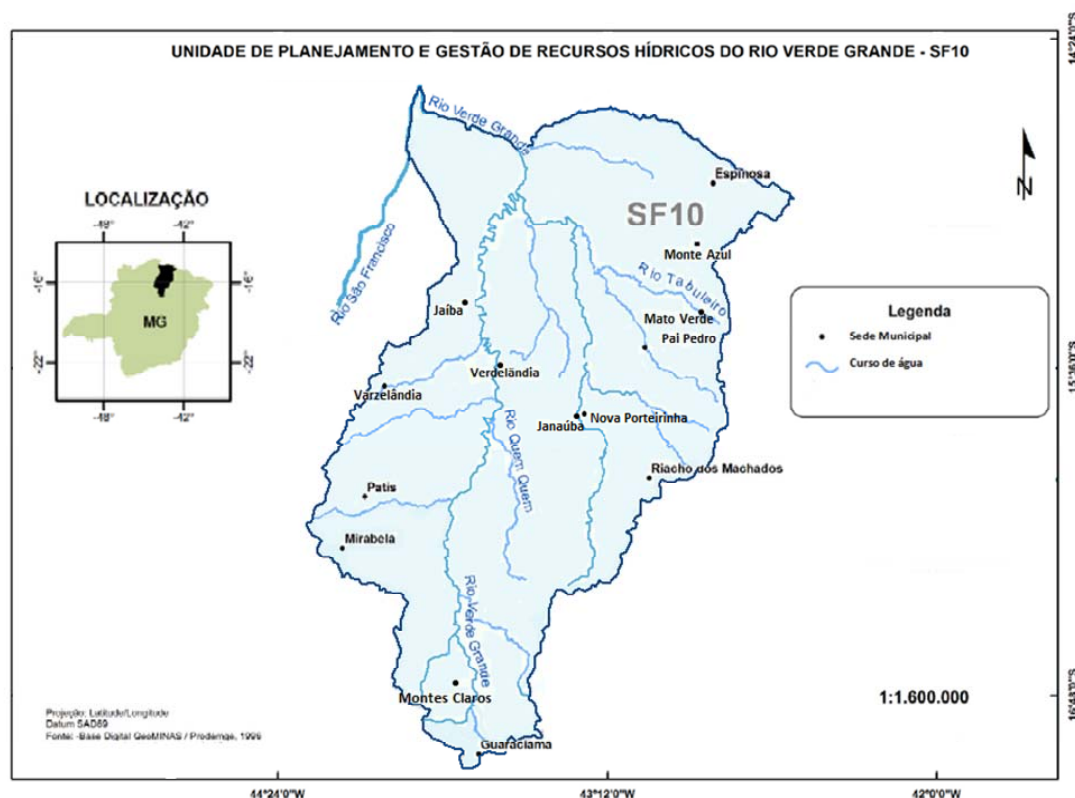


Fonte: Adaptado de IGAM, 2012-b.

Na UPGRH SF10, o principal afluente ao rio São Francisco é o rio Verde Grande (na margem direita, junção no município de Matias Cardoso). Este último nasce no município de Bocaiúva, em Minas Gerais e sua foz fica em Malhada na Bahia, tendo sentido sul-norte, coincidente com a configuração alongada da sua UPGRH SF10, até a confluência com o rio São Francisco. Neste ponto o rio Verde Grande sofre uma mudança para uma direção aproximada leste-oeste. Neste trecho final, onde o rio flexiona, está a divisa estadual entre Minas Gerais e Bahia.

O rio Verde Grande tem como principais afluentes os rios situados na margem direita: o rio Gorutuba (área de drenagem de 9.848 km²), que é de domínio estadual (de Minas Gerais), e o rio Verde Pequeno (área de drenagem de 2.715 km²), que forma a divisa estadual entre Minas Gerais e Bahia, constituindo assim também um rio de domínio federal. Destacam-se também os afluentes Ouro, Vieira e Macaúbas. Na figura 5 são mostrados os principais cursos de água da UPGRH SF10.

FIGURA 5: Mapa de localização com as principais sedes municipais e cursos de água da Sub-bacia do rio Verde Grande.



Fonte: Adaptado de IGAM, 2012-a.

De modo geral, a densidade de drenagem é alta e o grau de dissecação é acentuado. As fontes e nascentes abundantes alimentam a rede de drenagem superficial e contribuem para a manutenção dos tributários, especialmente na margem direita do rio Verde Grande.

Entretanto, ao atingirem a região mais plana, com áreas de baixa produtividade de águas subterrâneas, parte destes cursos de água se torna intermitente (ANA, 2011).

Geologia

Dentre os trabalhos mais recentes a respeito da geologia da região de estudo, destacam-se: Freitas e colaboradores (2008), Freitas & Cruz (2010), Iglesias e Uhlein (2009) e Fragoso e colaboradores (2011) que realizaram mapeamento geológico e análise estratigráfica, na região do norte de Minas Gerais.

A geologia da área de estudo, inserida no cráton São Francisco, é de grande complexidade, a qual apresenta domínios geográficos extensos, com comportamento geocronológico marcado por processos plutônicos, vulcânicos e sedimentares, além de feições estruturais e metamórficas características do conjunto de unidades estratigráficas expostas.

Segundo Iglesias & Uhlein (2009), o Grupo Bambuí, regionalmente, é constituído por duas sucessões: na base, uma sucessão marinha da base para o topo composta 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; e a sucessão de topo que é marinho-continental e está representada pela Formação Três Marias, predominantemente psamítica.

O reconhecimento e a interpretação das associações litológicas do Grupo Bambuí revelam a existência de pelo menos cinco estágios de sedimentação (IGLESIAS & UHLEIN, 2009; FRAGOSO *et al.*, 2011):

I – Formação Sete Lagoas: unidade basal do Grupo Bambuí constituída por uma sucessão carbonática que ocorreu em ambiente marinho raso, em resposta a uma importante transgressão marinha.

II – Formação Serra de Santa Helena: constitui uma sucessão sedimentar predominantemente pelítica e representa o afogamento gradual da plataforma carbonática da formação anterior e a deposição de uma sucessão em ambiente marinho plataformar, com profundidades variáveis, submetido, por vezes, a influência de ondas.

III – Formação Lagoa do Jacaré: resultado da sedimentação em uma plataforma carbonática com contribuições siliciclásticas em que predomina a associação de calcissiltitos e de pelitos,

na porção basal da formação, o que condiz com uma deposição em águas calmas relacionada ao subambiente de rampa profunda, longe da influência de correntes.

IV – Formações Lagoa Formosa e Serra da Saudade: sedimentação siliciclástica, predominantemente fina, provavelmente relacionada a uma elevação do nível do mar e aumento do aporte sedimentar, que inibiram a precipitação carbonática.

V – Formação Três Marias: relacionada ao estágio final da sedimentação do Grupo Bambuí, em que houve forte aumento do aporte sedimentar e caráter regressivo no preenchimento da bacia.

Hidrogeologia

Segundo Atman e colaboradores (2011), estudos hidrogeológicos importantes no Norte de Minas foram realizados nas décadas de 1970 e 1980 pela Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC). As autoras destacam os trabalhos de Silva (1984) que apresentou parte dos dados de análises morfoestrutural, hidrogeológica e hidroquímica do aquífero cárstico de Jaíba, além de dados sobre a potencialidade hidrogeológica da região; e a pesquisa de Silva (1995) que propôs um modelo hidrogeológico de funcionamento hidráulico do aquífero cárstico de toda a bacia do rio Verde Grande, com base em mapeamento hidrogeológico e processamento de dados de mais de 1.200 poços.

As UPGRH SF6 e SF10, inseridas no cráton São Francisco, apresentam áreas de ocorrência (afloramentos) de diferentes tipos de domínios hidrogeológicos, classificados segundo sua litologia, aspecto morfoestrutural e comportamento hidrodinâmico.

O sistema aquífero do grupo Bambuí (que aflora no domínio hidrogeológico denominado carbonatos/metacarbonatos), está localizado na província hidrogeológica do São Francisco, e tem extensão estimada em 182.000 km² de área de recarga total e espessura média estimada de 2.500 m, abrangendo Minas Gerais, Bahia, Goiás e Distrito Federal. O sistema ocupa, na porção mineira da bacia do rio São Francisco, uma área da ordem de 40.000 km².

O sistema aquífero possui também porções com comportamento de cárstico-fissurado (49% de sua extensão) e de fissurado, tipicamente, correspondente a 19% de sua extensão (ZOBY *et al.*, 2004; ANA, 2005).

No aquífero Bambuí, a transmissividade está compreendida entre de 20 m²/dia a 1.000 m²/dia, de acordo com SILVA e colaboradores (1982). Em áreas específicas, as características hidrodinâmicas podem ser determinadas com maior exatidão, como é o caso da região de Mata da Corda/Areado com transmissividade T = 216 m²/dia, permeabilidade K = 0,354m/dia e coeficiente de armazenamento S = 10⁻⁷ (PEDROSA & CAETANO, 2002; ZOBY *et al.*, 2004).

Dentre as principais características destes tipos de aquíferos estão (MOURÃO *et al.*, 2001; PEDROSA & CAETANO, 2002; SILVA, 2008):

I – Aquífero cárstico: possui porosidade secundária resultante do alargamento, por dissolução, de superfícies de descontinuidade – falhas, fraturas e planos de acamamento – resultando em rede intrincada de condutos que constitui um meio de circulação acentuadamente heterogêneo e anisotrópico. Predominam as rochas carbonáticas cujos principais componentes são: calcita, dolomita, siderita, magnesita, ankerita e argila.

II – Aquífero cárstico-fissurado: meio representado por rochas solúveis, em geral calcários, dolomitos e gipsita, consolidadas e fraturadas, que acumulam a água em espaços proporcionados pelas zonas dissolvidas além das próprias fraturas. Agrega unidades constituídas por intercalações de rochas pelíticas e carbonáticas representadas por margas, siltitos e ardósias associadas a calcário e dolomito. O potencial hidrogeológico é maior nas porções tectonizadas e com camadas carbonáticas mais espessas. Predomina a recarga direta nos afloramentos, havendo também drenagens estruturalmente controladas de água superficial e a drenança dos sistemas granulares subjacentes. Os valores de transmissividade variam entre 2,3 a 506 m²/dia.

III – Aquífero fissurado: meio geológico composto por rochas cristalinas consolidadas e com porosidade secundária resultante de fissuras, falhas, juntas, diaclases, fraturas e xistosidades, dentre outras superfícies de descontinuidade, advindas de esforço tectônico. Com baixo potencial hidrogeológico, sendo as feições estruturais responsáveis por variações locais de produtividade, este sistema, pode, contudo, constituir alternativa importante de abastecimento em casos de pequenas comunidades ou em períodos prolongados de estiagem. A condutividade é altamente dependente das diversas variáveis relacionadas ao fraturamento, o que torna o meio heterogêneo e anisotrópico. Na região de estudo, o aquífero pode ser dividido, conforme suas características litológicas e aspectos hidráulicos em: metapelítico e

xistoso, quartzítico, itabirítico, ígneo e metamórfico de alto grau. O valor médio de transmissividade é de 25 m²/dia neste meio.

O fluxo subterrâneo predominante na área de estudo tem sentido de sudoeste para nordeste. A maioria dos poços é abastecida pelo sistema fissurado-cárstico, especialmente onde predominam calcários, que, apesar de recristalizados e com microporosidade reduzida, armazenam água em fraturas, falhas e feições cársticas (CPRM, 2009).

3.2 Hidrogeoquímica dos Aquíferos

Questão de fundamental importância, além da disponibilidade da água (aspecto quantitativo) e do acesso adequado da população a este recurso é a qualidade da água para os diferentes usos e também para o reuso do recurso. Sua qualidade apresenta variações decorrentes tanto dos ambientes naturais, quanto de ambientes antropizados e de ações humanas. Considerando a interconexão entre os diferentes ambientes naturais e o ciclo hidrológico, as principais fontes de poluição das águas subterrâneas coincidem com aquelas que interferem na qualidade das águas superficiais (RODRIGUES, 2004).

Os aquíferos são mais protegidos da contaminação do que as águas superficiais, em função das baixas velocidades de infiltração e dos processos físico-químicos e biológicos que ocorrem na zona não saturada do solo. Porém, ao contrário do que ocorre com as águas de superfície, caso ocorra contaminação, as baixas velocidades de fluxo tendem a retardar a recuperação da qualidade. A autodepuração muito lenta, associada à remediação complexa, morosa e de custos relativamente altos ou mesmo inviáveis, torna a prevenção das contaminações destas águas especialmente importante (NOBRE & NOBRE, 2001; MMA, 2007).

A qualidade das águas subterrâneas é dependente do conjunto de atividades antrópicas, bem como de fatores naturais, e de suas variações no tempo e no espaço. Com relação aos processos naturais que influenciam a qualidade das águas subterrâneas, destacam-se: condições climáticas, composição das rochas – variação geoquímica do solo, interfluxos com águas de superfície e condições de renovação das águas – recarga, dentre outras condições hidrológicas. Em áreas de ocorrência de rochas calcárias são observados problemas localizados de elevada dureza e sólidos totais dissolvidos que podem restringir alguns usos, como é o caso dos sistemas aquíferos Bambuí (ZOBY, 2008).

Os fatores naturais são determinantes nos efeitos de eventuais impactos antrópicos, uma vez que o nível de proteção do aquífero depende tanto das suas próprias características (extensão, área de recarga, profundidade do nível de água, litologias, porosidade, condutividade hidráulica, capacidade de atenuação – diluição, retenção físico-química e depuração biológica, etc.), quanto da área (uso do solo, topografia, aumento ou diminuição do aporte de carga poluente, aumento ou diminuição da exploração, etc.) e das características de eventuais contaminantes (mobilidade, densidade, etc.) (BANCO MUNDIAL, 2002).

Quanto às fontes antrópicas de poluição das águas subterrâneas, consideram-se todas aquelas que, em função de suas características, de localização em relação aos sistemas aquíferos, e da vulnerabilidade dos mesmos, possam vir a alterar sua qualidade. Incluem-se tanto as fontes difusas como é o caso da aplicação de agrotóxicos e de fertilizantes no solo, quanto as fontes pontuais como as fossas, os esgotos domésticos e industriais, os depósitos de resíduos sobre o solo, acidentes e vazamentos de produtos químicos – incluídos os postos de combustíveis, os lixões, contaminações a partir de poços mal instalados ou abandonados, dentre outros. Outro fator interveniente na qualidade dos aquíferos é o fenômeno da superexploração advindo da demanda crescente por este recurso hídrico. A superexploração, ou seja, a extração de água em volume maior do que o repostado pela natureza, pode provocar a redução da quantidade de água, podendo ocorrer secagem de nascentes, redução do volume que abastece os rios e o esgotamento de reservatórios, dentre outros impactos negativos (MMA, 2007).

Na bacia do rio São Francisco e em especial na sub-bacia do rio Verde Grande, a expansão das atividades agropecuárias é responsável pela degradação dos solos e das águas. Além do consumo de água que, em alguns casos, supera a disponibilidade, a retirada da vegetação (para a expansão das pastagens e áreas cultiváveis) desprotege o solo. A mecanização na agricultura e o pisoteamento do solo pelas pastagens praticados na região favorecem alterações na qualidade dos solos, incluindo aquelas interferentes no ciclo hidrológico, tais como aumento da resistência mecânica à penetração e a consequente redução da taxa de infiltração de água (OLIVEIRA-FILHO & LIMA, 2002; ARAÚJO *et al.*, 2007).

A escassez relativa de águas resulta em inevitáveis conflitos entre os diversos usuários, particularmente os irrigantes. Os usos predominantes das águas na região estudada são: irrigação, pecuária, abastecimento, atividades de extração mineral e indústria, piscicultura e lazer, além da geração de energia como uso não consuntivo. Já com relação à agricultura, as principais culturas são as de milho, soja, mandioca, feijão, arroz e cana-de-açúcar, além das

áreas de pastagem de criação extensiva de animais, com ênfase para a criação de gado – de corte e leiteiro, aves e suínos. A atividade industrial concentra-se na fabricação de móveis e beneficiamento de madeira, de cerâmica, de alimentos – especialmente rapadura e cachaça – e de produtos metalúrgicos. Produtos químicos são produzidos em pequena escala e há um número considerável de carvoarias na região (ANA, 2011).

3.2.1 Qualidade das águas subterrâneas

A determinação da relação entre as propriedades físicas e químicas das águas subterrâneas, com os tipos litológicos de uma determinada área, tem sido solucionada com a utilização da hidroquímica, sendo possível estabelecer, a partir do conhecimento dos litotipos constituintes de determinado aquífero, quais seriam as propriedades físico-químicas e os constituintes previstos para as águas subterrâneas. Na prática, muitas vezes e de maneira indireta, a partir dos resultados físico-químicos pode-se também obter indicações a respeito dos litotipos e das relações entre diferentes aquíferos e entre estes e as águas superficiais (GASTMANS *et al.*, 2005).

Nos aquíferos, o estabelecimento das relações entre as características físico-químicas e os impactos antrópicos é mais complexo em muitos casos, em função destas águas serem mais protegidas naturalmente. Exceção ocorre quando as contaminações são bem localizadas, normalmente envolvendo quantidades consideráveis de poluentes. É bastante comum que efeitos tóxicos de uma contaminação se manifestem bem depois do momento da contaminação, em função das baixas velocidades horizontais de escoamento, ou ainda que se manifestem a distâncias relativamente grandes do ponto de introdução no meio ambiente, dependendo da localização dos poços de monitoramento e de produção (FERNANDES, 2005).

Existem padrões bem conhecidos de relacionamento entre a incidência de doenças no homem e nos animais, com a presença de elementos maiores, menores e traços nas águas, particularmente nas subterrâneas. No caso destas últimas, em decorrência da interação com diferentes formações rochosas, pode ocorrer de serem naturalmente impróprias para determinados usos, inclusive para o consumo humano. Exemplos são: a fluorose esquelética e dentária associada a concentrações de flúor; anencefalia associada ao mercúrio; inapetência derivada de águas ricas em selênio, e a hipertensão decorrente de concentrações de cádmio. (CUNHA & MACHADO, 2004; CORCÓVIA & CELLIGOI, 2012).

Devido à sua estrutura molecular dipolar a água é um forte solvente (solvente universal). Nas águas naturais, este poder de dissolução é muito aumentado pela presença de ácido carbônico, formado pelo gás carbônico dissolvido, e ácidos orgânicos, principalmente húmicos, produzidos pela atividade dos seres vivos ao nível do solo. Num país tropical, como o Brasil, a abundância de água (umidade) e seu conteúdo em ácidos se colocam como o principal responsável pelo intemperismo das rochas, dando origem a mantos de decomposição (regolito) com espessura de dezenas de metros (PEREIRA, 2009).

O monitoramento da qualidade da água dos aquíferos constitui etapa essencial dos programas de proteção da água subterrânea, sendo necessário para o gerenciamento destes recursos hídricos e objetiva, dentre outros (MISHRA & COULIBALY, 2009; MOGHEIR *et al.*, 2009):

- Conhecer a qualidade natural da água de determinado sistema.
- Supervisionar continuamente a qualidade da água (de poços e nascentes) destinada a diferentes usos, por meio da verificação do atendimento aos padrões legais e a outros valores de referência (como os de intervenção).
- Subsidiar a identificação e a adoção de medidas corretivas associadas a possíveis contaminações da água.
- Apontar tendências de aumento/redução das concentrações dos parâmetros de qualidade no decorrer do tempo.
- Conhecer a distribuição espacial das concentrações de parâmetros relacionados à qualidade das águas em um sistema, bem como identificar possíveis comportamentos similares entre diferentes pontos de monitoramento.
- Acompanhar a eficácia das medidas de proteção da qualidade da água.
- Obter dados sobre o sistema aquífero para melhorar sua modelagem conceitual e numérica.

A representatividade e a confiabilidade do monitoramento da qualidade da água dos aquíferos dependem, dentre outros, do número e da densidade de poços de monitoramento em operação. Os custos envolvidos no monitoramento – tanto na implantação das redes, quanto na operação das mesmas – impõem restrições à quantidade dessas instalações, resultando que se recorra, frequentemente, ao uso de poços de produção para o monitoramento do aquífero (FOSTER, 2012).

Em função do número de variáveis naturais e antrópicas envolvidas e de suas variações no tempo e no espaço, o conhecimento da hidroquímica e a avaliação da qualidade das águas é tarefa relativamente complexa, exigindo levantamentos de longo prazo. Essas medições compõem as séries históricas, que constituem os programas de monitoramento hídrico e que devem ser representativas. Estes programas, essenciais para assegurar o uso sustentável do recurso ao longo do tempo, produzem, em geral, grandes conjuntos de dados, muitas vezes, difíceis de analisar e interpretar (MISHRA & COULIBALY, 2009; MOGHEIR *et al.*, 2009).

Nas águas subterrâneas, as substâncias dissolvidas apresentam-se, em sua maioria, no estado iônico. Dentre estas, encontram-se os íons chamados maiores ou fundamentais, cuja presença é muito frequente e que respondem por grande parte das características químicas observados nas águas subterrâneas. Os principais íons presentes nas águas subterrâneas são mostrados no Quadro 3, tanto os classificados como fundamentais, quanto os íons menores, e referem-se aos elementos presentes na maior parte das águas subterrâneas naturais, considerando concentrações de *baseline* – sem influência localizada de minerais-fonte específicos ou de fontes antrópicas.

QUADRO 3 – Elementos presentes na maior parte das águas subterrâneas naturais – íons fundamentais, menores e elementos- traço.

I - Íons fundamentais	
Ânions: HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} Cátions: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ Gases: CO_2 , O_2 Composto pouco ionizado-estado coloidal: SiO_2	
II - Íons menores	
Ânions: NO_3^- , NO_2^- , F^- , OH^- , S^{2-} , P, B Cátions: Fe^{2+} , Mn^{2+} , H^+ , NH_4^+ , Fe^{3+} , Al^{3+} , Ba^{2+}	Em geral, estão presentes em concentrações aproximadas entre 0,01 e 10 ppm.
III – Elementos-traço	
As, Sb, Cr, Pb, Cu, Zn, V, Hg, U, Br, I, B, Cd, Co, Li, Rb, Sr, etc.	Têm, comumente, concentrações aproximadas entre 0,0001 e 0,1 ppm.

Fonte: compilação a partir de Gastmans *et al.*, 2005; Shand & Frengstad, 2001; Bertolo *et al.*, 2007.

No Quadro 4, são resumidos os principais aspectos quantitativos de alguns dos parâmetros mais comumente monitorados na avaliação da qualidade das águas subterrâneas (SZIKSZAY, 1993; WHO, 1995; BELL, 1998; CUSTODIO & LLAMAS, 2001; SHAND & FRENGSTAD, 2001; NAVFAC, 2003; APHA, 2005; GASTMANS *et al.*, 2005; PEREIRA, 2005; MAGALHÃES, 2006; BERTOLO *et al.*, BRASIL (2008); CUNHA & NUNES (2011); BRASIL (2012);2007; e ASSIS, 2012).

QUADRO 4: Valores característicos dos parâmetros comumente monitorados nas águas subterrâneas.

PARÂMETRO	VALORES CARACTERÍSTICOS EM AQUÍFEROS
PARÂMETROS FÍSICOS	
Temperatura	Aquíferos livres e confinados pouco profundos: 25-26 °C são comuns. Aquíferos profundos: a temperatura é influenciada pelo grau geotérmico local (em média 1°C a cada 30 m).
Turbidez	Os teores são relativamente baixos de sólidos em suspensão e se um poço extrai água com significativo teor destes é, geralmente, por mau dimensionamento do filtro ou do pré-filtro ou completação insuficiente do aquífero ao redor do filtro. Exceção são alguns aquíferos cársticos e fissurais cujas aberturas das fendas podem permitir a passagem das partículas mais finas (argila, silte) aumentando assim o conteúdo dos sólidos em suspensão.
STD	Nas águas subterrâneas naturais os valores mais comuns são de até 500 mg/L. Segundo o padrão de potabilidade da OMS, o limite máximo permissível de STD na água é de 1.000 mg/L. Este mesmo valor foi fixado pela Resolução Conama N° 396/2008 e pela Portaria do Ministério da Saúde N° 2914/2011.
CE	Normalmente, as águas subterrâneas apresentam valores bem maiores do que aqueles encontrados nas águas superficiais, ainda que na mesma área, em função da interação rocha-água. A faixa de teores encontrados nestas águas é bastante variável, sendo comuns valores de centenas de µS/cm. Valores maiores do que 1.500 µS/cm podem ocorrer em aquíferos cársticos e menores do que 10 µS/cm em aquíferos com rochas como o granito.
Eh	As águas subterrâneas podem atingir valores de potencial redox superiores a 500mV, o que indica características oxidantes, mas também valores negativos (<-100mV) em ambiente com H ₂ S livre ou < -500mV em águas subterrâneas em contato com petróleo.
PARÂMETROS QUÍMICOS – GRUPO NÃO-METÁLICOS	
Alcalinidade	Águas que percolam rochas calcárias (calcita = CaCO ₃) geralmente possuem alcalinidade elevada, sendo que água altamente alcalina pode apresentar valores superiores a 2.000 mg/L de CaCO ₃ . Já os granitos e os gnaisses possuem poucos minerais que contribuem para a alcalinidade das águas subterrâneas, sendo comuns valores menores que 20 mg/L de CaCO ₃ .
Cloreto	As concentrações nas águas doces variam entre 10 a 250 mg/L, sendo mais usuais valores menores do que 200 mg/L. Segundo a Resolução Conama n° 396/2008, o limite permitido em águas de abastecimento, é de 250 mg/L, mesmo valor adotado pela Portaria MS N° 2914/2011, como limite de padrão organoléptico de potabilidade. Acima deste valor, os cloretos produzem sabor desagradável, mas não chegam a ser prejudiciais para a saúde humana. A Resolução citada estabelece limites mínimo de 100 mg/L e máximo de 700 mg/L para a irrigação e de 400 mg/L para recreação.
Fenóis	Em decorrência de sua elevada toxicidade, para os fenóis, é imposto limite máximo bastante restritivo igual a 0,001 mg/L pela Portaria MS N° 2914/2011.

(continua)

QUADRO 4: Principais aspectos relacionados a valores característicos dos parâmetros comumente monitorados nas águas subterrâneas (*continuação*)

PARÂMETRO	VALORES CARACTERÍSTICOS EM AQUÍFEROS
PARÂMETROS QUÍMICOS – GRUPO NÃO-METÁLICOS	
Dureza	A dureza da água varia consideravelmente de local para local, sendo que há aquíferos com características de dureza elevada, especialmente os cársticos. Normalmente, as águas possuem durezas entre 10 e 300 ppm de CaCO ₃ podendo, atingir 1.000 ppm e, excepcionalmente, 2.000 ppm ou mais. A Portaria N° 2914/2011 do Ministério da Saúde, limita a dureza em 500 mg/L CaCO ₃ como padrão organoléptico de potabilidade. Este padrão não é muito restritivo, já que a partir deste nível a água é classificada em “muito dura”.
Fluoreto	O flúor é um elemento que pode ocorrer naturalmente em pequenas quantidades nas águas subterrâneas, sendo que a faixa mais comum varia de 0 a 5 mg/L. Para o consumo humano, é fundamental observar os níveis indicados – de 0,75 a 0,93 mg/L, Concentrações menores acarretam a subdosagem que não traz o benefício anticárie; e concentrações maiores podem resultar em sobredosagem, associada à fluorose. A Portaria MS N° 2914/2011 fixa um limite máximo de 1,5 mg/L de fluoreto para água potável, e ainda estabelece número mínimo de duas amostragens semanais para o controle da qualidade da água tratada para abastecimento. De forma semelhante, a Resolução Conama n° 396/2008, fixa limite de 1,5 mg/L para consumo humano, de 2 mg/L para dessedentação animal e de 1 mg/L para irrigação.
Nitrato	Para avaliar se a concentração de nitrato realmente mostra contaminação antrópica, é necessário estabelecer o valor de fundo (<i>background</i>) máximo na região avaliada. Em geral, valores superiores a 5 mg/L devem ser investigados e valores maiores do que 10 podem ser considerados indicadores de contaminação. Entretanto, estes valores podem ser menores, dependendo dos valores de fundo. Tanto a Portaria MS N° 2914/2011, quanto a Resolução Conama n° 396/2008, fixam um limite máximo de 10 mg/L de nitrato medido como N, para a potabilidade da água. A Resolução Conama limita também os níveis de nitrato nas águas subterrâneas em: 90 mg/L para dessedentação animal e 10 mg/L para recreação.
pH	Normalmente os seus valores nas águas subterrâneas estão em torno de 6,5 a 8, enquanto nas águas superficiais variam entre 5,5 e 8,5.
Sulfato	Ocorre em quantidades variáveis nas águas subterrâneas naturais, sendo que a concentração varia entre 2 a 150 mg/L, podendo atingir 200 mg/L. Tanto a Portaria MS N° 2914/2011, quanto a Resolução Conama n° 396/2008, fixam um limite máximo de 250 mg/L de sulfato para a potabilidade da água. A Resolução Conama limita também os níveis de sulfato nas águas subterrâneas em: 1.000 mg/L p/ dessedentação animal e 400 mg/L p/ recreação.
PARÂMETROS QUÍMICOS – GRUPO METÁLICOS	
Alumínio	As concentrações na água subterrânea variam de 0,005 a 10 mg/L, podendo, em condições extremas, atingir 100 mg/L em águas muito ácidas (pH < 5.5). Tanto a Portaria MS N° 2914/2011, quanto a Resolução Conama n° 396/2008, fixam um limite máximo de 0,2 mg/L de alumínio para a potabilidade da água.
Bário	É um elemento raro nas águas naturais, em teores bastante variáveis, estando entre 0,0007 e 0,9 mg/L. De acordo com a Resolução Conama n° 396/2008, o limite permitido de Ba em águas de abastecimento, é de 0,7 mg/L, mesmo valor adotado pela Portaria MS N° 2914/2011.
Cálcio	A concentração de cálcio nas águas subterrâneas varia, de uma forma geral, de 10 a 100 mg/L. A quantidade de CO ₂ dissolvida depende da temperatura e da pressão, que são, portanto, fatores que vão determinar a solubilidade do bicarbonato de cálcio.
Chumbo	Os níveis encontrados em águas subterrâneas variam desde 0,0001 a 0,12 mg/L, sendo mais usuais valores entre 0,01 e 0,03 mg/L. Segundo a Resolução Conama n° 396/2008, o limite permitido de Pb em águas de abastecimento é de 0,01 mg/L, mesmo valor adotado pela Portaria MS N° 2914/2011. A Resolução estabelece também limites de 0,1; 5 e 0,5 mg/L para dessedentação animal, irrigação e recreação, respectivamente.

(continua)

QUADRO 4: Principais aspectos relacionados a valores característicos dos parâmetros comumente monitorados nas águas subterrâneas. (*continuação*)

PARÂMETRO	VALORES CARACTERÍSTICOS EM AQUÍFEROS
PARÂMETROS QUÍMICOS – GRUPO METÁLICOS	
Cobre	É comum em águas subterrâneas naturais na faixa de 0,004 a 0,35 mg/L. A água com conteúdo em cobre superior a 5 mg/L torna-se colorida e com sabor desagradável. A Portaria MS Nº 2914/2011 fixou limite em águas de abastecimento de 2 mg/L. Em outros países são admitidas concentrações de até 3 mg/L.
Ferro	As concentrações variam de 0 a 10 mg/L, sendo mais comum a faixa entre 0,1 a 2 mg/L nas águas subterrâneas naturais. Nas águas mais oxigenadas (nascentes e surgências) encontrar-se em quantidades inferiores a 0,5 mg/L. A Portaria MS Nº 2914/2011 fixa um limite máximo de 0,3 mg/L de ferro para água potável, mas com ressalvas.
Magnésio	Nas águas subterrâneas ocorre com teores entre 1 e 50 mg/L.
Manganês	Este elemento é pouco comum nos aquíferos, raramente atingindo concentrações de 1 mg/L. Normalmente está presente em teores de 0,2 mg/L ou menores e geralmente em parceria com o ferro. A Portaria MS Nº 2914/2011 fixa um limite máximo de 0,1 mg/L de manganês para água potável como padrão organoléptico, mas, como ressalva, prevê que este limite pode ser ultrapassado desde que: (1) o manganês esteja complexado com produtos químicos comprovadamente de baixo risco à saúde, conforme preconizado no art. 13 desta Portaria e nas normas da ABNT; (2) os VMP dos demais parâmetros do padrão de potabilidade não sejam violados; e (3) as concentrações de manganês não ultrapassem 0,4 mg/L. O mesmo valor para consumo humano foi definido como limite máximo pela Resolução Conama nº 396/2008, que fixa também limites de 0,05 mg/L para dessedentação animal; 0,2 mg/L para irrigação; e 0,1 mg/L para recreação.
Potássio	Nas águas subterrâneas, a concentração de Potássio varia entre 0,1 e 10 mg/L, sendo mais frequentes valores entre 1 e 5 mg/L.
Sódio	Nas águas subterrâneas, as concentrações de sódio variam entre 0,1 e 150 mg/L, sendo que há um enriquecimento gradativo deste metal a partir das zonas de recarga. Alguns autores mencionam a faixa entre 1 e 20 mg/L como sendo característica das águas subterrâneas em climas úmidos. Segundo a OMS, o valor máximo recomendável de sódio na água potável é 200 mg/L. Tanto a Portaria MS Nº 2914/2011, quanto a Resolução Conama nº 396/2008, fixam este valor como limite máximo para a potabilidade da água. A Resolução Conama limita também os níveis de sódio nas águas subterrâneas em 300 mg/L para a recreação.
Zinco	Em geral, nas águas subterrâneas, ocorre com concentrações entre 0,01 e 0,04 mg/L.

Fonte: Compilado de SZIKSZAY (1993); WHO (1995); BELL (1998); CUSTODIO & LLAMAS (2001); SHAND & FRENGSTAD (2001); NAVFAC (2003); APHA (2005); GASTMANS *et al.* (2005); PEREIRA (2005); MAGALHÃES (2006); BERTOLO *et al.* (2007); BRASIL (2008); CUNHA & NUNES (2011); BRASIL (2012); e ASSIS (2012).

3.3 Tratamento de dados de monitoramento de qualidade das águas subterrâneas

A avaliação da qualidade das águas pode ser feita aliando a análise estatística univariada à multivariada, e utilizando representações gráficas que facilitem a interpretação dos resultados, além da extração de informações referentes às variações temporais e espaciais dos parâmetros de qualidade.

Dentre as técnicas de avaliação de resultados de monitoramento utilizadas, podem ser destacadas (PARALTA *et al.*, 2004; LEE *et al.*, 2004; POLITANO, 2009; GÜLER *et al.*, 2012):

- Técnicas estatísticas univariada e bivariadas – em que o objetivo é a descrição e síntese de uma variável ou de pares de variáveis entre si.
- Técnicas geoestatísticas e mapas de análise geoespacial.
- Técnicas estatísticas multivariadas – subdividem-se em métodos classificatórios em que o objetivo é a classificação hierárquica e em métodos descritivos, para descrição estrutural (os mais comuns são: Análise de Componentes Principais – ACP e Análise Discriminante – AD).
- Análise de tendências – em que o objetivo é estimar tendências sazonais num conjunto de indivíduos com base na variação de uma ou mais propriedades hidroquímicas.
- Algoritmos de otimização – em que se pretende aperfeiçoar (reduzir) as redes de monitoramento por meio de eliminação de estações redundantes.
- Análise de contexto – em que se busca relacionar o uso e ocupação do solo ou impactos pontuais com os valores dos parâmetros de qualidade da água subterrânea (SCANLON *et al.*, 2005; CARLSON *et al.*, 2011).

Dentre estas técnicas optou-se por enfatizar algumas análises geoespaciais e técnicas estatísticas multivariadas, parte das quais foram empregadas no presente trabalho.

3.3.1 Análises geoespaciais

Análises geoespaciais relacionadas à qualidade das águas subterrâneas têm sido empregadas em diversos trabalhos, podendo ser destacados: estudo no estado de Yucatán/México para identificar e caracterizar zonas com qualidades distintas de água subterrânea cárstica para uso agrícola a partir de mapas e uso de Krigagem (DELGADO *et al.*, 2010); pesquisa sobre a degradação por salinização das águas de um aquífero no deserto central do Irã decorrente de bombeamentos clandestinos para uso agrícola em região em que ocorrem intrusão salina e conexão com aquífero profundo (BAGHVAND *et al.*, 2010); outro trabalho em que também se aplicou o *software MapInfo* em um aquífero no sul da Índia para demonstrar impacto antrópico advindo de indústrias (PIUS *et al.*, 2012); e uma pesquisa em que foi estimada a distribuição espacial de boro, cloro, CE e RAS (razão de adsorção de sódio) nas águas subterrâneas de um aquífero no norte do Irã (SAHEBJALAL, 2012). Destaca-se também um estudo que compara o desempenho do uso de Krigagem com a técnica Multi-gaussiana na modelagem probabilística da distribuição espacial das concentrações de arsênio em águas subterrâneas no sudeste de Michigan-USA (GOOVAERTS *et al.*, 2005).

Delgado e colaboradores (2010) estudaram as águas subterrâneas na Península de Yucatán, buscando avaliar a adequação das mesmas para uso na irrigação. Os autores mediram íons dominantes e CE e calcularam RAS, salinidade potencial e salinidade efetiva para 113 amostras de diferentes poços de abastecimento. A partir da matriz de dados georeferenciados, os pesquisadores fizeram: (a) análise exploratória dos dados (estatística descritiva, histogramas de frequência, consistência e detecção de valores atípicos); (b) substituição de dados censurados pelos respectivos valores logaritmizados; (c) auto-correlação espacial, que consiste em medir a semelhança de uma variável dentro de uma determinada área. Os resultados das técnicas estatísticas permitiram selecionar os íons e parâmetros mais indicados para mapear a variabilidade espacial da qualidade das águas subterrâneas para uso na produção agrícola, tendo sido usada a salinidade efetiva – SE - como parâmetro para estudar regiões de qualidade do aquífero, mapeado a partir do Arcgis 9 (ESRI, 2004). Concluiu-se que foi eficaz a salinidade efetiva – SE – foi o parâmetro mais adequado para ser usado na avaliação da distribuição espacial dos demais parâmetros e, dentre as cinco regiões com SE diferenciados, três delas tiveram águas inadequadas para uso na agricultura, uma teve qualidade média e uma teve qualidade adequada.

Baghvand e colaboradores (2010) estudaram a qualidade hidroquímica de um aquífero nas adjacências da região central do Irã até o centro do deserto de Kavir, com relação a íons dominantes e CE. Os autores fizeram balanço iônico, aplicaram a análise de cluster e procederam a análises geoestatísticas, gerando mapas de isotores para cada parâmetro analisado. Concluíram que os resultados para as águas subterrâneas na área de estudo, as quais são, predominantemente, do tipo cloretada sódica ($\text{Na}^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{K}^+ : \text{Cl}^-$), apresentaram compatibilidade entre a categorização da AC e os mapas de distribuição espacial. A distribuição espacial de ânions e cátions, bem como a CE obedecem a um padrão crescente no sentido leste, do escoamento que prevalece no aquífero. Concluíram também que as águas avaliadas foram enquadradas, segundo o diagrama de Schoelle, em diferentes categorias conforme o uso: para o consumo humano, foram não adequadas, ruins, não aceitável e que pode ser consumida temporariamente. Já com relação à irrigação, com exceção de quatro amostras que mostram risco de salinidade alto, todas as demais foram não aplicáveis na irrigação devido a valores extremamente elevados de CE.

Estudo semelhante foi conduzido por Sahebjalal (2012), buscando avaliar a variação espacial da qualidade das águas subterrâneas em um aquífero central no Irã – na planície de Bahadoran, em relação ao uso das águas na agricultura. O pesquisador partiu de resultados de concentração das águas de 76 poços, para a CE e dos íons B^{3+} e Cl^- e calculou a RAS – razão de adsorção de sódio – para cada amostra. O autor utilizou métodos geoestatísticos para mapear as concentrações dos parâmetros no aquífero e, aplicando critérios da FAO, concluiu que 48 e 52%, respectivamente, da área de estudo possuem águas subterrâneas enquadradas nas classes de restrição grave e de restrição leve a moderada, para fins de irrigação, com relação à CE. Além disso, as concentrações de boro e cloreto foram investigadas e os mapas de isoconcentração mostraram suas variações e permitiram estabelecer as áreas de restrições à infiltração. Segundo os pesquisadores, os mapas gerados no estudo apontaram que, em 66% da área, a água subterrânea não tem nenhuma restrição, enquanto que, em 11% da área, as águas subterrâneas apresentaram baixa a moderada restrição para infiltração e, em 23% da área, tiveram limitação grave. Previamente à krigagem, foi feita a autocorrelação espacial e foram retiradas tendências a partir dos valores obtidos pelos variogramas experimentais, bem como pela aplicação de modelo melhor ajustado (tendo sido selecionado o modelo esférico).

Pius e colaboradores (2012) propuseram o uso de um índice de qualidade das águas subterrâneas para consumo humano denominado WQI obtido a partir dos parâmetros pH,

STD, dureza total, dureza de cálcio, dureza de magnésio, alcalinidade, cloreto, nitrato e sulfato. Os pesos de cada parâmetro foram inversamente proporcionais aos padrões recomendados e foi feita escala de modo que o valor máximo admissível para o índice foi igual a 100 – valor máximo para que a água seja considerada adequada para consumo humano. Foram elaborados mapas de distribuição espacial para as concentrações dos parâmetros individualmente e também para o índice. Foi feita também regressão múltipla utilizando o *software* SPSS 15.0 para determinar os fatores que contribuem para o índice de qualidade da água. Os resultados obtidos indicaram que a maior parte das amostras de água excedem os limites legais admissíveis para os parâmetros que compõem o índice, o que se refletiu no próprio índice utilizado. Concluíram que o sistema SIG constitui ferramenta eficaz de camadas temáticas digitais e para o mapeamento da distribuição espacial de parâmetros de qualidade da água e que o controle de nitrato e magnésio e cálcio seriam suficientes para melhorar a qualidade da água para o consumo humano.

Em nível nacional, foi feito um estudo em Sergipe nas águas de aquífero na bacia do rio Piauí, conduzido por Amorim e colaboradores (2010). Foi efetuada uma caracterização hídrica qualitativa para conhecer a distribuição espacial das fontes de água viáveis para uso especialmente na irrigação. Foram avaliados os riscos potenciais relativos à salinização e à sodificação de solos, à toxicidade de íons específicos às culturas e à obstrução em sistemas de irrigação localizada. O estudo partiu de dados secundários de 278 poços e contemplou: análise de consistência dos dados (gráficos de dispersão, análises de relações conhecidas entre variáveis, balanço iônico), análise exploratória (estatística descritiva) e o cálculo dos índices de saturação de Langelier - ISL e das razões de adsorção de sódio – RAS para as amostras. Os pesquisadores utilizaram o módulo *GeoStatistical Analyst* do *software ArcGIS* para produção dos mapas e fizeram o cruzamento e fatiamento, segundo os limites das classes de restrição para uso da água para irrigação estabelecidos pela FAO, tendo sido gerados novos mapas com regiões classificadas de acordo com os riscos associados a este uso. Verificaram, assim, que as águas subterrâneas na região apresentam boas condições para uso na irrigação, com tendência de aumento na concentração de sais das águas no sentido centro-cabeceiras. Com base na análise conjunta de RAS e CEa (condutividade elétrica aparente), que avalia o risco de sodificação do solo, ou seja, de redução da capacidade de infiltração de água no solo, os pesquisadores verificaram que a maior frequência de águas se situou na classe de restrição leve a moderada (46,8%), com aproximadamente 19% das águas estando incluídas na classe de restrição severa.

No Quadro 5, foram resumidos os principais aspectos pertinentes às pesquisas mencionadas anteriormente, bem como as principais conclusões de cada uma delas, para a literatura internacional.

QUADRO 5: Resumo das referências citadas referente à aplicação de geoestatísticas a dados de qualidade de aquíferos – principais aspectos metodológicos e conclusões dos estudos (literatura internacional).

Autor(es)/Ano	Local	Principais aspectos da pesquisa	Principais conclusões do estudo
Delgado <i>et al.</i> , 2010	México – aquífero cárstico da península de Yucatán	<ul style="list-style-type: none"> • Dados primários • 113 pontos de amostragem; cinco parâmetros; uma campanha • Geoestatística seguida da krigagem (GS⁺ 2006 e ArcGIS 9) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. A geoestatística permitiu concluir que a salinidade efetiva foi o parâmetro que melhor explicou a distribuição espacial dos parâmetros. 2. Três das cinco regiões com qualidade de água diferenciada em relação à salinidade efetiva são inadequadas para uso na agricultura. Houve uma região com águas adequadas e uma região com qualidade média.
Baghvand <i>et al.</i> , 2010	Irã - Aquífero das adjacências do Irã central até o deserto central de Kavir	<ul style="list-style-type: none"> • Dados primários • 20 pontos de amostragem; 12 parâmetros; uma campanha • Geoestatística associada a AC (softwares Aqqa, Excel, SPSS11, GWW e MVSP no processamento dos dados) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. AC foi coerente com os mapas de isoteores 2. Predomínio de águas sódicas cloretadas, com alto risco de salinidade impróprias para uso na agricultura e no consumo humano. 3. Concentração iônica no sentido do fluxo predominante do aquífero. 4. Autores sugerem estudos futuros de recarga artificial do aquífero para melhoria da qualidade das águas.
Pius <i>et al.</i> , 2012	Sul da Índia - área industrial de Peenya e imediações no Distrito de Bangalore	<ul style="list-style-type: none"> • Dados secundários • área de 40 km² aquífero granítico e de gnaisses – 10 a 60 m de espessura • 31 poços; 9 parâmetros; uma campanha; • aplicação do software MapInfo (GIS). 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Houve coerência entre o índice de qualidade das águas subterrâneas e os principais parâmetros usados, com relação à distribuição espacial. 2. A águas estudadas são impróprias para consumo humano, sendo necessário adequá-las por meio de tratamento para remoção do cálcio e do magnésio (abrandamento para redução da dureza), bem como do nitrato.
Sahebjalal, 2012	Norte do Irã – aquífero da planície de Bahadoran	<ul style="list-style-type: none"> • Dados secundários; área de 112 km²; região árida e semiárida • 76 poços; 7 parâmetros; uma campanha • Uso de geoestatística e krigagem (GIS). 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Determinação de regiões com restrição para uso na irrigação, tanto de risco às culturas, quanto risco de infiltração das águas. 2. O autor conclui pela necessidade de um monitoramento sistemático e contínuo.

3.3.2 Estatísticas multivariadas

A estatística multivariada aplicada ao monitoramento ambiental vem sendo frequentemente utilizada no tratamento dos resultados obtidos a partir de análises físico-químicas, com o uso de ferramentas computacionais que permitem explorar estes dados para verificar a existência de similaridades entre as amostras.

O reconhecimento de padrões, uma das principais vertentes do uso da estatística multivariada, viabiliza a obtenção de mais informações quando comparado com os procedimentos univariados. Dentre as técnicas multivariadas, destacam-se: a análise por agrupamento ou análise de *cluster* (AC), a análise de componentes principais (ACP), a análise fatorial (AF) e a análise discriminante (AD). A AC é uma técnica não supervisionada multivariada usada para classificar objetos em categorias ou clusters com base na sua proximidade ou semelhança, sendo que a abordagem mais comum é aquela em que os clusters são formados em sequência, começando com os pares mais semelhantes de objetos e passando a formar aglomerados maiores, passo a passo. A representação gráfica obtida é chamada de dendograma, um gráfico bidimensional independentemente do número de variáveis do conjunto de dados.

A utilização da ACP visa reduzir a dimensionalidade do conjunto de dados original, preservando a maior quantidade de informação (variância) possível. Essa redução é obtida por meio do estabelecimento de novas variáveis ortogonais entre si, denominadas componentes principais (CPs). Organizadas em ordem decrescente de importância, as CPs são combinações lineares das variáveis originais. Os gráficos obtidos representam as amostras em um sistema cartesiano onde os eixos são as CPs. Tanto a AC, quanto a ACP permitem a interpretação multivariada de conjuntos de dados grandes e complexos por meio de gráficos bi ou tridimensionais que expressam as inter-relações que podem existir entre as variáveis, facilitando a interpretação multivariada do comportamento das amostras.

A AF fornece informações sobre os parâmetros mais significativos, que descrevem todo o conjunto de dados processados para redução dos mesmos com perda mínima da informação original. É uma técnica poderosa para reconhecimento de padrões e tenta explicar a variância de um grande conjunto de variáveis intercorrelacionadas e transformá-lo em um conjunto menor de variáveis independentes.

A análise discriminante – AD – fornece estatísticas de classificação de amostras e é realizada com prévio conhecimento da associação de objetos para grupos específicos ou clusters (INVERNIZZI, 2001; MINGOTI, 2005).

Dentre os diversos trabalhos científicos similares, alguns inclusive aplicando técnicas estatísticas multivariadas a dados de monitoramento físico-químico e geoquímico em aquíferos, podem ser citados, em nível internacional: investigações em aquífero arenoso na Nigéria (OLOBANIYI & OWOYEMI, 2006); análise de características geoquímicas de aquífero na Índia (SUVEDHA *et al.*, 2009); avaliação de aquífero no Irã (AGHAZADEH & MOGADDAM, 2011); e investigações em águas subterrâneas profundas na Tunísia (KETATA *et al.*, 2011). Também foram levantados estudos com propostas inovadoras como o uso de modelo de árvore binária de decisão a índices hidroquímicos de águas subterrâneas em Israel (LITAOR *et al.*, 2010) e identificação, em escala regional, da interação entre aquífero e águas superficiais a partir de estatística multivariada em dados hidroquímicos na Nova Zelândia (GUGGENMOS *et al.*, 2011).

No Brasil, foram feitos poucos trabalhos semelhantes, tendo sido encontrados três estudos no Ceará: um executado no perímetro irrigado do Baixo Acaraú (ANDRADE *et al.*, 2010); um segundo realizado nas águas subterrâneas da bacia do Banabuiú (FERNANDES *et al.*, 2010) e uma pesquisa sobre hidroquímica na qualidade das águas subterrâneas na bacia hidrográfica do Salgado (SALGADO *et al.*, 2011).

Andrade e colaboradores (2010-a) partiram da premissa de que a identificação de similaridades na qualidade das águas subterrâneas pode ajudar a reduzir o número de pontos de monitoramento e utilizaram resultados de monitoramento mensal pelo período de 27 meses, obtido por meio de amostragens da água subterrânea em dez poços distribuídos aleatoriamente na área do Distrito de Irrigação do Baixo Acaraú (Ceará). Foram analisados 14 parâmetros e os pesquisadores concluíram, a partir da aplicação da análise de agrupamento aos dados obtidos, que dois poços de monitoramento se distinguiram dos demais e também apresentaram dissimilaridade entre si. Eles concluíram ainda que a concentração de fósforo esteve acima do limite estabelecido para consumo humano ao longo do monitoramento. Em outro trabalho, Andrade e colaboradores (2010-b) aplicaram no mesmo período, na mesma região e para os mesmos parâmetros, as técnicas estatísticas de análise fatorial – AF e de análise de componente principal - ACP aos resultados de nove dos poços de monitoramento.

A ACP demonstrou que três componentes – Na^+ , Cl^- e NO_3^- – explicaram 93% e 84% da variância total do conjunto de dados das regiões A1 e A2, respectivamente.

Estudo muito semelhante foi conduzido por Fernandes e colaboradores (2010), buscando identificar similaridades das águas subterrâneas na bacia do Banabuiú, no semiárido cearense. Empregando análise de agrupamento em dados de qualidade de 66 poços cadastrados pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), eles investigaram nove parâmetros. O período de monitoramento foi de 1995 a 2009, sendo que as amostragens foram mensais em 2009 e concentradas nos meses de junho a novembro nos demais anos. Os resultados da AC agruparam os poços de monitoramento em três grupos estatisticamente distintos. Os íons cloreto, magnésio, potássio, sódio e a dureza total foram determinantes na definição dos grupos.

O trabalho desenvolvido por Salgado e colaboradores (2011) também teve como objetivo identificar a similaridade das variáveis hidroquímicas na qualidade das águas subterrâneas em uma bacia hidrográfica no Ceará – Bacia do Salgado, além de classificar estas águas pelo emprego do Diagrama de Piper. O estudo foi desenvolvido a partir de dados secundários, da CPRM, obtidos pelo monitoramento em 24 poços subterrâneos distribuídos por toda a área de drenagem da bacia estudada e por um período de dez anos. Foram monitorados dez parâmetros. De acordo com os pesquisadores, dois grupos foram formados pelo emprego da análise de agrupamento, sendo estes independentes quanto às características hidrológicas e semelhantes quanto à formação hidrogeológica, sendo que a qualidade das águas estudadas não apresentou interferência temporal. Duas componentes foram responsáveis pela estrutura da qualidade das águas explicando 78,3% da variância total.

Na Nigéria, Olobaniyi & Owoyemi (2006) estudaram as águas subterrâneas na parte oeste do delta do rio Níger, mais especificamente o aquífero deltaico arenoso da Planície de Warri e imediações. Foram examinadas as fácies hidroquímicas destas águas, tendo sido mapeada sua distribuição e explicados os processos que controlam as várias fácies. Os dados foram obtidos a partir da análise de 60 amostras de água de poços na área em estudo, para dez parâmetros. Os dados obtidos foram submetidos à análise fatorial no modo R. Três fatores foram extraídos: fator 1 que inclui K^+ , Na^+ , Cl^- e CE e reflete a influência da intrusão salina de água da maré no rio Warri e consequentes infiltrações para o aquífero; fator 2 que tem valores elevados de Mg^{2+} , Ca^{2+} , HCO_3^- e pH e representa os processos de recarga de água da chuva natural e interação rocha/ água-solo; e o fator 3 que inclui SO_4^{2-} e pode ser relacionado com a

dissolução dos sulfetos de turfa interestratificada dentro da formação geológica, além de fontes antrópicas, tais como emissões veiculares e de processos de refino de petróleo. A interpretação dada pelos pesquisadores é de que a concentração iônica na água diminui ao se afastar das margens do rio o que indicaria que a qualidade melhora nas águas subterrâneas mais distantes do curso d'água. Concluiu-se que foi eficaz a análise fatorial na avaliação dos processos hidroquímicos no litoral e nas áreas industriais.

Na Índia, Suvedha e outros pesquisadores (2009) estudaram a hidrogeoquímica do sistema aquífero rochoso-sedimentar Mio-Plioceno na área da bacia Veeranam a partir de um conjunto de dados geoquímicos de amostras de água coletadas em 52 locais ao longo de 963,86 km². Foram analisados 13 parâmetros. Dois métodos de estatística multivariada, análise de agrupamento hierárquico (AC) e análise fatorial (AF) – modos R e Q, foram aplicados. Os autores concluíram que: (1) a aplicação das técnicas AF e AC aos dados mostrou que a interação da água-rocha é o principal mecanismo responsável pela salinidade da água subterrânea na área de estudo; (2) as águas subterrâneas são, principalmente, do tipo cálcica-bicarbonatadas, apontando para a dureza elevada; (3) há contaminação antropogênica em ambos os aquíferos, por poluição local; (4) tanto a análise fatorial modo-Q, quanto a análise de agrupamento indicaram que a troca entre a água do rio e a água subterrânea nas proximidades do mesmo desempenha um papel dominante na evolução hidroquímica das águas subterrâneas; (5) a análise fatorial no modo-R mostrou que o Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻ e HCO₃⁻ contribuem para a maior parte da condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos e dureza total nas águas subterrâneas; (6) a análise fatorial modo- R indicou a não mistura ou mistura parcial de diferentes tipos de águas subterrâneas; (7) a interação água-rocha como resultado dos depósitos lodosos sobre a formação argilosa nas inundações seria a principal causa para a classificação do grupo 2, sendo que o mapa de classificação por agrupamento revelou que 58% da área de estudo tem origem neste grupo.

No noroeste do Irã, foi feito um estudo sobre os recursos hídricos subterrâneos da planície de Harzandat na Província Leste do Azerbaijão, entre as cidades de Marand e Jolfa, os quais são usados para abastecimento e para irrigação. As principais unidades litológicas da área estudada consistem de calcário, dolomita, xisto conglomerado e rochas ígneas. Para avaliar a qualidade das águas subterrâneas na área de estudo, 36 amostras foram coletadas, tendo sido analisados os principais íons (oito). Foram calculados os seguintes índices químicos: razão de adsorção de sódio (RAS), percentagem de sódio, carbonato de sódio residual (CSR) e índice

de permeabilidade. Com base nos resultados analíticos, concluiu-se que as águas subterrâneas na região são, em geral e naturalmente, muito duras, salobras, alcalinas e com grau de salinidade variando de elevado a muito elevado. A abundância dos principais íons é como se segue: $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$ e $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$. A qualidade química das águas subterrâneas está relacionada com a dissolução de minerais, troca iônica e o tempo de residência das mesmas em contato com os materiais rochosos. Os resultados do cálculo do índice de saturação, obtido com uso do programa de computador PHREEQC, mostrou que quase todas as amostras de água eram supersaturadas em relação aos minerais de carbonato (calcita, dolomita e aragonita) e subsaturadas em relação aos sulfatominais (gesso e anidrita). A avaliação das amostras de águas subterrâneas na área de estudo indicou que estas são quimicamente impróprias para consumo humano e para usos agrícolas (AGHAZADEH & MOGADDAM, 2011).

Na região de Gabes, no sudeste da Tunísia, foram pesquisadas as águas subterrâneas que constituem as principais fontes de abastecimento de água potável para a agricultura e para a indústria na região, dada a escassez de água de superfície. O trabalho objetivou estudar a evolução espacial e temporal da hidroquímica e identificar os fatores e fenômenos que regem os parâmetros de qualidade destas águas subterrâneas, com base em (1) análise integrada de parâmetros físico-químicos; (2) uso de Sistema de Informação Geológica (GIS); e (3) métodos estatísticos (análises de correlação bivariadas, análises de tendência usando Teste de Mann-Kendall e regressão robusta de Thiel-Sen, além da análise de componentes principais - ACP e da análise de cluster - AC). O monitoramento foi feito durante o período de 1995-2003 a partir de nove poços no aquífero profundo Gabes-sul, tendo sido coletadas duas ou três amostras de dez parâmetros de água (inverno e verão) por ano. Segundo os pesquisadores, a análise química mostrou que, durante o período de monitoramento, a salinidade e as concentrações dos elementos principais variaram pouco com o tempo e diminuíram na direção do fluxo das águas subterrâneas. Concluíram ainda que as águas são, principalmente, do tipo SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ e Ca^{2+} . Sua composição química está relacionada com a litologia do aquífero, com sua origem e com as condições de exploração. Os resultados mostraram que as concentrações de flúor excedem o limite máximo admissível de 1,5 mg/L, estabelecido pela Organização Mundial da Saúde (OMS). Portanto, as águas desses poços devem ser desfluoretadas antes da utilização para consumo humano (KETATA *et al.*, 2011).

Alguns estudos para avaliação da qualidade das águas subterrâneas abrangem mais do que a estatística multivariada, como é o caso da modelagem que permite simulações em diferentes cenários. De acordo com Litaor e colaboradores (2010), os índices hidroquímicos são comumente usados para averiguar as características dos aquíferos, problemas de salinidade, fontes antropogênicas de poluição e a gestão de recursos hídricos, dentre outros. Assim, eles conduziram um estudo para testar a aplicabilidade de um modelo de árvore binária de decisão na avaliação de um aquífero utilizando índices hidroquímicos como entrada. Testaram o modelo usando dados coletados a partir de nascentes do rio Jordão, em Israel. A pesquisa descreve que a avaliação do modelo consistiu de vários níveis de complexidade, desde a simples separação da água do tipo magnésiana bicarbonatada cálcica dos aquíferos cársticos até a separação mais difícil de água sódica bicarbonatada cálcica que flui em regiões de aquíferos basálticos.

Alguns autores citam que a identificação das áreas de interação entre águas subterrâneas e superficiais é crucial para uma gestão ambiental eficaz, porque essa interação é conhecida por influenciar quanti-qualitativamente a água. Em um trabalho desenvolvido na Nova Zelândia, pesquisadores aplicaram estatística multivariada e hidroquímica no vale de Wairarapa, buscando identificar os locais e os mecanismos de interação de águas subterrâneas e águas de superfície. Foram aplicadas análise de agrupamento (AC) e análise de componentes principais (ACP) a valores de mediana em locais específicos (22 pontos de água de superfície e 246 pontos de águas subterrâneas) e para oito parâmetros. Os pontos de monitoramentos das águas superficiais e subterrâneas foram agrupados em três a sete grupos identificados pela AC, tendo sido feita a inferência de que as semelhanças na hidroquímica indicam interação das águas superficiais e subterrâneas. A ACP e os gráficos *box-plot* mostraram que os grupos foram amplamente diferenciados em função das concentrações de sólidos dissolvidos, potencial redox e proporção de íons principais. Águas subterrâneas com características de superficiais (aeróbicas), localizadas nas proximidades de alguns trechos de rios, foram agrupadas com águas de superfície similares do tipo Ca-HCO₃, indicando potencial de recarga de aquíferos por estes sistemas fluviais. Águas subterrâneas que exibem assinatura química de recarga de chuva tiveram maior relação de Na⁺ em comparação com o Ca²⁺, relação mais alta de Cl⁻ em relação a HCO₃⁻ e um acúmulo de NO₃⁻ e foram agrupadas com as águas superficiais próximas, sugerindo a contribuição de fluxo de base das águas subterrâneas para estes sistemas fluviais e a transferência desta assinatura química de aquíferos subjacentes. As técnicas hidroquímicas utilizadas no estudo revelaram que não há interação de águas

superficiais e subsuperficiais em algumas regiões da área de estudo, especificamente onde há águas subterrâneas profundas anóxicas, com alto teor de sólidos totais dissolvidos e com uma assinatura Na-Cl distinta, indicando não haver nenhuma relação aparente com a água de superfície. A hidroquímica inferida a partir da AC e da ACP foi consistente com medições anteriores de ^{18}O , idade da água e excesso de ar, segundo os autores. A pesquisa conclui que as estatísticas multivariadas podem ser usadas como um método rápido para identificar as interações entre as águas subterrâneas e as águas de superfície em escala regional, utilizando conjuntos de dados hidroquímicos existentes (GUGGENMOS *et al.*, 2011).

Um breve resumo das pesquisas mencionadas, com os principais aspectos dos estudos e principais conclusões é apresentado no Quadro 6.

QUADRO 6: Resumo das referências citadas e que tratam da aplicação de técnicas estatísticas multivariadas a dados de qualidade de aquíferos – principais aspectos metodológicos e conclusões dos estudos (literatura internacional).

Autor(es)/ Ano	Local	Principais aspectos da pesquisa	Principais conclusões do estudo
Olobaniyi & Owoyemi, 2006	Nigéria - aquífero deltaico arenoso da Planície de Warri e imediações	<ul style="list-style-type: none"> • Dados primários. • Formações com espessuras de 1.000 e 2.000 m. • 60 pontos de amostragem; 10 parâmetros; uma campanha. • Foram estudadas as fácies hidroquímicas das águas e utilizada a AF no modo R (programa estatístico) e GIS 	<ol style="list-style-type: none"> 3. Composição química é relacionada com a litologia e a origem do aquífero e com as condições de exploração (afastamento do rio resulta na diminuição de íons e melhoria da qualidade). 4. As concentrações de flúor tornam as águas impróprias para consumo humano.
Suvedha <i>et al.</i> , 2009	Índia - Aquífero rochoso-sedimentar Mio-Plioceno na área da bacia Veeranam	<ul style="list-style-type: none"> • Dados primários; dois aquíferos em área de cerca de 900 km². • 52 pontos de amostragem; 13 parâmetros; uma campanha. • Foram utilizadas AC e AF nos modos Q e R (software Statistica 6). 	<ol style="list-style-type: none"> 5. A aplicação de AC e AF aos dados mostrou que a interação água-rocha é o principal mecanismo que leva à salinidade da água. 6. Predomina água bicarbonatada cálcica c/ elevada dureza. 7. Há contaminação antropogênica identificada em ambos os aquíferos, devido a entradas pontuais de poluição. 8. A troca entre a água do rio e a água subterrânea desempenha um papel dominante na evolução hidroquímica.
Aghazadeh & Mogaddam, 2011	Noroeste do Irã aquíferos da planície de Harzandat na Província leste do Azerbaijão – rio Aras	<ul style="list-style-type: none"> • Dados primários; região semiárida com 78,6 km². • Aquífero com espessuras entre 65 e 170 m, explota-se cinco milhões de m³/ano. • 36 poços profundos; 11 parâmetros; uma campanha. • Foram estudadas as fácies hidroquímicas destas águas, por correlações e análises de índices. 	<ol style="list-style-type: none"> 3. As águas subterrâneas na região são naturalmente, muito duras, salobras, com grau de salinidade variando de elevado a muito elevado e alcalinas. 4. A qualidade está interrelacionadas com a dissolução de minerais, troca iônica e o tempo de residência das mesmas em contato com as rochas. 5. As águas são: supersaturadas em relação aos minerais de carbonato (calcita, dolomita e aragonita) e subsaturadas em relação aos sulfatominais (gesso e anidrita). 6. As águas são quimicamente impróprias para consumo humano e para usos agrícolas devido à elevada salinidade.
Ketata <i>et al.</i> , 2011	Sudeste da Tunísia - Região de Gabes	<ul style="list-style-type: none"> • Dados secundários; região árida costeira com 550 km². • Aquífero profundo com elevado nível de fluoreto, explota-se 41 milhões de m³/ano; • 9 poços; 11 parâmetros; uma campanha; • Foram feitos: análise de correlação bivariada, análise de tendências, AC, ACP e GIS. 	<ol style="list-style-type: none"> 3. A salinidade e as concentrações dos elementos principais variaram pouco com o tempo, e diminuem na direção do fluxo das águas. 4. As águas são, principalmente, dos tipos sulfatada, cloretada, sódica e cálcica. 5. A composição química varia com a litologia do aquífero, com sua origem e com as condições de exploração. 6. As concentrações de flúor excedem o limite máximo admissível de 1,5 mg/L da OMS, embora as mesmas não sejam desfluoretadas antes da utilização para consumo humano.

3.3.3 Análise da qualidade das águas subterrâneas na região de estudo

Há relativamente poucos trabalhos sobre qualidade das águas subterrâneas na região norte mineira. Parte destes trabalhos está relacionada à análise da adequação das águas para fins de irrigação, especialmente na região de Jaíba e de Janaúba. A avaliação da qualidade, nestes casos, enfatiza aspectos técnicos pertinentes à viabilidade da aplicação das águas subterrâneas nos sistemas de aspersão e no solo. Estas pesquisas consideram, dentre outros aspectos, a tendência da água à corrosão ou dissolução de depósitos cálcicos por meio dos índices de estabilidade IE e IS. Quando o IS – índice de saturação de CaCO_3 em solução de Langelier – é negativo há tendência à corrosão e, quando é positivo, tendência para formação de precipitados e de causar obstruções.

Silva & Carvalho (2004), ao estudarem a água de 50 poços tubulares em propriedades de bananicultores em Janaúba mediram valores médios de pH, CE, razão de adsorção de sódio (RAS), alcalinidade de bicarbonato, Sódio, Cálcio, Magnésio e IS e calcularam os valores médios de pHc e de IE. Concluíram que as águas subterrâneas da região estavam em uma condição de transição entre isenção de problemas e corrosão leve, o que atribuíram à proximidade de zonas limítrofes. Nunes e colaboradores (2008) mediram e calcularam os mesmos parâmetros e chegaram a conclusões semelhantes, ao estudarem a qualidade de água da região de Janaúba e Jaíba em 10 poços tubulares. De acordo com os autores, as águas subterrâneas se mantiveram classificadas como isentas de problemas de precipitação ou de corrosão.

Em 2009, Ribeiro e colaboradores conduziram estudos similares na mesma região e concluíram que as águas têm mais tendência à precipitação (obstrução) do que à corrosão. A partir dos valores médios de IS ($> 0,3$) e de IE (~ 6), os autores concluíram que 85% das águas analisadas têm caráter precipitante, porém próximo da neutralidade e recomendaram a correção das mesmas por uso de soluções ácidas. Os três estudos mostraram valores físico-químicos relativamente próximos, com pH variando entre 7,0 e 7,2 e CE entre 900 e 1.200 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Foram identificados trabalhos direcionados à pesquisa hidroquímica na bacia do rio São Francisco. Exemplos são aqueles relacionados à ocorrência e concentrações de fluoreto nas águas subterrâneas e a incidência de fluorose dentária associada, desenvolvidos por Menegasse e colaboradores (2004); Velásquez e colaboradores (2009); e por Viglio e

colaboradores (2011) na região noroeste da UPGRH SF10, e os trabalhos que investigaram as características hidroquímicas gerais das águas subterrâneas, tanto na bacia do São Francisco como um todo, desenvolvido por Pinto & Martins-Neto (2001), quanto na região de Verdelândia, Varzelândia e Jaíba, realizado por Santos e colaboradores (2010).

Localmente, verificou-se ocorrência de flúor acima dos padrões de potabilidade em poços que exploram do sistema aquífero Bambuí, sendo sua origem atribuída à dissolução do mineral fluorita presente nos calcários provenientes dos sedimentos do Grupo Bambuí, associada à provável presença de flúor-apatitas em camadas de ritmitos enriquecidas em fósforo da Formação Serra da Saudade formando a base da Serra do Jaíba. Parece haver grande influência das estruturas geológicas no teor de fluoreto encontrado nessas águas, sendo que no aquífero cárstico-fissurado, observou-se que o fluxo das águas infiltradas é facilitado ao longo das fraturas abertas (distensivas) as quais propiciam maiores vazões com menores teores de fluoreto dissolvido. Segundo os autores, o contrário ocorre com as fraturas compressivas que propiciam baixas vazões aos poços que as interceptam e maiores teores de flúor nas águas. Na região rural do município de São Francisco (MG), a ocorrência de fluorose dentária foi considerada endêmica, tendo sido medidas concentrações de fluoreto de até 3,9 mg/L, o que se agrava pelo fato de predominar o abastecimento por poços (MENEGASSE *et al.*, 2004; VIGLIO *et al.*, 2011).

Viglio e colaboradores (2011) avaliaram as ocorrências superficiais de anomalias de flúor com base em estudos na região no âmbito do Projeto Geoquímica Multiusos - em que foram feitos levantamentos regionais de baixa densidade, pelo Serviço Geológico do Brasil, tanto em sedimentos de fundo e de solo, como de íons em águas superficiais. Os autores delimitaram as áreas de ocorrência de anomalias de flúor nas águas superficiais e em sedimentos/solos na região e as sobrepuseram a mapa geológico simplificado.

Com relação às características hidroquímicas das águas subterrâneas do sistema aquífero Bambuí, alguns autores diferenciaram aquelas originadas do carste e do cárstico-fissurado. De acordo com estes estudos, no primeiro grupo, as águas predominantes seriam as do tipo bicarbonatadas cálcicas e bicarbonatadas magnesianas, com predomínio dos tipos cálcicos, havendo caráter levemente alcalino (pH médio de 7,8) e condutividade elétrica - CE média de 436 μ S/cm. A alcalinidade média foi de 210 mg/L e houve dureza total elevada (média de 220 mg/L). Na região do cárstico-fissurado, as águas predominantes foram as do tipo bicarbonatadas magnesianas, bicarbonatadas sódicas e mistas, também com caráter alcalino

(pH médio de 8) e seriam, segundo os autores, menos mineralizadas do que aquelas do carste, com CE média de aproximadamente 430 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (MOURÃO *et al.*, 2001).

4 METODOLOGIA

Inicialmente foi delimitada a área de estudo que compreende a porção mineira da sub-bacia do rio Verde Grande – SF 10 e a sub-bacia dos rios Jequitaí e Pacuí – UPGRH SF6. Foram identificadas as coordenadas geográficas dos pontos de monitoramento, os quais foram mapeados. Como a área em cada fase do monitoramento abrangeu diferentes sub-bacias da mesma região, a delimitação e identificação foi feita para cada uma das fases.

4.1 Organização e consolidação do banco de dados e descrição do monitoramento executado pelo IGAM

O monitoramento executado pelo IGAM pode ser dividido em três fases em que houve variação na distribuição espacial, no número de poços de amostragem, na abrangência da área monitorada e no número de parâmetros analisados. As fases foram: I – período de 2005 a 2007; II – 2008-2009 e III – 2010-2011.

O monitoramento executado pelo IGAM pode ser dividido em três fases em que houve variação na distribuição espacial, no número de poços de amostragem, na abrangência da área monitorada e no número de parâmetros analisados. As fases foram: I – período de 2005 a 2007; II – 2008-2009 e III – 2010-2011. Este monitoramento é resumido na tabela 1, em que são mostrados, para cada fase, as respectivas campanhas semestrais, a abrangência territorial da área monitorada (área e municípios), o número de poços, a densidade da rede de monitoramento e os poços de amostragens comuns entre as diferentes fases.

TABELA 1 – Resumo das principais características das três fases do monitoramento executado pelo IGAM nas águas subterrâneas da área de estudo (Projeto CODEVASF).

Fase	Período		Abrangência territorial da rede		Nº de pontos	Densidade da rede (nº de poços/1.000km ²)	Pontos em comum com a fase atual
	Campanha	Semestre/Ano	Sub-Bacias	Nº de Municípios e área			
I	1	1º /2005	Rio Verde Grande, Jequitai e Pacuí	23 (~35.130 km ²)	40	1,1	PP001; SP001; CE001; CJ002; JR001; SL001; LP001; BC001; JQ001; EN001; JF001 (11 pontos em comum)
	2	2º /2005			40		
	3	2º /2005			39		
	4	1º /2006			40		
II	5	2º /2007	Rio Verde Grande	3 (~ 5.000 km ²)	43	8,4	JB003; JB007; JB008; VD013; VD014; VD021; VD003; VD001; VZ001; VZ006 (10 pontos em comum)
	6	1º /2008			43		
	7	2º /2008			41		
	8	1º /2009			41		
	9	2º /2009			41		
III	10	1º /2010	Rio Verde Grande, Jequitai e Pacuí	25 (~39.000 km ²)	45	1,3	NA
	11	2º /2010			45		
	12	1º /2011			59		
	13	2º /2011			58		

NA - não aplicável

Conforme mencionado, o monitoramento nas fases I (2005-2006) e III (2010-2011) – com 11 pontos de monitoramento em comum – tem abrangência territorial semelhante, mesmo tendo havido mudança na configuração da rede de monitoramento (localização dos pontos). Já as Fases II (2007-2009) e III (2010-2011), com 10 poços de monitoramento comuns, apresentam abrangência bem diferenciada, tendo havido pouca variação no número de poços entre estas duas fases. Assim, ocorreu um adensamento da rede de monitoramento das fases I para a II de 1,1 para 8,4 poços para cada 1.000 km². Ressalta-se, que dentre as fases I e II, não há nenhum poço de monitoramento coincidente.

O monitoramento inclui levantamentos de campo e análises laboratoriais. Os procedimentos de campo, executados pelo IGAM, englobam amostragem de água subterrânea para análise de parâmetros físico-químicos e as seguintes análises *in loco*: temperatura, Eh, pH, STD e condutividade elétrica – CE. Antes de cada coleta, é feito o bombeamento por cerca de 30 minutos, em cada poço, e a tríplice lavagem dos recipientes com a água de coleta, com exceção da amostra para análise microbiológica. As amostras são rotuladas e refrigeradas a 4 °C, até serem levadas ao laboratório, seguindo a orientação da NBR 9898 e do “*Standard methods for the examination of water and wastewater*” (ABNT, 1987; APHA, 2005).

As análises laboratoriais são executadas pela Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC. Os ensaios são feitos de acordo com o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, com exceção de Cloretos totais (USGS, 1985), sólidos totais dissolvidos – STD (ABNT, 1989-a), sólidos dissolvidos a 180 °C (ABNT, 1989-a), fenóis (ABNT, 1989-b), Nitrogênio amoniacal total (ABNT, 1988-b) e DQO (ABNT, 1988-a).

O número de parâmetros analisados variou de 39 a 74. O monitoramento da fase III contemplou 74 parâmetros físico-químicos e biológicos, dentre os quais: pH; CE; STD (em campo); alcalinidade de bicarbonato; dureza; turbidez; cor; fenóis; NO₃⁻; NO₂; N_{orgânico}; N_{amoniaco}; Ca²⁺; Mg²⁺; Na⁺; K⁺; HCO₃⁻; S²⁻; SO₄²⁻; Cl⁻; P; Si; Al; As; Fe; F⁻; Ba; B; Cu; Cr; Cd; Li; Hg; Mn; Ni; Pb; Se; Si; Sr; Zn; óleos e graxas; sólidos dissolvidos; DBO; DQO, coliformes totais, coliformes termotolerantes. Alguns elementos foram analisados, tanto em relação à fração dissolvida, quanto à concentração total. Em 2010 (campanhas 10 e 11), foram feitas análises também de agrotóxicos: Aldrin e Dieldrin, Atrazina, Clordano (cis + trans), DDT, Endossulfan (alfa + beta), Endrin, Heptacloro e Heptacloroepóxido, Hexaclorobenzeno, Lindano, Metoxicloro, Molinato, Pentaclorofenol, Permetrina (cis + trans), Simazina, 2,4,6 Triclorofenol, Trifluoralina.

As amostragens das fases I e III foram feitas em poços distribuídos em toda a área de estudo, abrangendo as Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos - UPGRH - UPGRH SF6 (sub-bacia dos rios Jequitaiá e Pacuí) e UPGRH SF10 (sub-bacia do rio Verde Grande). Na fase II, houve um adensamento da rede de monitoramento que passou de uma cobertura de 23 municípios (na fase I) para uma abrangência territorial bem menor (3 municípios: Verdelândia, Varzelândia e Jaíba), mantendo o número de poços. O número de pontos de monitoramento nas diferentes campanhas variou entre 39 e 59, sendo que, em média, foram 44 poços de amostragem. Se forem considerados todos os pontos de monitoramento, considerando também aqueles comuns entre fases, os poços totalizaram 127.

Além da variação geográfica, o monitoramento também sofreu uma descontinuidade temporal de um ano (segundo semestre de 2006 até o primeiro semestre de 2007). O presente estudo baseou-se nos resultados das três fases deste monitoramento executado em 13 campanhas semestrais, de 2005 a 2011.

Partindo dos dados secundários obtidos, foi organizado e consolidado um banco de dados com base em planilhas disponibilizadas pelo IGAM, com diferentes formatações. Em seguida,

foram descritas as fases e respectivas campanhas, sub-bacias abrangidas, número de poços, parâmetros monitorados em cada fase do monitoramento e foram identificados, a partir das coordenadas geográficas, os poços comuns entre diferentes fases.

Foi feita a reordenação dos pontos, em números sequenciais e univocamente identificados, já que a identificação original dos pontos não manteve sequência lógica com identificação unívoca (pela coordenada geográfica), ao longo de todo o período de monitoramento. Foram verificadas as unidades das medidas de cada parâmetro no decorrer do monitoramento, sendo que a única unidade que sofreu alteração foi a condutividade elétrica: de $\mu\text{mho/cm}$ para $\mu\text{S/cm}$ (SI). Foram verificados os limites de detecção de cada método analítico e revisadas a precisão de cada medida, para os devidos ajustes.

Em seguida, foi feita a verificação preliminar dos dados, incluindo identificação de duplicidades de poços, número insuficiente de dados para análise de determinados parâmetros e relações suspeitas entre parâmetros e respectivos resultados. O tratamento estatístico dos dados censurados foi efetuado conforme Farnham *et al.* (2002) e a determinação dos *outliers* conforme Naghettini e Pinto (2007), por meio do critério que utiliza a amplitude interquartis.

Dentre os 74 parâmetros analisados inicialmente e constantes do banco de dados, parte teve que ser excluída, tendo sido selecionados 22 parâmetros cujos resultados foram tratados neste estudo, considerando os seguintes critérios:

- Importância do parâmetro para a avaliação da qualidade geral da água subterrânea (considerando que o monitoramento é de caráter regional, por rede de monitoramento secundária, visando às tendências resultantes de modificações no uso do solo, variações climáticas, processos de recarga, fluxos e contaminação difusa).
- Seleção dos parâmetros essenciais ao balanço iônico – HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} .
- Retirada de parâmetro com percentual elevado de dados faltantes (> 60%).
- Retirada de parâmetro constante da legislação e cujo percentual de violação em relação aos limites da legislação Resolução Conama nº 396/2008 e Portaria do Ministério da Saúde nº 2914/2011 foi relativamente baixo (< 0,5%). Exceção para o pH, que se pretendeu analisar independentemente do atendimento à legislação.

- Retirada de parâmetro que apresenta alto nível de correlação, previamente conhecido, com outro parâmetro selecionado (confirmada pela matriz de correlação de *Spearman* aplicadas aos respectivos resultados). Exceção foram os parâmetros STD e CE, os quais, apesar da conhecida correlação, foram utilizados para verificação.
- Parâmetros medidos *in loco* foram priorizados e os equivalentes medidos em laboratório foram desconsiderados.
- Havendo medição de um mesmo elemento/composto total e dissolvido, com exceção dos íons usados no balanço iônico, foram selecionadas as frações constantes da legislação ambiental.
- Viabilidade de comparação dos resultados obtidos com os limites legais estabelecidos, com relação ao valor do limite de detecção do método (LD) utilizado para cada parâmetro.

A literatura especializada recomenda que parâmetros como o pH, a CE e os STD, além da temperatura e do OD, devem ser, preferencialmente, determinados em campo imediatamente após a amostragem, em vista de sua alteração durante armazenamento (CETESB & ANA, 2001; EMBRAPA, 2011). Por isso, considerando tal recomendação, a seleção dos dois primeiros parâmetros priorizou aqueles medidos *in loco*. No caso dos STD, este parâmetro não é medido em laboratório.

4.2 Análise estatística dos dados de monitoramento das águas subterrâneas na área de estudo

4.2.1 Estatística descritiva

A análise estatística descritiva foi feita, considerando mediana, percentis 10 e 90%, média aritmética, desvio padrão, percentual de *outliers*, coeficiente de assimetria e curtose. Os resultados apresentados na forma de tabelas, permitem uma avaliação da variabilidade de cada parâmetro. Foram determinados: número de dados válidos, dados faltantes e censurados, por parâmetro e para os resultados de cada ponto de monitoramento (127 pontos das três fases).

Foram elaborados os histogramas para os 22 parâmetros selecionados.

4.2.2 Análise de Cluster

A primeira comparação da qualidade das águas nos poços de monitoramento distribuídos na área de estudo (avaliação espacial preliminar) foi realizada utilizando teste multivariado. A análise de Cluster (AC) foi empregada com o intuito de evidenciar similaridade hidroquímica entre pontos de monitoramento, considerando o conjunto das características físico-químicas das águas. Assim, é feito o agrupamento dos diferentes poços de amostragem que apresentem similaridade, levando em conta os 22 parâmetros selecionados.

Os dados foram padronizados (escala $Z = (X - \mu) / \sigma$), buscando evitar distorções devidas às diferentes ordens de magnitude dos valores numéricos e das unidades dos parâmetros analisados.

A AC foi feita para: toda a área de estudo e para a UPGRH SF6 e a UPGRH SF10, separadamente, tendo sido desconsiderado o poço MC004, que teve apenas uma campanha de medição. O agrupamento hierárquico foi do tipo completo e tomou como base a distância Euclidiana, tendo sido empregado o *software Statistica 8.0*.

4.2.3 Análise Fatorial

Já a análise fatorial (AF) foi empregada para os dados de cada uma das sub-bacias – UPGRH SF6 e da UPGRH SF10 – e para os 22 parâmetros físico-químicos selecionados, numa tentativa de identificar as componentes principais, ou seja, quais parâmetros são mais importantes para a formação dos agrupamentos. Esta técnica multivariada foi feita utilizando o *software Statistica 8.0*.

4.2.4 Testes não-paramétricos

Considerando o número relativamente reduzido de resultados, foram aplicados testes não paramétricos de *Kruskal-Wallis* para os 22 parâmetros selecionados, ao nível de significância (α) de 5%. Em seguida, foram executados testes de comparações múltiplas para os parâmetros que tiveram p-valor $< 0,05$ nos resultados de *Kruskal-Wallis*. Estes testes foram aplicados buscando uma comparação simultânea entre todos os resultados obtidos para verificação de quais parâmetros apresentaram comportamentos diferenciados dentre os pontos de monitoramento. Para apoiar a interpretação dos resultados obtidos foram confeccionados os gráficos *box-whisker*.

Para avaliar a influência da sazonalidade, foram aplicados, na sequência e para os mesmos parâmetros, os testes de Mann-Whitney, ao nível de significância (α) de 5%, utilizando também o software Statistica 8.0. Considerando o clima da região estudada, o período seco compreende abril a setembro e o período chuvoso foi tomado de outubro a março.

4.3 Verificação do atendimento dos resultados físico-químicos aos padrões ambientais legais e recomendados

Nesta etapa foi avaliada a qualidade das águas monitoradas no que diz respeito ao atendimento a padrões legais, mais especificamente, aos limites preconizados pela Portaria Nº 2914/2011 do Ministério da Saúde, quanto à potabilidade, e pela Resolução Conama nº 396/2008, em relação aos diferentes usos da água.

Foram calculados os percentuais de violação aos padrões legais tanto em relação ao número total de medições, quanto em relação ao número total de poços de monitoramento.

Também foram avaliados os dados em comparação a valores recomendados para uso das águas subterrâneas na irrigação, relacionados à razão de adsorção de sódio (RAS ou SAR, em inglês) que se relacionam e à condutividade elétrica que caracterizam o risco de salinização do solo, segundo o *US Salinity Laboratory* do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. Para tanto, foi utilizado o Diagrama de Wilcox e a RAS – Razão de Adsorção de Sódio, em cada medição, foi obtida de acordo com: $RAS = Na^+ / [(Ca^{2+} + Mg^{2+}) / 2]^{1/2}$. As concentrações de Mg^{2+} , Ca^{2+} e Na^+ foram, previamente, convertidas para miliequivalente/L (meq/L) para aplicação da equação citada. O denominado “risco de sódio” é associado a problemas de impermeabilização e endurecimento do solo agrícola pela irrigação a partir de águas concentradas neste elemento e o chamado “risco de CE” relaciona-se com problemas de perda da fertilidade do solo. Empregaram-se as medianas dos resultados de cada poço, considerando que a metodologia foi desenvolvida para medida de tendência central dos dados de concentração dos cátions citados.

Tanto a comparação com padrões legais, quanto com valores recomendados foram feitas considerando os resultados de todos os poços monitorados de 2005 até 2011 para os 127 poços de monitoramento.

4.4 Avaliação do Aquífero Bambuí na Área de Estudo

4.4.1 Classificação hidroquímica das águas subterrâneas

Precedendo à classificação das águas do aquífero, foi executado o balanço iônico das amostras pelo método de Schoeller (SANTOS, 1997) para verificação do atendimento ao erro máximo admissível de 10%. A estimativa de concentrações de íons não analisados foi previamente executada utilizando dados de pH e de bicarbonato aplicados à equação de Logan, de acordo com Correia Filho e colaboradores (2008).

A partir da determinação das concentrações dos íons principais em meq/L, para cada ponto de monitoramento, foi feita a classificação hidroquímica de cada poço (127 no total – resultados das três fases) e os resultados foram apresentados utilizando o Diagrama de Piper, empregando o *software AquaChem 2012.1*.

4.4.2 Determinação dos fluxos subterrâneos na área de estudo e do gradiente hidráulico médio

Além do levantamento de parâmetros hidrodinâmicos da literatura, buscou-se estimar o gradiente hidráulico médio do aquífero a partir de medições do nível estático, que foi utilizado também na estimativa dos sentidos dos fluxos subterrâneos da área de estudo, a partir do *software ArcGis 9.0*.

Os níveis estáticos foram medidos em períodos chuvosos em 33 poços de monitoramento, nas campanhas de 2010 a 2012, sendo que a elevação do lençol freático tomou como referência o nível do mar, a partir das medidas de altitude de cada poço utilizado no cálculo. O gradiente hidráulico médio da área de estudo foi estimado, de acordo com a metodologia adotada e descrita por Coelho e Damázio (2006). Tal metodologia baseia-se na teoria do escoamento subterrâneo, utilizando a Lei de Darcy (velocidade de um fluido em um meio poroso proporcional ao gradiente hidráulico). Os dados obtidos para o cálculo do valor estimado para o gradiente hidráulico médio foram: as coordenadas geográficas (sistema UTM e Datum horizontal SAD69), as distâncias entre poços, bem como os níveis estáticos e as cotas altimétricas de 33 poços tubulares profundos distribuídos aleatoriamente na área de estudo, em aquífero não confinado. Os dados de altimetria e de distância entre os poços foram obtidos a partir da modelagem digital de terreno, desenvolvida e disponibilizada pela CPRM –

Serviço Geológico do Brasil. O cálculo foi feito a partir da seguinte equação do gradiente hidráulico:

$$i = D_h / L \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde: i = gradiente hidráulico (adimensional); D_h = variação do nível piezométrico entre dois poços em módulo (m); e L = distância entre os dois poços (m).

A equação 1 é aplicada para cada par de pontos e obtêm-se as médias aritméticas dos gradientes para todas as combinações possíveis dos 33 pontos, dois a dois.

Embora seja de conhecimento geral que o fluxo subterrâneo predominante na área de estudo tem sentido de sudoeste para nordeste, localizadamente, os sentidos dos fluxos variam, em função de variações localizadas dos gradientes hidráulicos. Para estimá-los, utilizou-se a medida dos níveis estáticos obtidas na etapa anterior.

4.4.3 Estimativas das variações espaciais para as concentrações dos principais parâmetros físico-químicos

Buscando compreender melhor as variações nas concentrações das águas subterrâneas no sistema aquífero Bambuí na área de estudo, foi feita uma avaliação espacial a partir dos dados. Tal avaliação incluiu: (i) observação de tendências de elevação ou redução nas concentrações dos íons principais e de outros parâmetros nos poços localizados em seções hidroquímicas sequenciais de montante para jusante no sentido do fluxo predominante do aquífero – SW-NE e (ii) obtenção dos mapas de isotores nos períodos chuvosos e secos, utilizando o *software Golden Surfer 9*, (de krigagem ordinária - por interpolação esférica simples).

Para a primeira etapa, foram tomadas seis seções hidroquímicas (SH) ao longo do caminho do fluxo predominante para os resultados relativos aos íons dominantes – Ca^{2+} , Mg^{2+} e Na^+ ; e $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, Cl^- e SO_4^{2-} ; e 12 seções hidroquímicas para os resultados dos demais parâmetros físico-químicos selecionados. O método segue o que foi feito por Hussein e colaboradores (2012), sendo que a divisão em seções hidroquímicas é feita da seguinte forma: no mapa da área de estudo é traçada linha diagonal no sentido do fluxo dominante, a qual é dividida em partes iguais ao número de seções hidroquímicas e assim são encontradas as áreas e os poços de monitoramento correspondentes a cada seção.

Para cada parâmetro, foram obtidas as medianas dos valores das concentrações em cada seção (M_d) e foram obtidos os respectivos gráficos $M_d = f(SH)$. Os gráficos obtidos permitiram comparar o comportamento dos principais íons e demais parâmetros analisados em relação a: tendência de oscilação aleatória, tendência de aumento ou tendência de diminuição nas concentrações dos mesmos com a linha de fluxo. A confecção dos mapas de plumas de isotores ou de isoconcentrações foi feita para 21 dos 22 parâmetros selecionados (com exceção da turbidez), e foi acrescida a dureza total. Eles foram obtidos a partir das medianas dos dados nos períodos secos e chuvosos para cada ponto de monitoramento da fase III (tendo sido incluídos resultados anteriores – fases I e II – apenas dos poços comuns). Para tanto foi utilizado o programa *Golden Surfer*, tendo sido empregada a krigagem bidimensional (interpolações lineares simples esféricas). No caso deste aplicativo, optou-se por utilizar o *default* do programa. Quanto maior o número de poços, menores as incertezas do método. A rede atual tem uma densidade de 1,1 n° de poços/(1.000 km²) e foi feita a suposição de que a mesma estaria adequada à aplicação desta técnica.

Estes mapas têm como objetivo permitir uma visualização da variação geográfica, ou seja, da distribuição das concentrações dos principais parâmetros de qualidade das águas na área de estudo, bem como a visualização de comportamentos semelhantes de diferentes parâmetros. Além disso, pode-se visualizar certa tendência de variação em decorrência da sazonalidade. Foi utilizado o seguinte critério na escolha das cores dos mapas de isotores: parâmetros físicos – do cinza-esverdeado ao verde, parâmetros químicos não metálicos – do amarelo ao vermelho, e parâmetros químicos metálicos – do cinza-azulado ao azul.

4.4.4 Resumo dos poços de monitoramento utilizados em cada etapa metodológica

As avaliações dos resultados de qualidade físico-química e a abordagem de aspectos hidroquímicos e hidrodinâmicos foram feitas para as três fases do monitoramento, conjuntamente, sempre que aplicável. Para as análises multivariadas e demais análises de variação espacial, por exemplo, foram utilizados os dados da atual configuração dos poços da fase III, incluídos os resultados de fases anteriores para os poços comuns, mantidos entre as diferentes fases. Para esclarecer melhor quais resultados foram utilizados em cada etapa da metodologia, são apresentados na tabela 2, os códigos de cada poço de monitoramento utilizado (tanto com relação às medições de qualidade das águas – parâmetros físico-químicos, quanto às medições de nível estático) e o número total de poços.

Cabem as seguintes observações: (1) na configuração atual da rede são 63 poços, mas, optou-se por utilizar resultados de 60 deles, retirando o BC002, BC004 e MC004 por terem sido medidos em apenas uma campanha; (2) sempre que utilizados os 60 poços (da fase III e atual configuração da rede de monitoramento) foram incluídos também, os resultados de fases anteriores relativos aos poços comuns com a fase III (resultados das campanhas 2005-2009); (3) o poço MC004 foi utilizado para medição do NE, embora não tenha sido usado nas demais análises físico-químicas.

TABELA 2: Resumo com a identificação dos poços cujos resultados foram utilizados para cada etapa da metodologia.

Etapa da metodologia	Resultados referentes aos seguintes poços	Nº de poços
1 Tratamento dos dados censurados	BC001; 2; NR4.14; NR4.15; CE001; 4; CJ002; EN001; 8; 10; 14; NR4.9; 15; NR4.3; NR4.4; NR4.5; 18; 19; 20; JQ001; NR4.13; JF001; 24; JR001; LP001; 27; NR4.2; NR4.12; NR4.1; 30; 33; 34; NR4.8; PP001; NR4.10; SL001; SP001; NR4.7; NR4.11; NR4.6; VD012; VD009; VD005; VD004; VD013; VD008; VD011; VZ003; JB009; JB012; JB006; VD007; VZ004; VZ005; VD010; VZ006; JB010; JB005; JB007; JB011; VD017; VD016; VD018; VD014; VZ009; VZ011; VZ008; VD015; VZ002; VD001; JB004; JB003; JB002; JB016; JB014; JB013; JB001; VZ007; VZ001; VD006; JB008; VD002; VD003; BC002; MTC006; JQ003; CP001; JQ002; FD001; BC003; CJ005; CJ004; MC002; MC003; MR001; MR002; FS004; SP002; FS003; FS002; JAN001; PP002; EP001; GM001; MA001; MTC002; MTC001; JB020; JB021; VD020; FD002; JF002; BC004; MC006; MC005; VD021; CJ006; FS007; EP006; RM001; JN001; MC004; EP004; PP004; MA003; VD022; SP003	127
2 Determinação dos outliers		
3 Verificação da normalidade dos dados: teste de <i>Shapiro-Wilk</i>		
4 Estatística descritiva		
5 Aplicação de critérios para a seleção de parâmetros (22)		
6 Testes multivariados (AC e AF)	BC001; CE001; CJ002; EN001; JQ001; JF001; JR001; LP001; PP001; SL001; SP001; VD013; VZ006; JB007; VD014; VD001; JB003; VZ001; JB008; VD003; MTC006; JQ003; CP001; JQ002; FD001; BC003; CJ005; CJ004; MC002; MC003; MR001; MR002; FS004; SP002; FS003; FS002; PP002; EP001; GM001; MA001; MTC002; MTC001; JB020; JB021; VD020; FD002; JF002; MC006; MC005; VD021; CJ006; FS007; EP006; RM001; JN001; EP004; PP004; MA003; VD022; SP003	60
7 Testes não paramétricos de Kruskal-Wallis		
8 Testes de comparações múltiplas		
9 Elaboração dos gráficos box-Whiskers		
10 Comparação dos resultados com padrões legais: tabela resumo com percentuais de descumprimento por poço e por amostras	Os mesmos poços das etapas de 1 a 5	127
11 Comparação dos resultados com padrões legais (mapa) relativo aos poços em que excederam padrões associados a risco à saúde	Os mesmos poços das etapas de 6 a 9	60
12 Comparação dos resultados com padrões recomendados para irrigação (diagrama de Wilcox)	Os mesmos poços das etapas de 1 a 5	127
13 Balanço iônico		
14 Classificação das águas (Diagrama de Piper)		
15 Mapa dos fluxos subterrâneos a partir dos níveis estáticos em 33 poços (período chuvoso)	BC003; CE001; CJ002; CJ004; CJ005; CP001; EN001; FD001; FD002; FS002; FS003; JB007; JB008; JF001; JN001; JQ001; JQ002; JQ003; LP001; MC002; MC003; MC004; MC005; MR001; MTC002; MTC006; RM001; SL001; SP002; SP003; VD021; VZ001; VZ006	33
16 Estimativa do gradiente hidráulico médio na área de estudo		
17 Gráfico de medianas das concentrações ao longo em seções hidroquímicas sequenciais de montante para jusante no sentido do fluxo predominante do aquífero	Os mesmos poços das etapas de 6 a 9	60
18 Mapas de isotores nos períodos chuvosos e secos, utilizando o <i>software Golden Surfer 9</i> (por interpolação esférica simples a partir das medianas)		

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 *Organização e consolidação do banco de dados e descrição do monitoramento executado pelo IGAM*

Buscando melhor ilustrar a variação na abrangência espacial do monitoramento em cada fase do monitoramento, a figura 6 mostra a distribuição dos poços de monitoramento, cuja configuração variou no decorrer do período 2005-2011.

O número de poços na fase atual (Fase III) são 60 poços tubulares profundos, sendo que 19 deles estão localizados na UPGRH SF6 e o restante, 41, na UPGRH SF10, sendo que os poços desta fase (atual configuração da rede) é que foram identificados por seus códigos no mapa da figura 6.

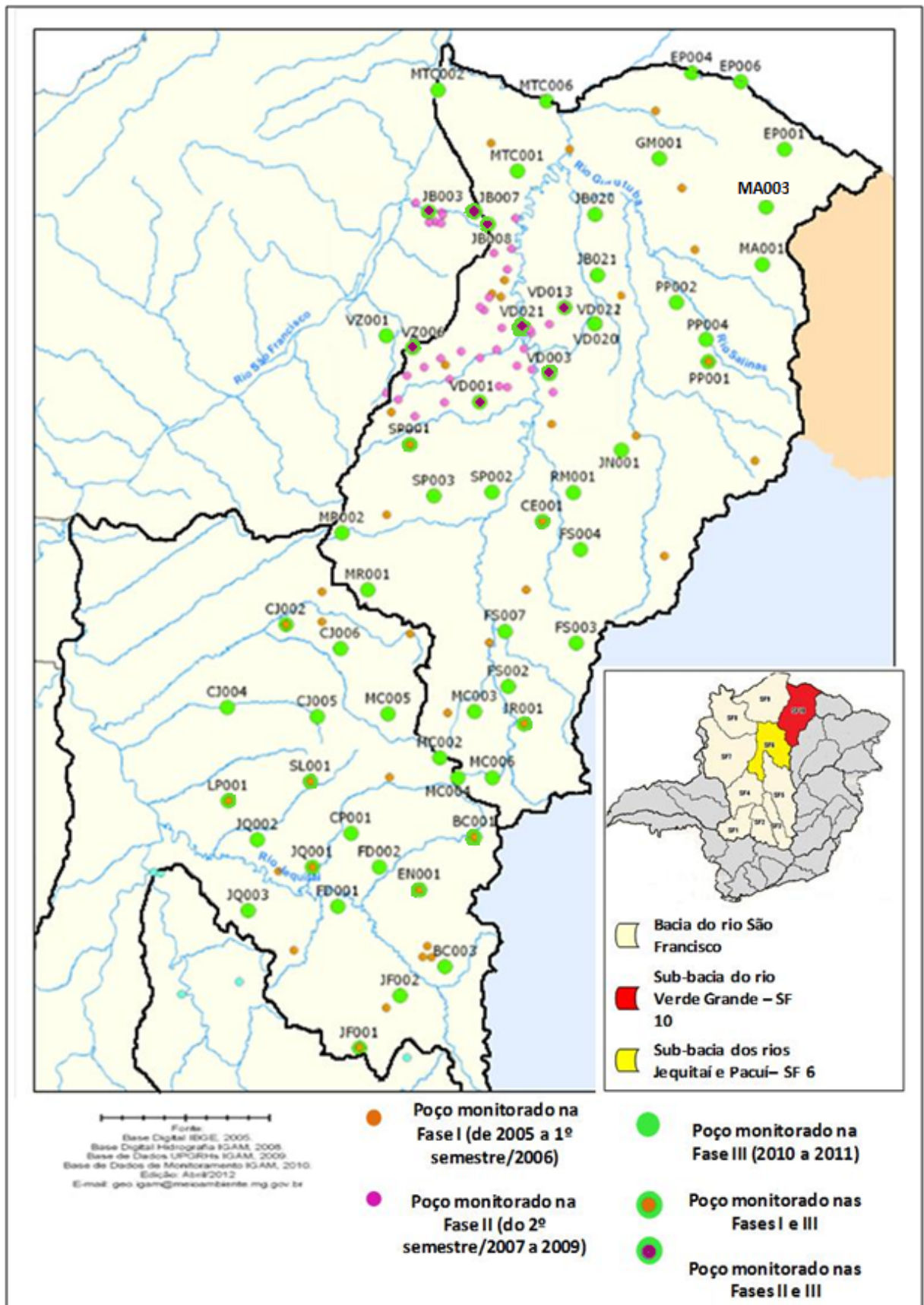
Os 22 parâmetros selecionados, em função dos critérios mencionados no item Metodologia, foram: pH; CE; STD (em campo); turbidez; alcalinidade de bicarbonato; cloreto total; fenóis totais; fluoreto; fósforo total; magnésio dissolvido; nitrato; sulfato total; alumínio total; bário total; cálcio dissolvido; chumbo total; cobre total; ferro total; manganês total; potássio dissolvido; sódio total e zinco total.

Os resultados de parâmetros biológicos – coliformes totais e termotolerantes – foram excluídos do presente estudo não somente por não terem atendido ao critério de dados faltantes $\leq 60\%$, mas também em função de resultados suspeitos, uma vez que, mesmo para poços em aquíferos profundos e pouco antropizados, houve valores relativamente grandes em parte das análises e variações extremas dos resultados. Isso pode indicar uma provável contaminação durante a coleta, a qual merece ser investigada futuramente.

Quanto aos agrotóxicos, os mesmos não atenderam ao critério de percentual de violação ($\geq 0,5\%$) em relação aos limites da legislação Resolução Conama nº 396/2008 e Portaria do Ministério da Saúde nº 2914/2011, estando sempre com concentrações iguais ou menores do que o limite de detecção.

Os resultados do monitoramento constituíram um banco com 33.925 dados, sendo 23% de dados faltantes. No Apêndice A é apresentada a matriz correlação de *Spearman* aplicada aos resultados.

FIGURA 6: Localização dos pontos de monitoramento das águas subterrâneas na área de estudo – distribuição espacial nas três fases do monitoramento.



5.2 *Análise estatística dos resultados de concentração dos parâmetros físico-químicos nas águas subterrâneas na área de estudo*

5.2.1 Estatística descritiva

Na tabela 3 é apresentada a estatística descritiva da composição físico-química das águas subterrâneas na área de estudo para os parâmetros selecionados, considerando os dados de todo o período de monitoramento, de 2005 a 2011. São apresentados, também, os percentuais de *outliers*, de dados faltantes e de dados censurados, por parâmetro.

O número de dados variou entre diferentes poços, mas foi, de modo geral, relativamente pequeno ($n < 30$), tendo variado, entre 1 a 9 resultados em cada poço e por parâmetro. Embora o número de campanhas tenha totalizado 13, não houve nenhum ponto de monitoramento comum às três fases e, portanto, o número de amostras por poço foi menor. Em função do número relativamente pequeno de dados, optou-se por empregar testes não-paramétricos.

A variação na configuração da rede de monitoramento resultou em descontinuidade espacial do monitoramento, prejudicando o número de amostras. É evidente a necessidade de manutenção da atual configuração no monitoramento das águas subterrâneas na área de estudo, de modo que os testes possam ser aplicados futuramente em uma série histórica mais representativa.

Os valores de dados válidos somados aos censurados (n) variaram entre 315 e 569, lembrando que foram, neste caso, contabilizados os resultados de cada parâmetro para o conjunto de poços de monitoramento das três fases (127 poços no total).

Observam-se, de modo geral, amplas variações nos valores dos parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas na área de estudo.

A CE, por exemplo, variou de 10,0 a 8.774,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e, considerando os percentis 10 e 90%, a variação foi de 288,2 a 1.292,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ou seja, uma amplitude de 1.003,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Os valores da condutividade elétrica das águas na área de estudo indicam que a maioria delas (93% dos poços monitorados) situa-se abaixo do valor de 1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, que corresponde a uma salinidade considerada tolerável para consumo humano.

TABELA 3 – Resumo da estatística descritiva para a composição das águas subterrâneas na área de estudo - 22 parâmetros selecionados.

Variável	n	Mediana	Percentil 10%	Percentil 90%	Média	Desvio Padrão	Assimetria	% Outliers	% dados faltantes	% dados censurados
pH – campo	547	7,03	6,5	7,8	7,08	0,5	0,2	2	4,9	0
CE – campo ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	545	651	288,2	1.292,00	782,4	593,4	5,4	5	5,2	0
STD – campo (mg/L)	568	448	183	914	528	362	2	5	1,2	0
Alcalinidade de bicarbonato (mg/L)	564	286	132	374	267	91	-0,6	1	1,9	0
Cl ⁻ total (mg/L)	569	24,3	0,79	158,8	64,42	117,08	3,6	11	1	4,7
Dureza total (mg/L)	315	235	109	539	299	207	1,7	1	45,2	0
Fenóis (mg/L)	521	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	5,3	34	9,4	65,2
F ⁻ (mg/L)	569	0,26	0,09	0,95	0,44	0,69	4,6	14	1	25,6
P total (mg/L)	569	0,02	0,01	0,08	0,04	0,12	13,4	13	1	31,7
Mg ²⁺ dissolvido (mg/L)	569	8,95	3,068	29,94	12,885	11,856	1,9	9	1	0
NO ₃ ⁻ (mg/L)	568	0,5	0	4,7	1,7	3,3	5,2	12	1,2	7,5
SO ₄ ²⁻ total (mg/L)	569	12,3	2,5	61,3	31,1	70,7	6,3	13	1	10,1
Turbidez (NTU)	567	1	0,3	13,2	8,4	33,7	8,6	15	1,4	5,4
Al total (mg/L)	449	0,1	0,1	0,3	0,3	1,1	14,1	8	21,9	35
Ba (mg/L)	416	0,061	0,016	0,163	0,089	0,122	6,4	3	27,7	1,9
Ca ²⁺ dissolvido (mg/L)	569	82,4	26,9	164,36	94,02	59,74	1,2	2	1	0
Pb (mg/L)	449	0,0025	0,0025	0,0025	0,0049	0,0241	18	24	21,9	71
Cu total (mg/L)	449	0,002	0,002	0,006	0,004	0,013	16,2	37	21,9	64,9
Fe total (mg/L)	449	0,1	0,02	1,36	1,09	4,66	8,9	12	21,9	11,5
Mn total (mg/L)	449	0,009	0,002	0,198	0,074	0,271	13,6	16	21,9	23,1
K ⁺ dissolvido (mg/L)	569	1,78	0,97	4,57	2,59	3,06	4,3	11	1	0
Na total (mg/L)	373	20,9	6,1	106,4	39,1	46,4	2,7	7	35,1	0
Zn (mg/L)	449	0,1	0,03	0,35	0,21	0,48	9,2	7	21,9	2,8

Na mesma ordem de amplitude em relação a CE, também consideráveis, estão a dureza total e os STD, cujas amplitudes entre os percentis 10 e 90% foram de 430 mg/L e 731 mg/L, respectivamente. Também houve grandes variações nos valores de outros parâmetros medidos, a exemplo da turbidez com amplitude entre os percentis 10 e 90% de 12,9 NTU e dos íons predominantes. O Cloreto, por exemplo, variou em 158 mg/L e o Cálcio, em 137,5 mg/L. Tais variações, em geral, ocorrem em função das diferentes interações água-rocha ao longo do percurso das águas decorrente de diferenças no gradiente hidráulico, na natureza das rochas e nos processos químicos envolvidos.

No aquífero Bambuí, embora as águas da região estudada apresentem considerável variação em relação à dureza – classificadas desde macias (concentrações entre zero e 75 mg/L de CaCO_3) a muito duras (concentrações maiores de 300 mg/L de CaCO_3), há uma predominância de águas muito duras, incrustantes (37% dos poços, correspondente a 39% das medições) e duras (26% dos poços, correspondente a 34% das medições). Apenas 6,3% dos poços corresponderam a águas classificadas como brandas, mais especificamente os pontos identificados como FD001 (região sul da região estudada), JB003, MTC002 (noroeste) MC002 (centro-sul), e JB021 (norte), com medianas de 9,4; 28; 48,1; 56,5; e 51,2 mg/L, respectivamente.

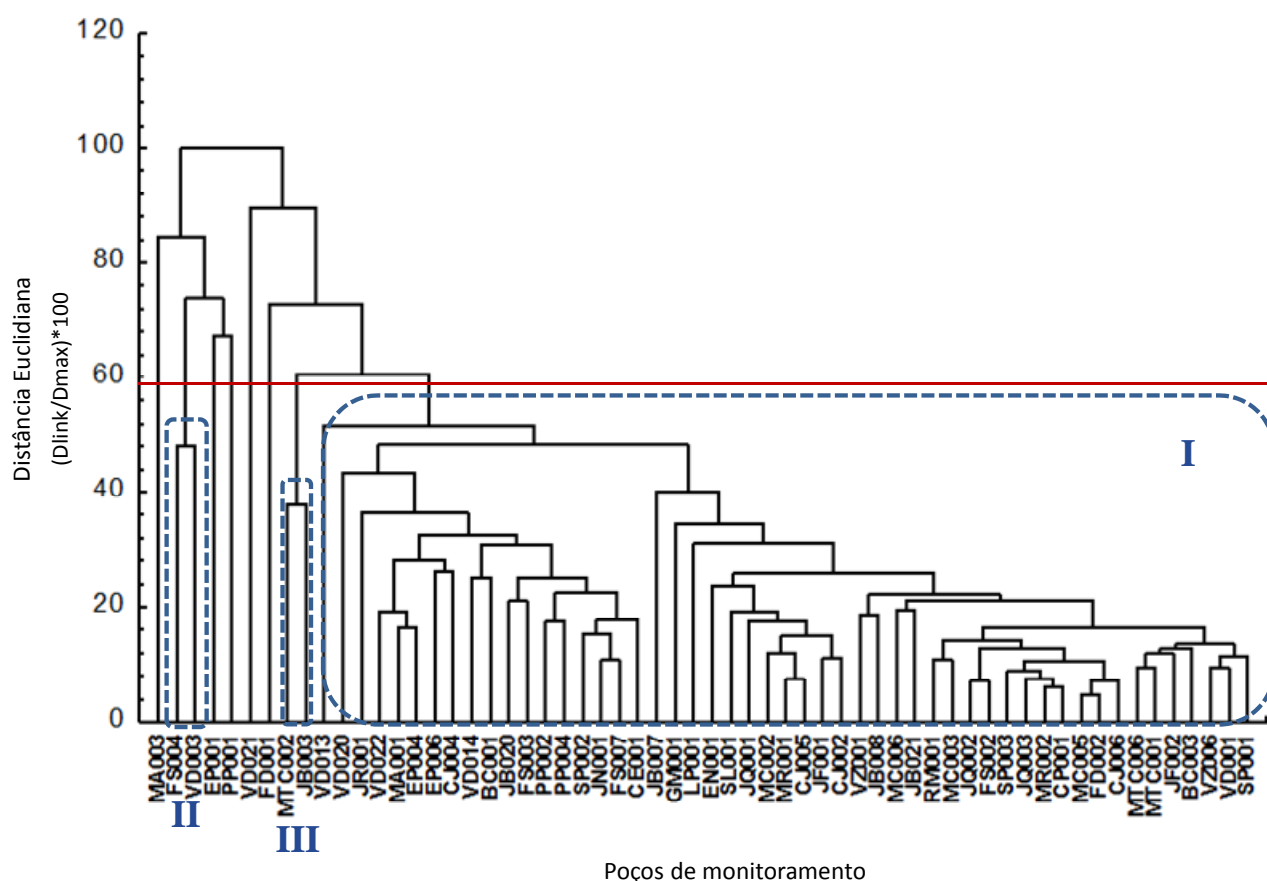
Os valores de pH medidos no campo oscilaram de 5,1 a 8,6, isto é, as águas do aquífero variam de ácidas a alcalinas, havendo predominância de águas com caráter neutro a levemente alcalino, pH entre 6,5 e 7,5 (45% dos poços, correspondente a 39% das amostras), seguidas de águas com caráter alcalino, ou seja com pH acima de 7,5 (34% dos poços, correspondente a 51% das amostras). Apenas 0,9% das medições correspondentes a medições em um único poço, codificado como FD001, estiveram abaixo do limite inferior de pH de 6 para consumo humano, estabelecido pela Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde.

A variabilidade nos resultados dos diferentes parâmetros do sistema aquífero Bambuí na área estudada pode ser observada pela amplitude entre os percentis 10 e 90, sendo que tal amplitude é característica de ambientes cárstico-fissurados e cársticos, podendo ser explicada pela litoestratigrafia do sistema que confere ao mesmo um comportamento hidráulico variável, bem como diferentes interações água-rocha, que resultam em elevada anisotropia.

5.2.2 Análise de Cluster

Inicialmente, é apresentada uma avaliação espacial do conjunto de poços de amostragem, por meio dos dendogramas obtidos a partir da análise de Cluster (AC), mostrados nas Figuras 7, 9 e 10 para todos os poços de monitoramento da fase III na área de estudo como um todo, para os poços da UPGRH SF6 e para os poços da UPGRH SF10, respectivamente. Em todos os casos, foram tomadas as distâncias euclidianas iguais a 58 que corresponde ao valor médio no intervalo do maior salto do gráfico (maior altura das linhas verticais de todos os possíveis agrupamentos).

FIGURA 7: Dendograma da Análise de Cluster para os poços das UPGRH SF6 e UPGRH SF10 – Sub-bacias dos rios Jequitaí e Pacuí e do rio Verde Grande – resultados de 22 parâmetros em amostras de água de 60 poços da fase III (2010-2011), incluídos os resultados das fases anteriores dos poços mantidos na fase III (21 poços).



O dendograma da figura 7 indica similaridade hidroquímica dos seguintes agrupamentos de pontos de monitoramento: grupo I com 51 poços, grupo II com dois poços (FS004 e VD003) e grupo III com dois poços (MTC002 e JB003). Considerando, conjuntamente os dados de

concentrações dos principais parâmetros físico-químicos, cinco poços de monitoramento se distinguem hidroquimicamente dos agrupamentos, de forma isolada: MA003, EP001, PP001, VD021 e FD001.

Na figura 8 é apresentado o respectivo mapa identificando os poços e seus agrupamentos relacionados ao dendograma da figura 7, ou seja, representando os resultados da AC para o conjunto das UPGRH SF6 e SF10.

Observa-se ainda que o agrupamento III da AC, com apenas dois poços com águas que apresentam semelhança hidroquímica, ocorre a noroeste da área de estudo à margem direita do rio São Francisco. Dentre os agrupamentos, este é o que apresenta uma relação mais clara entre a semelhança hidroquímica com certa proximidade geográfica. O Grupo I agrega a maior parte dos poços (85% do número total de poços), abrangendo a área de estudo como um todo.

A porção norte da área de estudo abrangeu quatro dos cinco poços de monitoramento cujas águas não foram agrupadas por semelhança hidroquímica, sendo que três deles concentraram-se na região mais a nordeste da UPGRH SF10. Considerando a importância da influência geológica na qualidade das águas subterrâneas e o fato de parcela considerável da UPGRH SF10, especialmente a área nordeste da mesma, estar na borda da bacia geológica, indica maior variação de ambientes naturais o que, provavelmente, explica esta maior diversidade hidroquímica das águas subterrâneas, quando comparada às águas da UPGRH SF6, localizada mais ao centro da bacia geológica.

Visando detalhar melhor tais semelhanças entre os diversos poços de monitoramento, são apresentados resultados dos procedimentos análogos feitos para as UPGRH SF6 e SF10, separadamente. Para a UPGRH SF6, formou-se um único agrupamento (grupo I) com 18 poços. O poço FD001, localizado no centro-sul da sub-bacia, distinguiu-se hidroquimicamente, de forma isolada, dos demais agrupamentos formados (figura 9). A AC nas sub-bacias apresentou relativamente poucos agrupamentos, sendo que o Grupo I concentrou a maior parte deles e resultou em poucos poços que se mantiveram isolados hidroquimicamente dos agrupamentos (somente 5 deles, correspondente a 8,33% do número total de poços), indicando certa similaridade hidroquímica das águas subterrâneas na área de estudo como um todo.

FIGURA 8: Agrupamentos dos poços de monitoramento distribuídos na área de estudo – UPGRH SF6 e UPGRH SF10, bem como os poços que se mantiveram isolados, pelo critério de semelhança hidroquímica apontada pela Análise de Cluster.

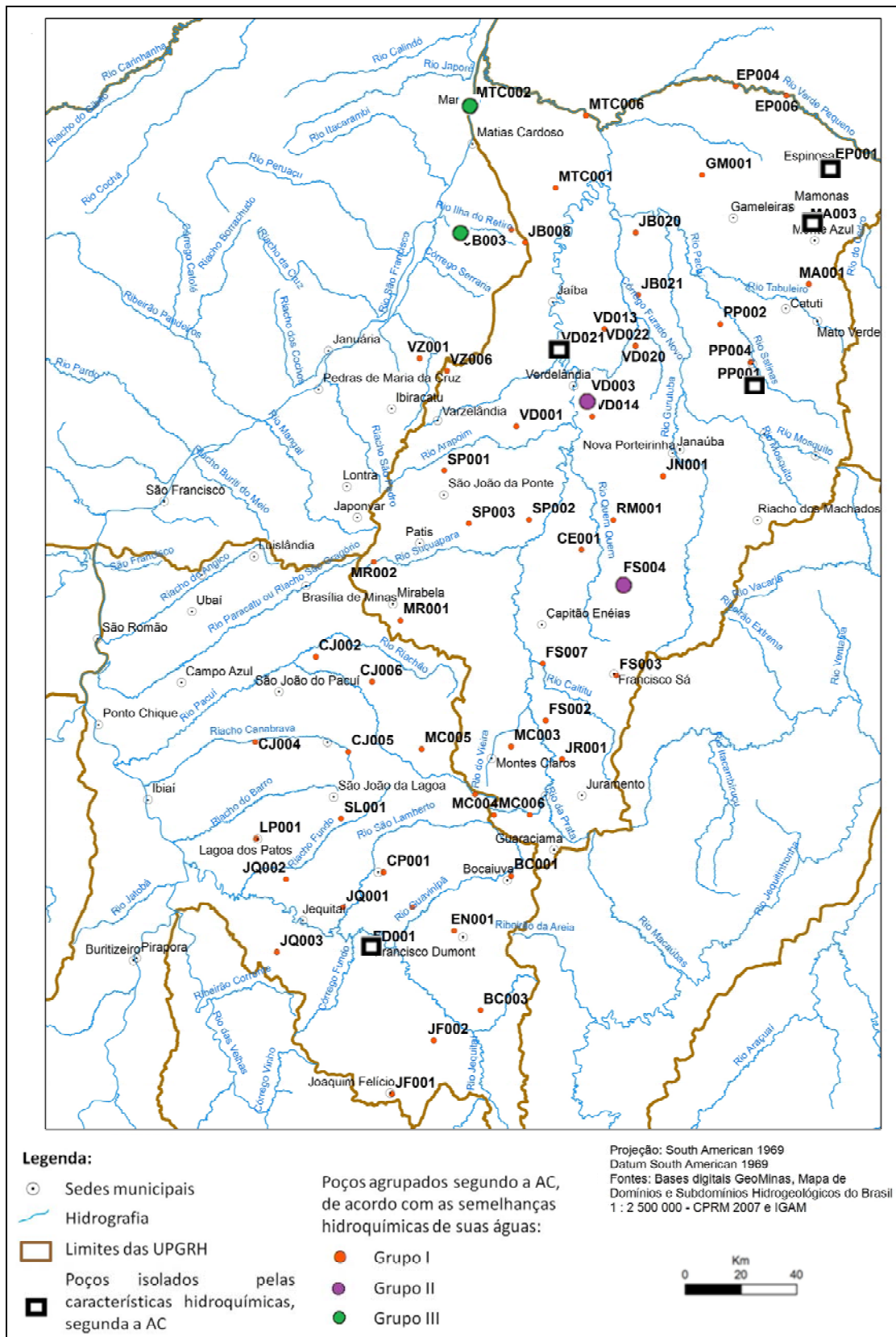
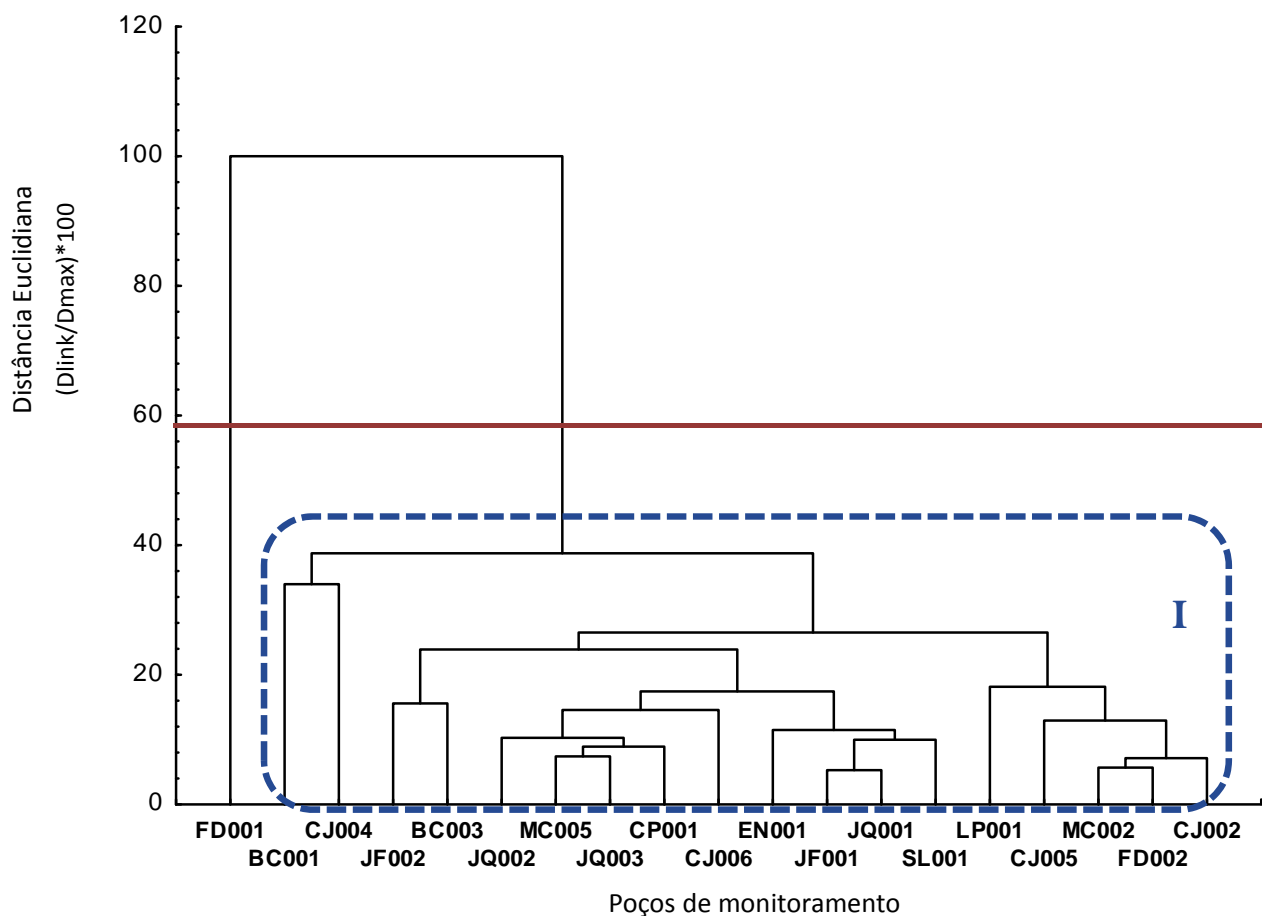
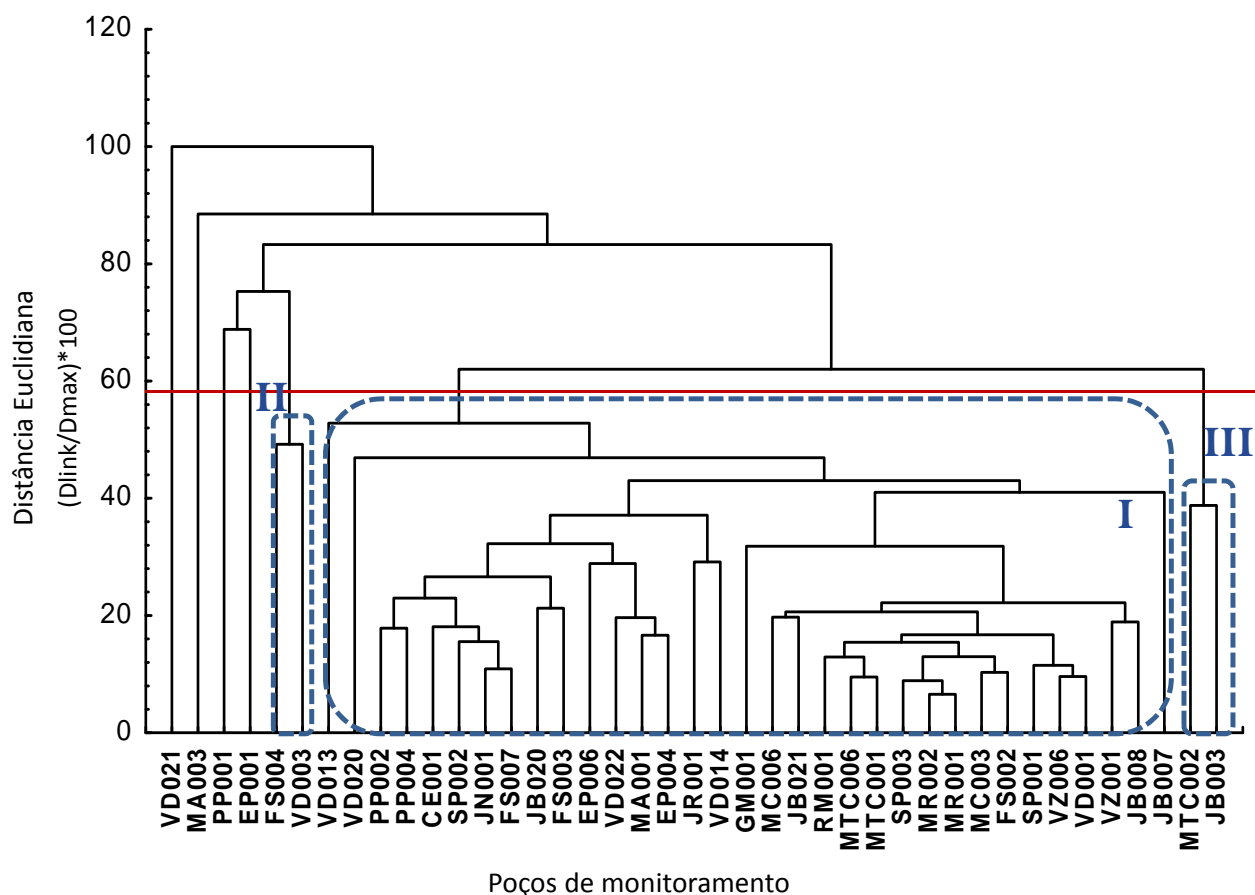


FIGURA 9: Dendograma da Análise de Cluster para a UPGRH SF6 – sub-bacia dos rios Jeiquitaí-Pacuí – resultados de 22 parâmetros em amostras de água de 19 poços da fase 3 (2010 e 2011), incluídos os resultados das fases anteriores dos poços mantidos na fase 3 (7 poços).



Para a UPGRH SF10, formaram-se três grupos: o maior deles (grupo I) com 33 poços refere-se ao agrupamento da maior parte dos poços, o segundo (grupo II), com apenas dois poços (FS004 e VD003) e o terceiro também com apenas dois poços (MTC002 e JB003). Quatro poços distinguiram-se hidroquimicamente, de forma isolada, dos agrupamentos formados: VD021, MA003, PP001 e EP001 (figura 10).

FIGURA 10: Dendrograma da Análise de Cluster para a UPGRH SF10 – sub-bacia do rio Verde Grande – resultados de 22 parâmetros em amostras de água de 40 poços da fase 3 (2010 e 2011), incluídos os resultados das fases anteriores dos poços mantidos na fase 3 (14 poços).



Não houve diferença na AC executada para toda a área de estudo daquela feita para cada uma das sub-bacias. Portanto, os respectivos mapas com os agrupamentos dos poços da AC para cada sub-bacia não diferiram dos mapas obtidos para ambas sub-bacias conjuntamente (figura 8). Por isso, optou-se por não apresentar estes mapas.

5.2.3 Análise Fatorial

A AF resultou em sete fatores (valores > 1 na matriz de correlação) para a UPGRH SF6 e oito para a UPGRH SF10. Os fatores na AF têm variáveis altamente correlacionadas entre si e, entre fatores, as correlações são baixas.

Os parâmetros associados a cada fator são apresentados nas Tabelas 4 e 5, respectivamente para a UPGRH SF6 e UPGRH SF10.

TABELA 4: Resumo da AF com os respectivos fatores para as águas da UPGRH SF6 – baseada em 22 parâmetros selecionados e 19 poços – configuração da fase III da rede de monitoramento – destaque para os parâmetros que foram mostrados pela técnica apenas para a UPGRH SF6 (em negrito e azul).

Ordem	Parâmetros associados a cada fator gerado						
	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	Fator 5	Fator 6	Fator 7
1	CE	P	SO₄²⁻	NO₃⁻	Cu		Al
2	STD	Pb	K ⁺		Na ⁺		
3	Cl ⁻	Fe					
4	Mg ²⁺						
5	Ca ²⁺						

TABELA 5: Resumo da AF com os respectivos fatores para as águas da UPGRH SF10 – baseada em 22 parâmetros selecionados e 41 poços – configuração da fase III da rede de monitoramento – destaque para os parâmetros que foram mostrados pela técnica apenas para a UPGRH SF10 (em negrito e azul).

Ordem	Parâmetros associados a cada fator gerado							
	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	Fator 5	Fator 6	Fator 7	Fator 8
1	CE	Fenóis	F⁻	Pb	Ba	Turbidez	Zn	P
2	STD	Fe	Na ⁺	Cu	K ⁺	Al		
3	Cl ⁻							
4	Mg ²⁺							
5	Ca ²⁺							

Conforme mencionado no item *Revisão da Literatura*, a Análise Fatorial (AF) está baseada na correlação entre um conjunto inicial de variáveis e um conjunto menor de fatores comuns, que, com base nas inter-relações exibidas pelos dados originais, resultam em variáveis hipotéticas (que podem vir a ser denominadas de índices de qualidade da água) e que explicam a maior parte da variância do conjunto original. A importância relativa de cada variável será dada pelo seu grau de correlação com as demais. Esta técnica tem por objetivo identificar um novo conjunto de variáveis como combinações das variáveis originais que, além de explicar grande parte da variação dos dados, tenham interpretação prática.

Dos resultados obtidos a partir AF, observa-se que houve diferenças evidentes com relação aos grupos de parâmetros que contribuem com cada um dos fatores, entre as UPGRH SF6 e SF10. Exceção foi o fator 1 que apresentou os mesmos parâmetros correlacionados nas duas sub-bacias. A AF resultou em sete fatores associados a 14 parâmetros na UPGRH SF6 e oito fatores associados a 17 parâmetros na UPGRH SF10.

Na UPGRH SF6, 78,5% da variância foi explicada pelos sete fatores gerados e na UPGRH SF10 78,4% da variância foi explicada pelos oito fatores. O número de fatores necessários para explicar a variação dos dados foi relativamente grande, em ambas sub-bacias, o que pode ter ocorrido em função do número reduzido de dados.

O fator 1 foi associado à salinidade (condutividade elétrica e STD) e à dureza das águas subterrâneas em ambas sub-bacias, sendo que águas salinizadas podem estar relacionadas, conjuntamente, tanto a aspectos geológicos (dissolução de rochas cársticas), quanto ao clima, sendo relativamente comuns em climas áridos e semiáridos. As altas correlações registradas entre salinidade, o cloreto, os STD, o cálcio e o magnésio (relacionados à dureza e à alcalinidade de bicarbonato) eram esperadas e podem ser explicadas pelo predomínio de rochas calcáreas e dolomíticas na geologia da bacia na região Norte de Minas.

Na SF 6, o fator 5 foi associado à provável influência geológica (ocorrência localizada de minerais-fonte específicos, no caso o cobre) e o fator 4 foi associado à interferência antrópica, em função do nitrato. Embora este parâmetro possa também ter origem natural, nos níveis observados, alguma influência antrópica explica melhor sua ocorrência. Já os teores de fósforo, ferro e alumínio nas águas não podem ser atribuídos à geologia, porque os mesmos não fazem parte da formação geológica regional. No caso do fósforo e do sulfato, pode ser que as concentrações desses elementos sejam decorrentes de atividades agropecuárias, bem como de precárias condições de saneamento nos aglomerados urbanos. Os dois últimos (ferro e alumínio) podem estar associados tanto às condições de construção, bombeamento ou mesmo de falta de adequada manutenção dos poços de extração empregados no monitoramento.

Para a UPGRH SF10, os fatores 3, 4, 5, e 7 foram associados à provável influência geológica (ocorrência localizada de minerais-fonte específicos); o fator 2 foi associado à interferência antrópica, em decorrência dos fenóis que podem ter origem na degradação parcial de agrotóxicos; e o fator 6 pode ser relacionado à interferência dos próprios poços de monitoramento, sendo comum turbidez elevada associada a problemas de bombeamento ou construção inadequada dos mesmos.

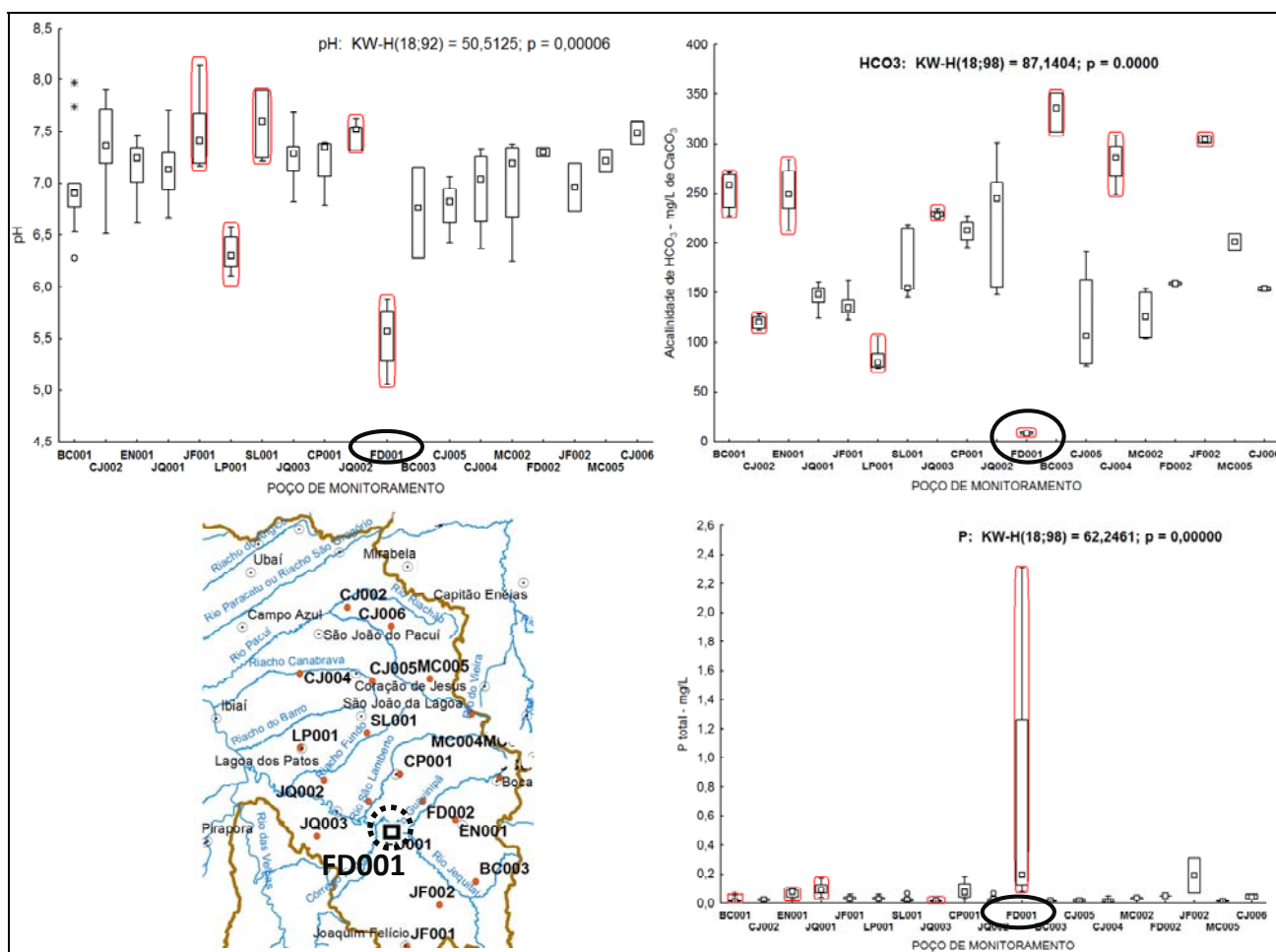
5.2.4 Testes Não-Paramétricos

Partindo dos parâmetros de qualidade selecionados (22), foram aplicados os seguintes testes não paramétricos: *Kruskal-Wallis* e comparações múltiplas, em sequência, sendo que o segundo teste somente é aplicável caso o primeiro apresente p-valor menor do que 0,05 (com base no nível de significância de 5%, adotado), ou seja, com diferença significativa entre diferentes poços para o parâmetro em teste.

Os parâmetros que não apresentaram diferenças espaciais significativas (entre as águas dos poços de monitoramento) ou que podem ser consideradas pouco significativas foram: o chumbo (p-valor de *Kruskal-Wallis* $> 0,05$ nas duas sub-bacias), o cobre (na UPGRH SF6, apresentou p-valor de *Kruskal-Wallis* $< 0,05$, mas não teve nenhuma diferença entre poços detectada pelo teste de comparações múltiplas), o alumínio (na UPGRH SF10, apresentou p-valor de *Kruskal-Wallis* $< 0,05$, mas não teve nenhuma diferença entre poços detectada pelo teste de comparações múltiplas), fenóis (p-valor de *Kruskal-Wallis* $> 0,05$ nas duas sub-bacias) e zinco (na UPGRH SF10, apresentou p-valor de *Kruskal-Wallis* $< 0,05$, mas não teve nenhuma diferença entre poços detectada pelo teste de comparações múltiplas).

Nas figuras 11 a 16 são apresentados, conjuntamente, os mapas elaborados a partir da AC e os gráficos *box-whisker* com respectivos p-valores dos testes de *Kruskal-Wallis*, para alguns parâmetros associados aos poços cujas águas foram significativamente diferentes e que apresentaram faixa de valores que se destacaram dos demais pontos na sub-bacia correspondente. Estão destacados, quando aplicável, os *box* dos poços com diferença significativa, segundo o teste de comparações múltiplas (linhas em vermelho).

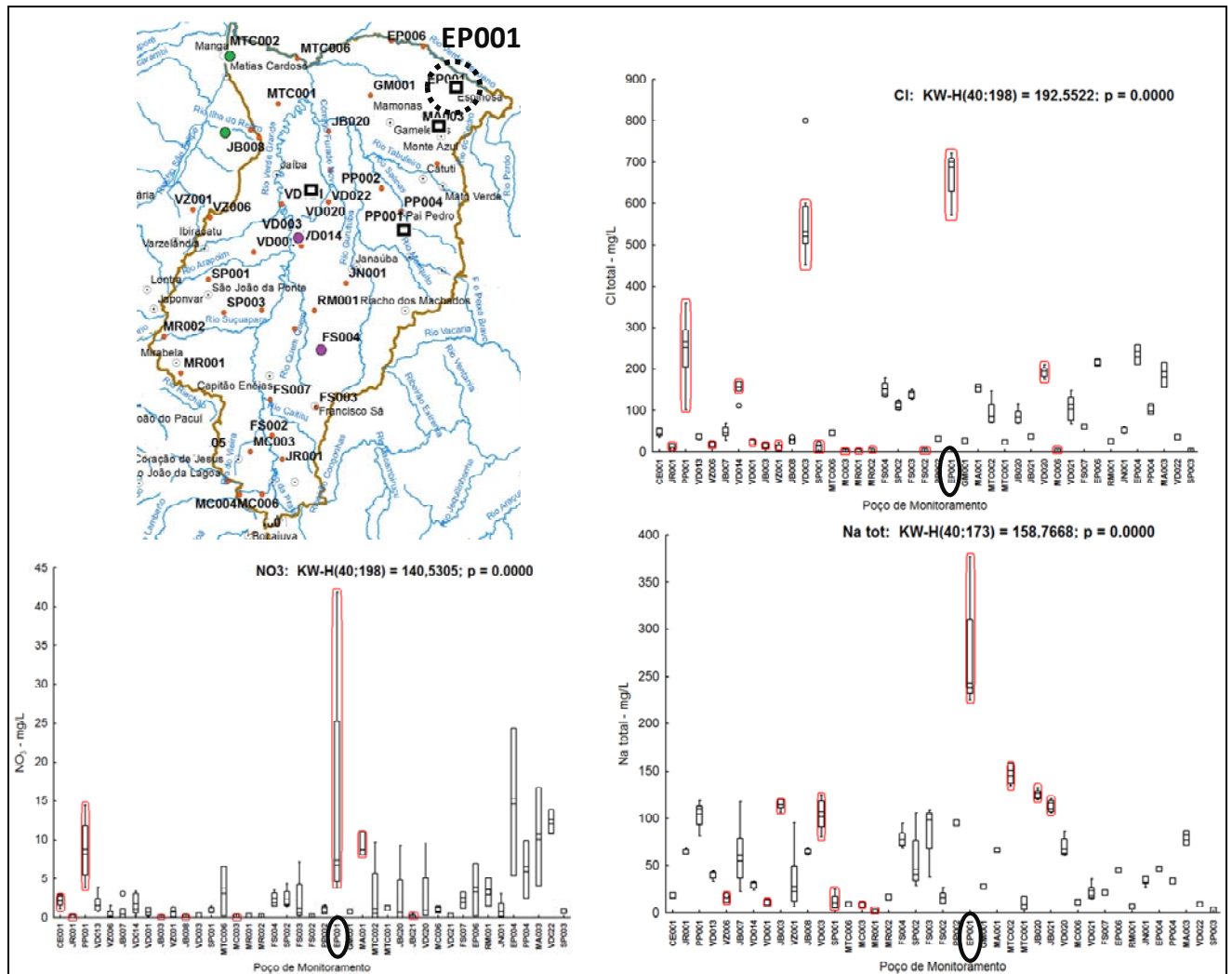
FIGURA 11: Localização do poço de monitoramento FD001, na sub-bacia dos rios Jequitai e Pacuí – UPGRH SF6, que se manteve isolado na AC, e os gráficos box-plot para os parâmetros pH, alcalinidade de bicarbonato e fósforo total, na mesma sub-bacia.



Da figura anterior, observa-se que o poço FD001 (no município de Francisco Dumont), único na UPGRH SF6 que se apresentou isolado na AC, distingue-se, na área de estudo, por apresentar valores relativamente elevados de fósforo total e valores baixos de pH (elevada acidez) e de alcalinidade de bicarbonato. Este poço, localizado na base da Serra da Água Fria, pode ter aspectos geológicos diferenciados, bem como condições de recarga com características mais específicas.

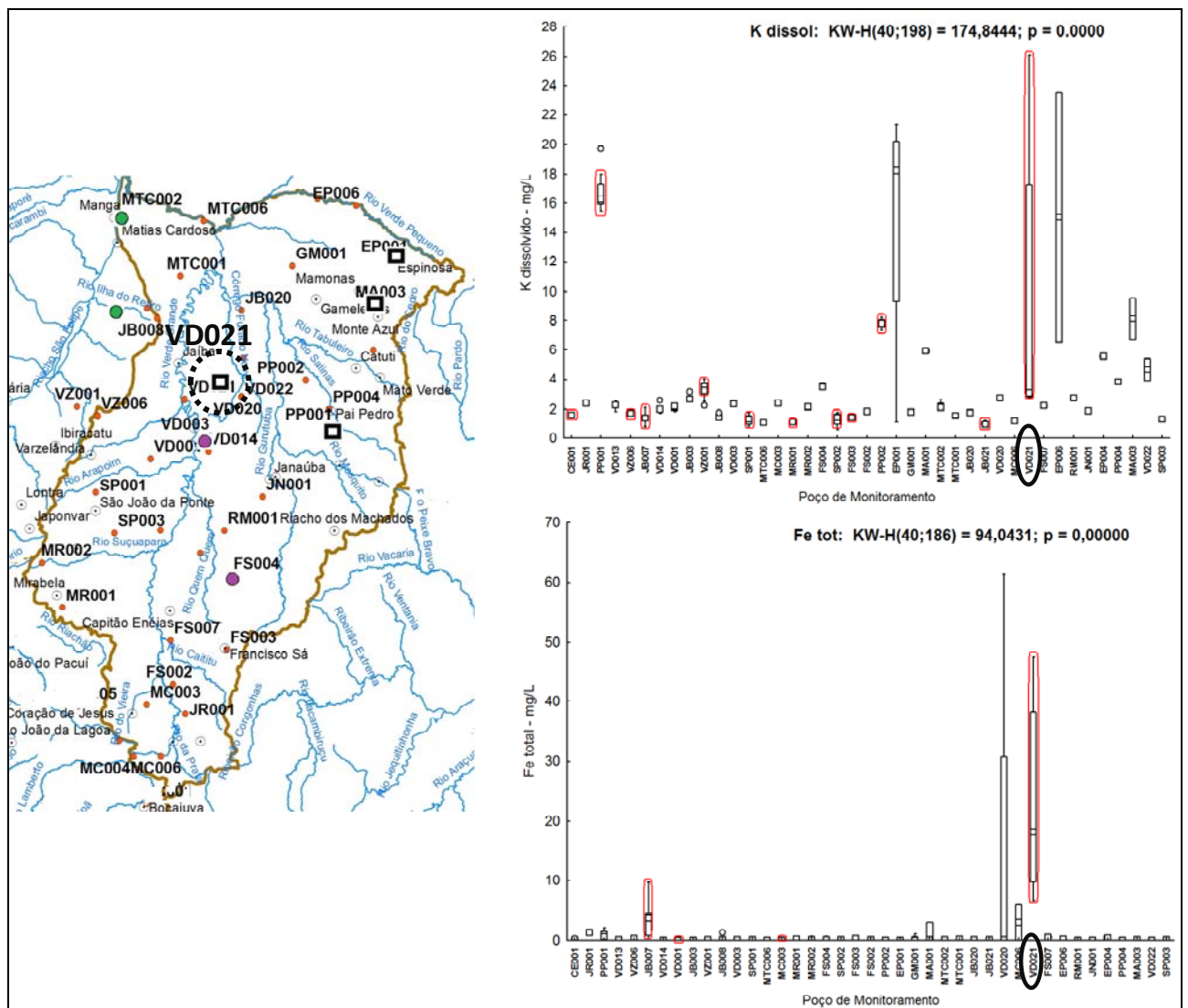
A partir da figura 12, observa-se que o poço PP001 (município de Pai Pedro), um dos que se apresentou isolado na UPGRH SF10, segundo a AC, distingue-se, na área de estudo, por apresentar valores relativamente elevados de bário total e de potássio total. Cabe observar que, em princípio, a ocorrência de bário nas águas desse poço parece ser bastante localizada, uma vez que nenhum outro poço na área de estudo apresentou teores nos mesmos níveis para

FIGURA 13: Localização do poço de monitoramento EP001, na sub-bacia do rio Verde Grande – UPGRH SF10, que se manteve isolado na AC, e os gráficos box-plot para os parâmetros nitrato, cloretos totais e sódio total, na mesma sub-bacia.



Da figura 14, observa-se que o poço VD021 (no município de Verdelândia), um dos que se apresentou isolado na UPGRH SF10, segundo a AC, destaca-se, na área de estudo, por apresentar valores relativamente elevados de potássio dissolvido e ferro total. Este poço encontra-se no domínio hidrogeológico aflorante do poroso/fissural e próximo à serra da Jaíba.

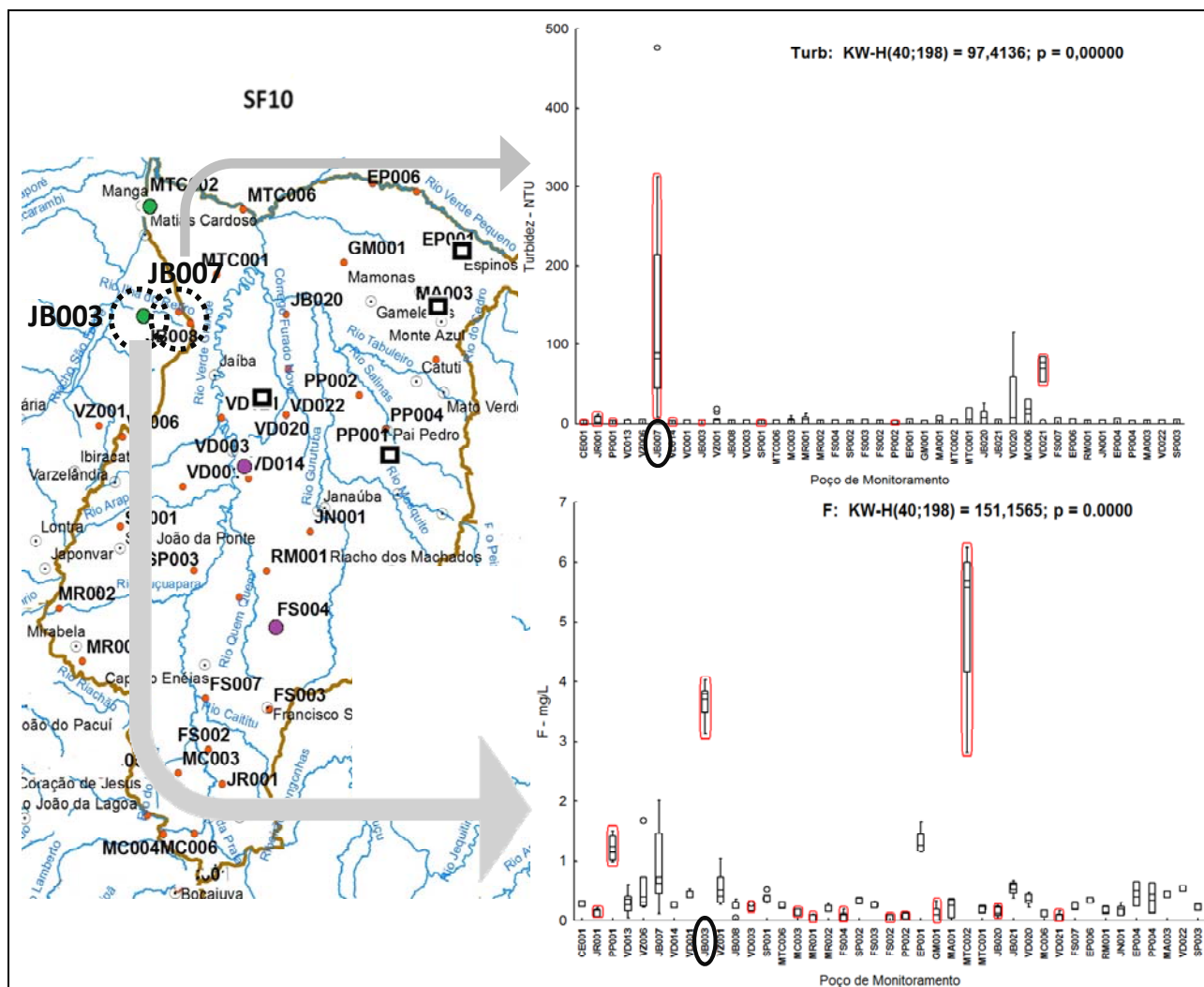
FIGURA 14: Localização do poço de monitoramento VD021, na sub-bacia do rio Verde Grande – UPGRH SF10, que se manteve isolado na AC, e os gráficos box-plot para os parâmetros magnésio dissolvido e cloreto total, na mesma sub-bacia.



Além dos poços discutidos (Figuras 11 a 14), cabe destacar também os poços JB007 e JB003 que apresentaram valores mais elevados para turbidez e fluoreto, respectivamente, conforme os testes não paramétricos aplicados (figura 15). Estes poços foram agrupados, por

semelhança hidroquímica dos 22 parâmetros analisados, segundo a AC (JB007 no agrupamento I e JB003 no grupo III).

FIGURA 15: Localização dos poços de monitoramento JB007 e JB003, na área sub-bacia do rio Verde Grande – UGRH SF10, com concentrações significativamente diferentes, mostradas nos gráficos box-plot, para os parâmetros turbidez e fluoreto, respectivamente.

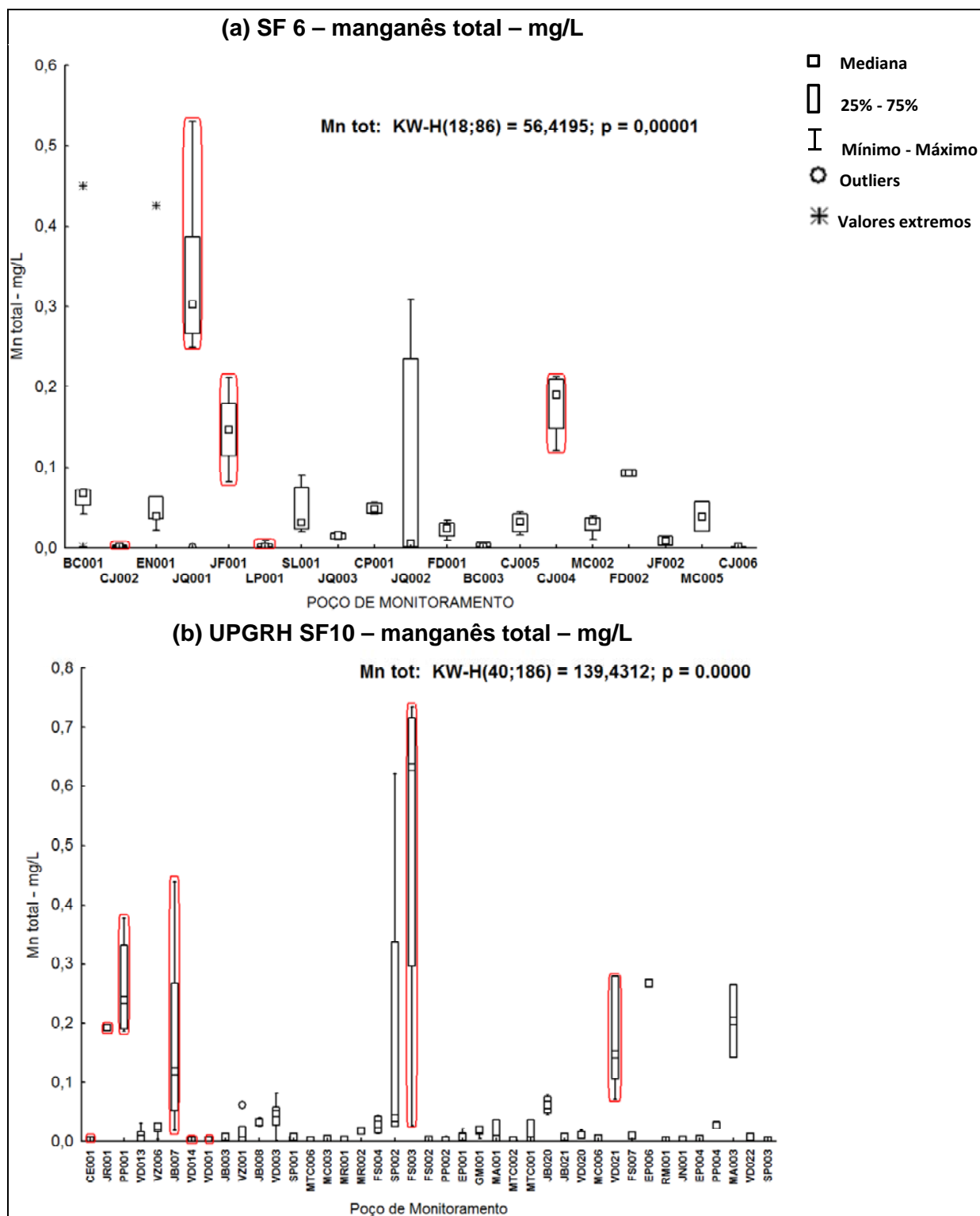


De modo geral e ao considerar a localização dos poços que se diferenciaram nos testes de Kruskal-Wallis, parece haver influência da geologia na predominância de determinados elementos, sendo que parte considerável dos parâmetros apresenta concentrações mais localizadas. Isso ocorre mesmo em águas profundas, mais protegidas e, em princípio, sem aparente relação com fontes de poluição.

Dos 17 parâmetros que apresentaram diferenças significativas entre os poços, em ambas as sub-bacias estudadas, alguns são apresentados a seguir nas figuras 16 a 18, com p-valores dos

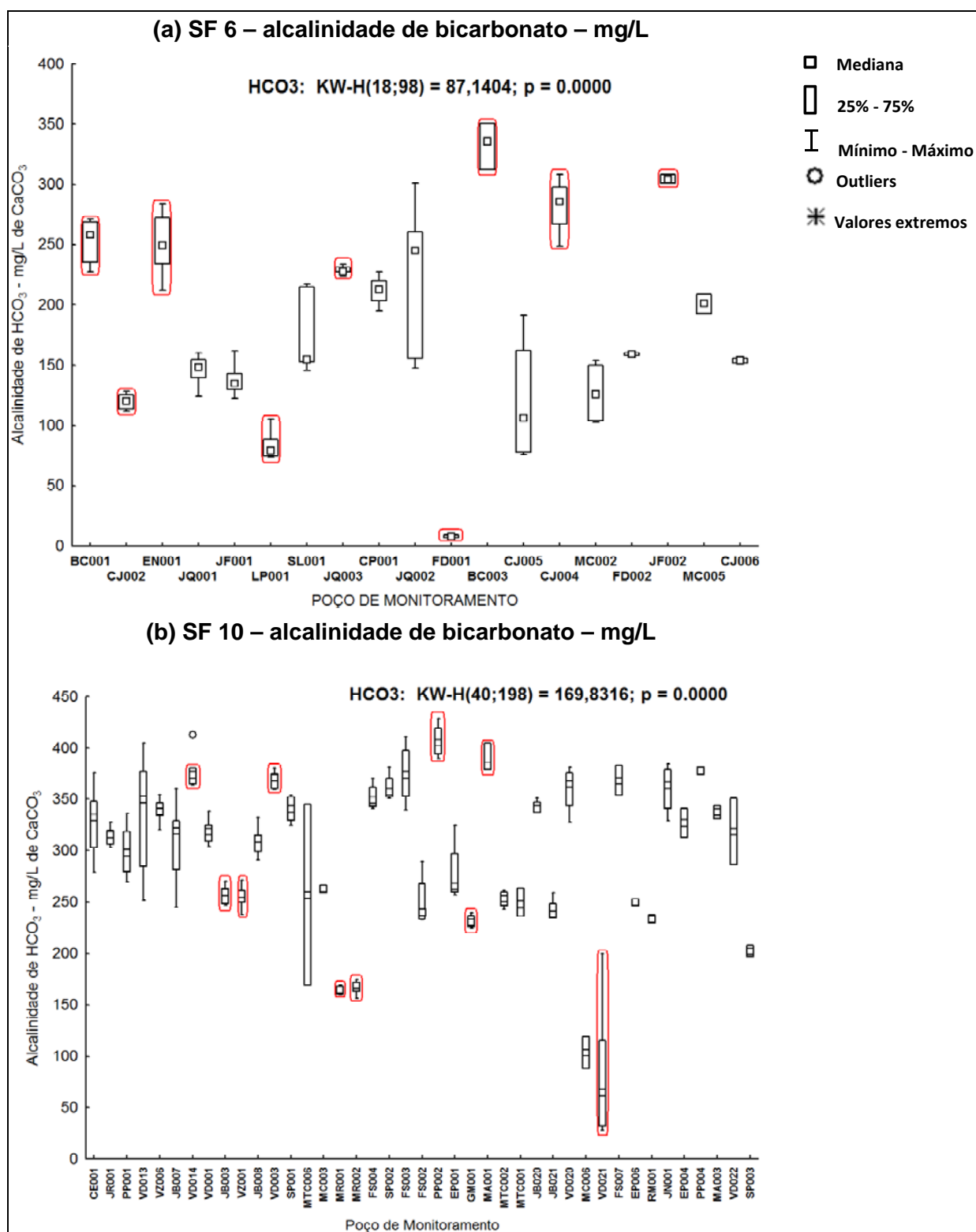
testes de Kruskal-Wallis e respectivos gráficos box-plot, com destaque para os *box* com diferenças significativas, de acordo com os testes de comparações múltiplas – linhas em vermelho – sempre que aplicável. Pelos resultados dos testes, podem-se citar alguns poços que se destacam: o FS003 em relação a elevadas concentrações de manganês total; os poços PP002 e MA001 quanto às elevadas alcalinidades de bicarbonato; e o poço MTC002 em relação a altas concentrações de fluoreto. Todavia, nestes poços, o número de medições é ainda reduzido (de 3 a 4 dados) para obterem-se conclusões, sendo necessária a manutenção do monitoramento e reavaliação.

FIGURA 16: Gráficos *box-whisker* para manganês total: (a) UPGRH SF6 e (b) UPGRH SF10; com respectivos p-valores dos testes de *Kruskal-Wallis*.



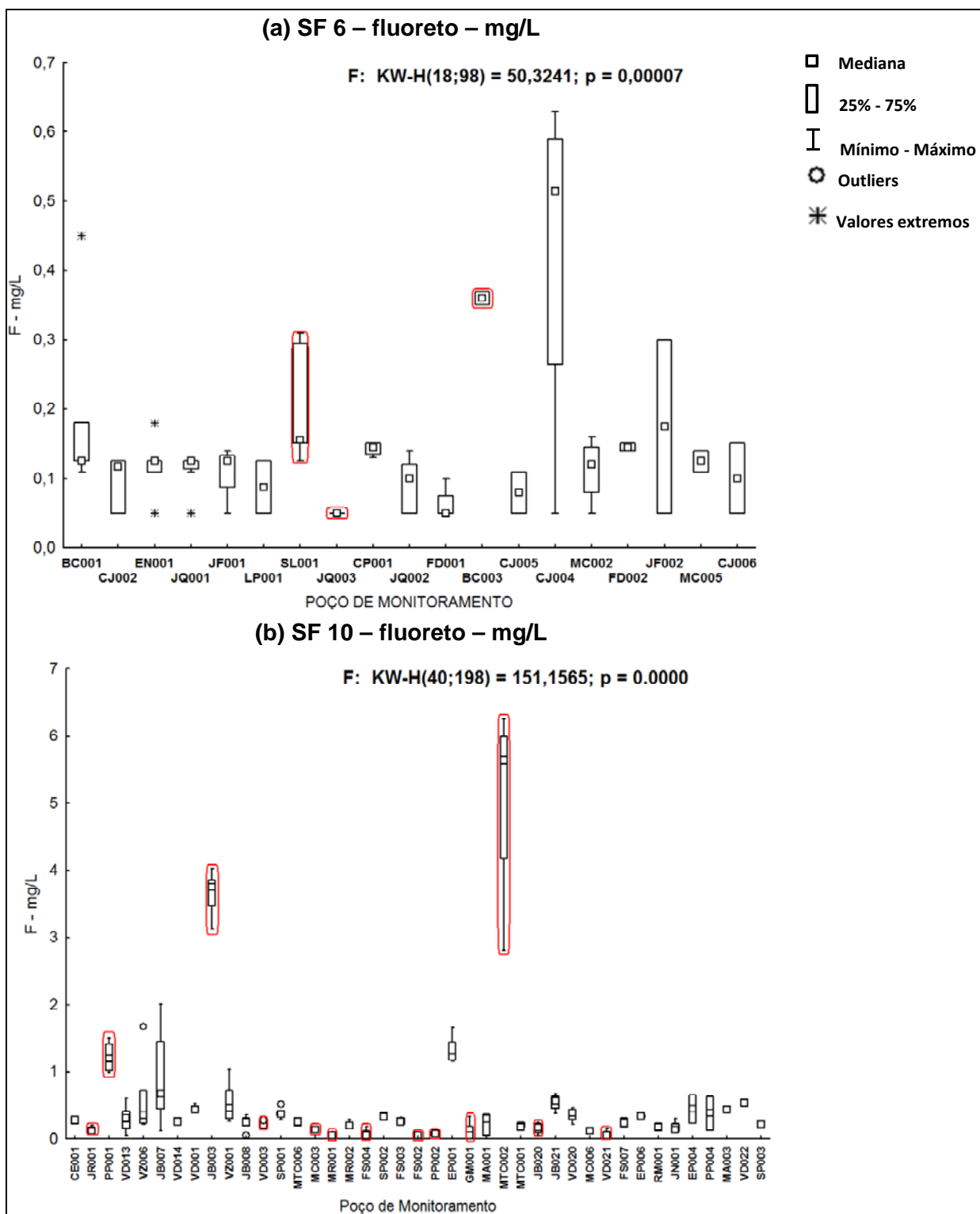
Obs.: pontos de monitoramento destacados (circulados em vermelho) são aqueles cujas águas apresentaram diferenças significativas, ao nível de confiança de 95%, em relação às águas de outros poços especificados no teste de comparação múltipla.

FIGURA 17: Gráficos *box-whisker* para alcalinidade de bicarbonato: (a) UPGRH SF6 e (b) UPGRH SF10; com respectivos p-valores dos testes de *Kruskal-Wallis*.



Obs.: pontos de monitoramento destacados (circulados em vermelho) são aqueles cujas águas apresentaram diferenças significativas, ao nível de confiança de 95%, em relação às águas de outros poços especificados no teste de comparação múltipla.

FIGURA 18: Gráficos *box-whisker* para fluoreto: (a) UPGRH SF6 e (b) UPGRH SF10; com respectivos p-valores dos testes de *Kruskal-Wallis*.



Obs.: pontos de monitoramento destacados (circulados em vermelho) são aqueles cujas águas apresentaram diferenças significativas, ao nível de confiança de 95%, em relação às águas de outros poços especificados no teste de comparação múltipla.

As variações espaciais na qualidade das águas subterrâneas da região estudada foram apontadas pela análise de cluster e confirmadas pelas diferenças estatísticas significativas demonstradas pelos testes de *Kruskal-Wallis* e pelos testes de comparações múltiplas. Dos 22 parâmetros analisados, 18 apresentaram diferenças estatísticas significativas entre diferentes poços, ao nível de confiança de 95%. Apenas Pb, Cu, Al e fênóis tiveram comportamento oposto, ou seja, apresentaram p-valores $> 0,05$ nos testes de *Kruskal-Wallis*, mostrando que não houve diferença significativa entre estes parâmetros nas águas dos diferentes poços de monitoramento.

Os resultados demonstram que parte dos parâmetros teve ocorrência localizada na área de estudo. Este é o caso dos elementos: (a) fluoreto na porção noroeste da área estudada, no município de Jaíba e arredores; (b) bário ao nordeste, no município de Pai Pedro, detectado em valores consideráveis somente no poço PP001; (c) fósforo a sudoeste, nos municípios de Joaquim Felício e Francisco Dumont; (d) zinco no centro-norte, no município de Verdelândia e Jaíba; e (e) sulfato no centro-leste, nas proximidades dos municípios de Francisco Sá e Capitão Enéas.

Fluoreto, bário e zinco estão, provavelmente, associados a ocorrências geológicas localizadas. Fósforo e sulfato, a princípio, não têm ocorrência natural na geologia da região e, portanto, podem ter origem associada a fontes de poluição a serem investigadas futuramente. As concentrações de fósforo, conforme mostrado posteriormente, não atingiram valores superiores aos limites legais nas águas subterrâneas. Ao contrário, o sulfato chegou a violar padrão, mesmo em águas profundas e mais protegidas, como mostrado no Item 5.3.

Abordando não mais as variações espaciais, nas bacias, mas a interferência da sazonalidade sobre os resultados, são apresentados os gráficos das medianas, para alguns parâmetros nas UPGRH SF6 e SF10 (figuras 19 e 20, respectivamente). Foram selecionados os gráficos referentes aos resultados dos testes de *Mann-Whitney* em que houve diferença significativa, ao nível de significância de 5%, considerando os períodos chuvosos – outubro a março – e secos – abril a setembro.

Os seguintes parâmetros apresentaram resultados significativos na UPGRH SF6: Al total, CE, Mn total e STD. Já para a UPGRH SF10 apenas nitrato mostrou diferença significativa para

um dos poços de monitoramento. Em ambos os casos, são apresentados os resultados dos poços com número de dados igual ou maior do que seis, para os quais foram aplicados os testes.

FIGURA 19: Gráficos de medianas dos resultados significativos do teste de Mann-Whitney, nos períodos secos e chuvosos, para os poços monitorados (configuração da rede na Fase III) - UPGRH SF6.

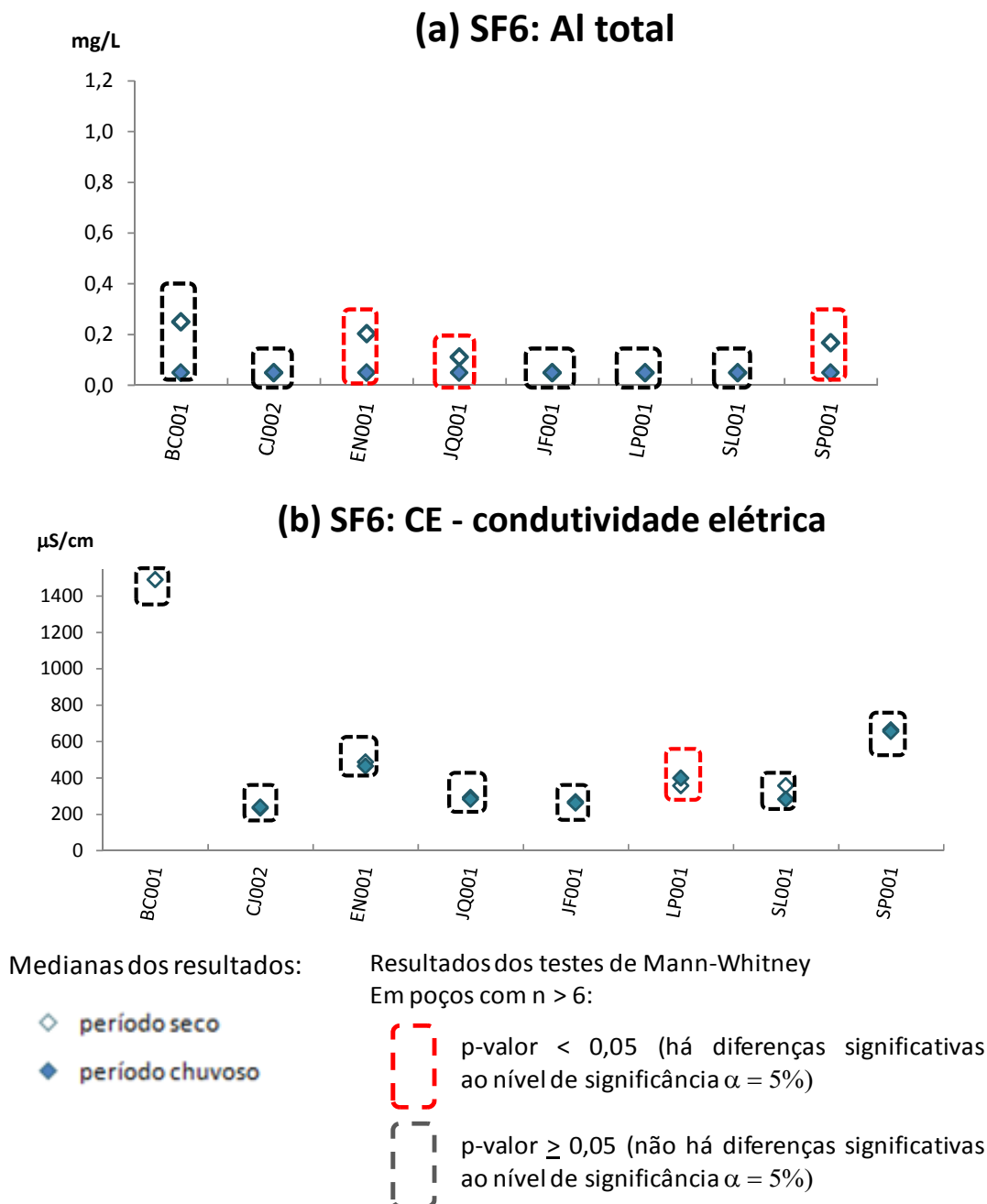
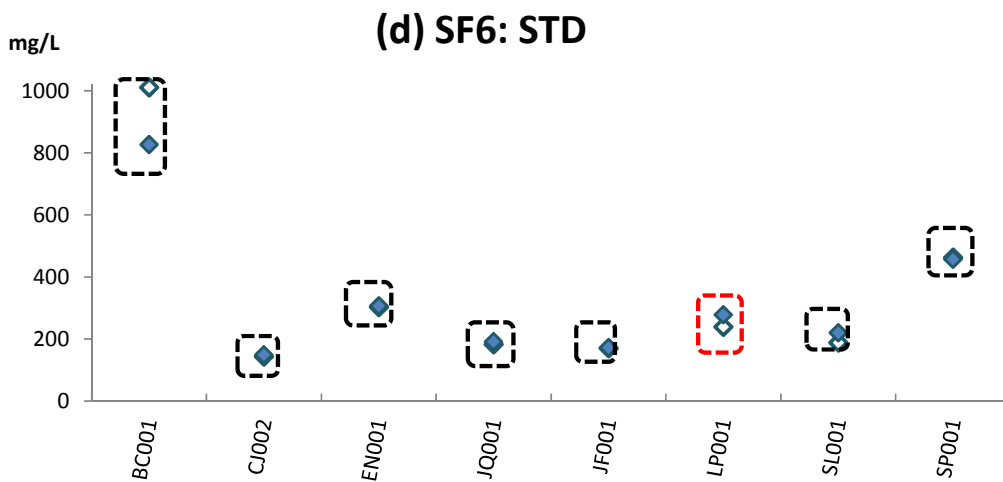
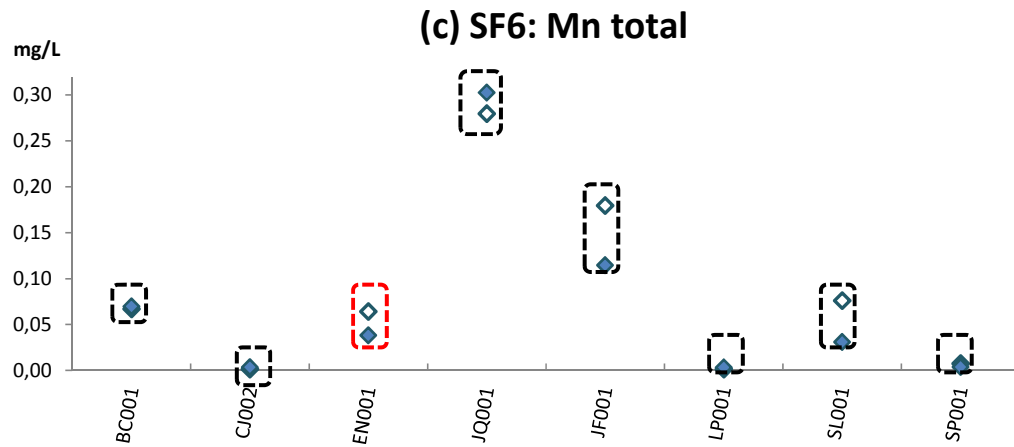


FIGURA 20: Gráficos de medianas dos resultados significativos do teste de Mann-Whitney, nos períodos secos e chuvosos, para os poços monitorados (configuração da rede na Fase III) - UPRH SF6 (continuação).



Medianas dos resultados:

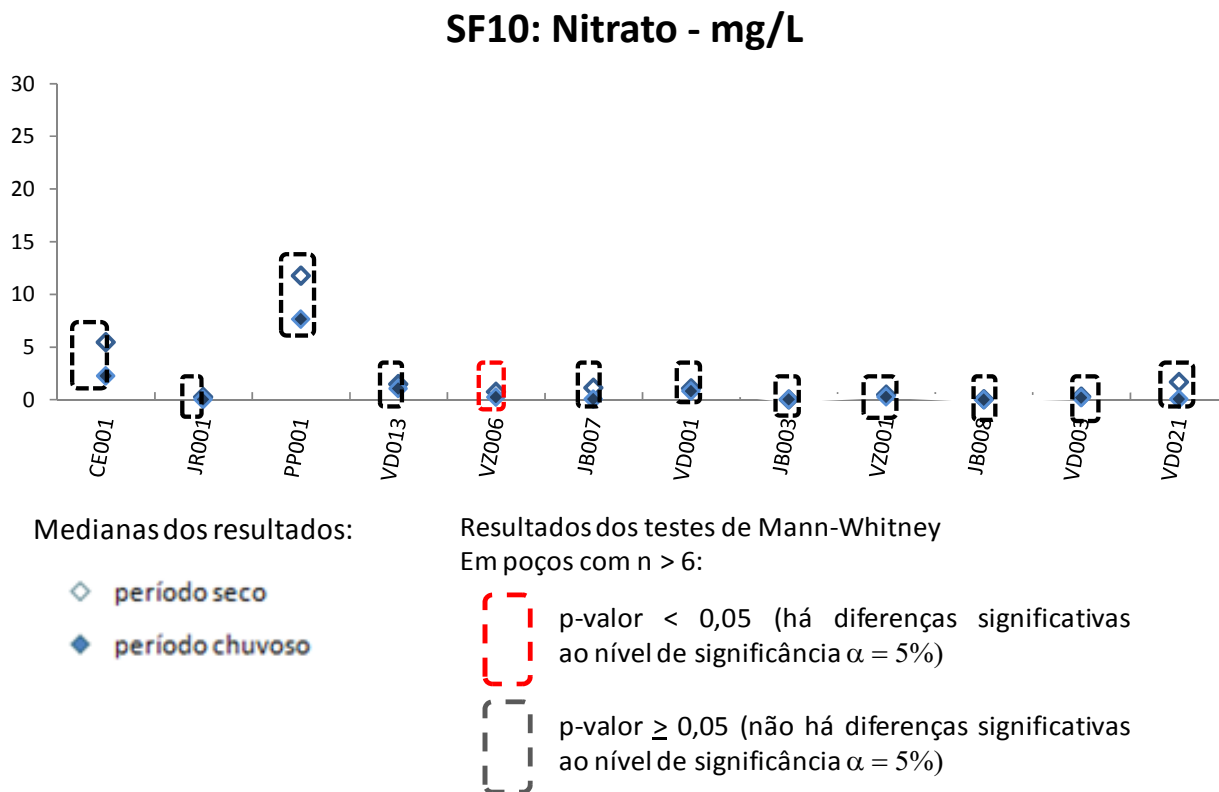
- ◇ período seco
- ◆ período chuvoso

Resultados dos testes de Mann-Whitney

Em poços com n > 6:

- ◇ (retângulo tracejado vermelho) p-valor < 0,05 (há diferenças significativas ao nível de significância $\alpha = 5\%$)
- ◇ (retângulo tracejado cinza) p-valor $\geq 0,05$ (não há diferenças significativas ao nível de significância $\alpha = 5\%$)

FIGURA 20: Gráficos de medianas dos resultados do teste de Mann-Whitney, nos períodos secos e chuvosos, para os poços monitorados (configuração da rede na Fase III) - UPGRH SF6 (b) na UPGRH SF10.



Os mesmos testes aplicados para as UPGRH SF6 e SF10, considerando o conjunto de poços, e os resultados são apresentados a seguir, na tabela 6.

Como esperado para águas subterrâneas, poucos parâmetros físico-químicos sofreram influência da sazonalidade em suas concentrações. Isso ocorre em função de tratar-se de águas de poços profundos e, portanto, mais protegidas. Exceção foram o alumínio total, o cobre total e o nitrato, os quais se concentraram no período seco. A ocorrência do alumínio, conforme discutido posteriormente, pode estar associada com interferência do próprio poço de monitoramento e não a aspectos naturais. O cobre, mesmo nos períodos secos, apresenta concentrações relativamente baixas, tendo ultrapassado limite legal exclusivamente para uso na irrigação (valor-limite mais restritivo para este parâmetro, dentre os diferentes usos), em um único poço (PP001) e em uma única medição. Já o nitrato, nos níveis encontrados, provavelmente tem sua origem associada à fonte antrópica, o que pode explicar maiores concentrações nos períodos de estiagem, uma vez que os esgotos não tratados, principal fonte de origem do composto, encontram-se mais concentrados.

TABELA 6 – Resultados do teste U de Mann-Whitney aplicados para as UPGRH SF6 e SF10, para os 22 parâmetros selecionados e para os poços da configuração da Fase III, agrupados por período – seco ou chuvoso (resultados destacados são significativamente diferentes ao nível de significância de 0,05, ou seja, p-valor < 0,05).

Parâmetro	UPGRH SF6			UPGRH SF10		
	N válidos		p-valor ajustado	N válidos		p-valor ajustado
	Seco	Chuvoso		Seco	Chuvoso	
pH	52	48	0,207889	101	86	0,146954
CE	52	48	0,793186	101	86	0,960003
STD	52	54	0,455825	102	88	0,972563
HCO ₃ ⁻	52	54	0,446295	102	88	0,142360
Cl ⁻	52	54	0,671830	102	88	0,964126
Fenóis totais	52	51	0,585558	102	78	0,761744
F ⁻	52	54	0,887693	102	88	0,313464
P total	52	54	0,280341	102	88	0,984781
Mg diss.	52	54	0,511017	102	88	0,762953
NO ₃	51	54	0,081796	102	88	0,001410
SO ₄ total	52	54	0,087163	102	88	0,943047
Turbidez	51	54	0,807451	102	88	0,388659
Al total	43	50	0,000006	97	82	0,006586
Ba total	36	38	0,633968	96	82	0,959270
Ca dissolvido	52	54	0,744825	102	88	0,575783
Pb total	43	50	0,820652	97	82	0,134682
Cu total	43	50	0,755792	97	82	0,035166
Fe total	43	50	0,373230	97	82	0,553364
Mn total	43	50	0,564732	97	82	0,208235
K dissolvido	52	54	0,894417	102	88	0,903136
Na total	36	38	0,729289	96	73	0,483057
Zn total	43	50	0,757873	97	82	0,451573

5.3 Verificação do atendimento dos resultados físico-químicos do monitoramento aos padrões ambientais legais e recomendados

5.3.1 Padrões legais

A disponibilidade das águas subterrâneas e sua adequação para diferentes usos estão intrinsecamente associadas. Os resultados dos parâmetros físico-químicos das águas do aquífero na área de estudo foram comparados com os padrões da Portaria do Ministério da Saúde nº 2914/2011, quanto à potabilidade, e com os limites da Resolução Conama nº 396/2008, para diferentes usos, conjuntamente. No caso de valores diferenciados entre as duas normas tomou-se aqueles mais restritivos.

Considerando todo o período de monitoramento, o conjunto de medições nos poços das três fases (127 poços) e ainda todos os parâmetros monitorados (74), foram 20 parâmetros que apresentaram resultados que descumpriram padrões legais: turbidez, cloreto total, fenóis, fluoreto, nitrato, sulfato total, alumínio total, bário total, boro total, chumbo total, cobre total, ferro total, manganês total, sódio, zinco, arsênio, selênio, níquel, cor, e dureza.

Os parâmetros que apresentaram atendimento aos valores fixados pela legislação variaram conforme o tipo de uso da água, uma vez que os valores dos padrões variam com cada uso no caso das águas subterrâneas. Para o consumo humano, os parâmetros que não apresentaram nenhuma violação foram pH, NO_2^- , Cd, Cu, Cr, e Hg. Para a irrigação, os parâmetros correspondentes foram: NO_2^- , Cd, Cr, Li, Hg, Ni e Se. No caso da dessedentação animal, foram os seguintes: NO_3^- , NO_2^- , SO_4 , As, B, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Se, e Zn. Finalmente, no caso da recreação, atenderam aos limites: NO_2^- , B, Cd, Cu, Cr, Hg e Ni.

Na tabela 7, é resumida a análise do percentual de violações em relação aos limites da legislação ambiental, para todo o período de monitoramento analisado e para o conjunto de medições nas três fases do monitoramento (águas dos 127 poços de monitoramento).

Os percentuais de violação foram contabilizados de duas formas: em relação ao total de medições, ou seja, o percentual de violações de determinado parâmetro em relação ao número total de medições; ou em relação ao total de poços, isto é, em quantos poços determinado parâmetro violou o padrão em relação ao número total de poços. Cabe ressaltar que, em relação aos poços, foi considerado o descumprimento em uma ou mais campanhas no decorrer do monitoramento, da mesma forma, independentemente do número de violações. Os

parâmetros responsáveis pelo descumprimento do limite legal podem ou não ter ocorrido conjuntamente em um mesmo poço.

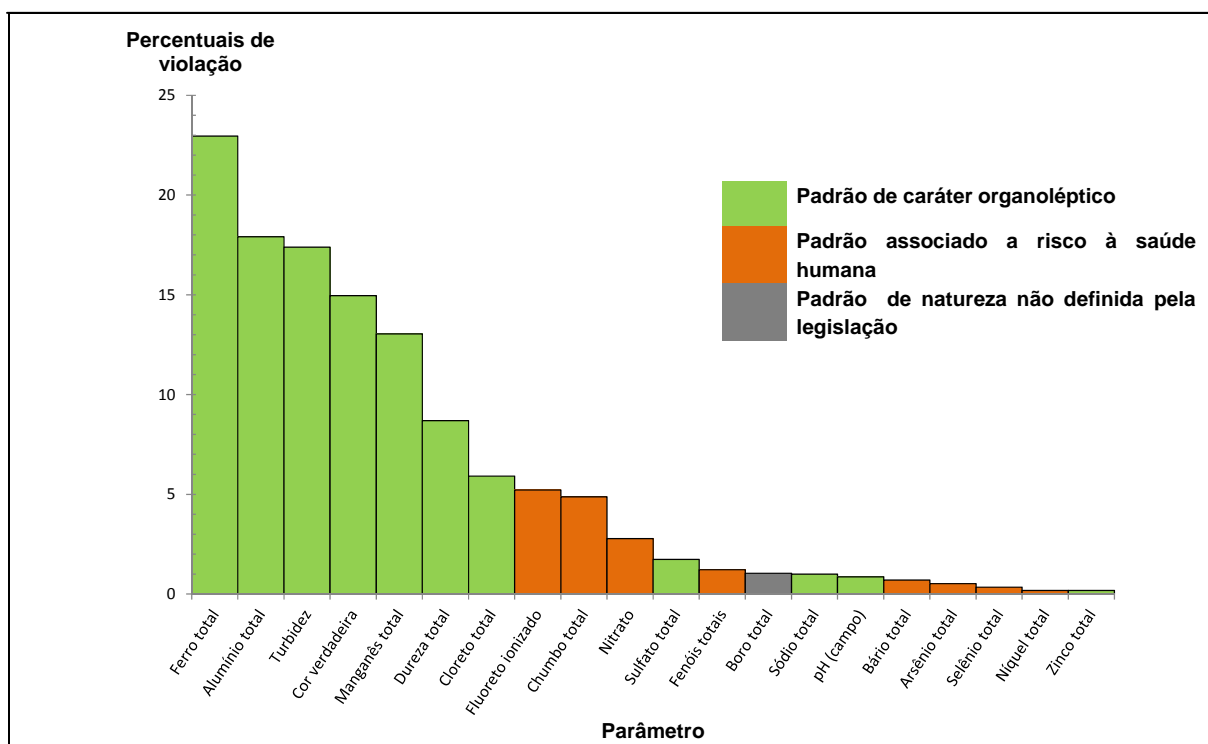
TABELA 7: Resumo do percentual de violações dos padrões legais (Portaria MS nº 2914/2011 e Resolução Conama nº 396/2008), em relação ao número total de medições e de poços – para as medições de 127 poços no período de monitoramento compreendido entre 2005 e 2011.

Usos e tipos de padrões			Principais parâmetros em ordem de percentual de violação a padrões legais, quanto ao total de medições:
Consumo humano	Medições (%)	Poços (%)	
Padrões relativos a risco à saúde associado ou não a organolépticos	4,3	65	F ⁻ (5,2%), Pb (5%), NO ₃ ⁻ (2,8%), fenóis (1,2%), Ba (0,7%), As (0,5%), Se (0,3%) e Ni (0,2%)
Padrões organolépticos, exclusivamente	6	22	Fe (23%), Al (18%), turbidez (17%), cor (15%), Mn (13%), dureza (8,7%), Cl ⁻ (5,9%), SO ₄ ²⁻ (1,7%), B (1%), Na ⁺ (1%) e Zn (0,2%)
Total para o consumo humano	10,3	87	-----
Dessedentação animal	0,8	32	F ⁻ (9,6%), Mn (7,8%), Fe (3,7%), B (1%), Zn (0,9%), Al (0,5%), Cl ⁻ (0,5%) Pb (0,3%) e Cu (0,2%)
Recreação	0,8	23	Mn (18,4%), fenóis (3,5%), F ⁻ (2,8%) e Al (0,5%)
Irrigação	2,1	75	Fe (23%), Pb (23%), Al (18%), Mn (13%), As (5,2%), fenóis (3,5%), Cl ⁻ (3,1%), NO ₃ ⁻ (2,8%), SO ₄ ²⁻ (0,9%), Ba (0,7%), Se (0,3%), Zn (0,2%) e Na ⁺ (0,2%)

Ainda considerando os resultados das medições entre 2005-2011 nos 127 poços de monitoramento, os percentuais de violação em relação aos padrões legais foram variáveis, conforme o tipo de uso das águas. Os percentuais dos poços que não apresentaram nenhuma violação foram: 13% (16 poços) para os padrões de consumo humano de caráter organoléptico; 25% (32 poços) para os padrões relativos à recreação; 55% para os padrões relativos à dessedentação animal; 59% para os padrões relativos à irrigação; e 60% para os padrões de consumo humano associados com risco à saúde, segundo a legislação.

Na figura 21, são ilustrados os mesmos percentuais de violações a limite legal, somente para consumo humano, por parâmetro associado a violações, considerando a Portaria de Potabilidade 2914/2011, do Ministério da Saúde e a Resolução Conama nº 396/2008, conjuntamente.

FIGURA 21: Gráfico de barras mostrando a frequência de violações a limites legais (Portaria MS nº 2914/2011 e Resolução Conama nº 396/2008) para consumo humano exclusivamente, por parâmetro físico-químico associado à violação, nas UPGRH SF6 e SF10, para o período 2010-2011.



Os poços não conformes frente aos limites de qualidade para consumo humano e com relação a parâmetros associados a risco à saúde foram, em ordem decrescente de percentual de violação: fluoreto, chumbo total, nitrato, fenóis totais, bário total, arsênio, selênio, e níquel total. Os riscos associados a estas violações devem ser adequadamente considerados, devendo ser verificadas as necessárias restrições de uso, caso a caso, ou seja, por poço de monitoramento e para os parâmetros observados e usos específicos. No caso das concentrações elevadas de fluoreto observadas nas águas subterrâneas de algumas regiões da área de estudo, as mesmas já foram associadas, em pesquisas anteriores, à fluorose, endêmica na região e que atinge especialmente as crianças. Os demais parâmetros citados também estão associados a doenças ou a efeitos tóxicos, segundo a literatura especializada.

Na tabela 8, são apresentados, para cada poço, os percentuais de violação em relação ao total de medições executadas (medições estas incluindo todos os parâmetros, cujos valores superaram limites legais).

Dentre os poços em que houve alguma violação, os respectivos percentuais de descumprimento em relação às medições, em cada poço, foram bastante variáveis. Estiveram entre 1,4% e 13,7% para padrões de consumo humano associados a risco à saúde; 1,6% a 45% para os padrões de consumo humano de caráter organoléptico; 1,3% a 19% para os padrões relativos à irrigação; e 2,3% a 30% para os padrões relativos à dessedentação animal; 1,6% a 22% para os padrões relativos à recreação.

TABELA 8: Percentual de violação dos padrões legais (Portaria MS nº 2914/2011 e Resolução Conama nº 396/2008), em relação ao número total de medições por poços e por tipo de uso – para a fase III do monitoramento compreendida entre 2010 e 2011.

Código do poço	Percentuais de violações em relação ao número total de medições em cada poço (%)				
	Consumo humano - risco à saúde	Consumo humano - organolépticos	Dessedentação animal	Irrigação	Recreação
BC001	1,69	23,88	13,51	3,23	9,41
BC003	0	0	0	0	0
CE001	0	1,79	3,23	0	2,94
CJ002	0	1,89	0	2,38	12,90
CJ004	0	28,95	20	5,71	15,69
CJ005	0	27,78	5,00	0	10
CJ006	0	10	20	0	0
CP001	0	0	5,00	0	0
EN001	0	25,37	8,33	8,20	14,29
EP001	2,86	26,32	5,00	5,71	13,73
EP004	5,56	20	0	0	3,85
EP006	0	0	0	11,76	12,00
FD001	2,86	21,05	0	2,86	9,80
FD002	0	25,00	10	0	3,85
FS002	0	7,89	0	0	1,96
FS003	0	23,68	15,00	8,57	11,76
FS004	5,71	23,68	5,00	0	15,69
FS007	0	15,00	0	0	7,69
GM001	2,86	13,16	0	0	5,88
JB003	13,70	6,67	22,73	16,00	4,63
JB007	4,11	45,33	22,73	13,33	20,37
JB008	1,37	6,67	2,27	1,33	5,56
JB020	0	2,63	5,00	2,86	3,92
JB021	5,71	13,16	0	2,86	5,88
JF001	0	7,14	14,29	2,33	4,62
JF002	5,56	15,00	0	5,56	11,54
JN001	0	0	0	0	0
JQ001	0	18,46	17,50	12,12	11,63
JQ002	0	14,58	8,33	4,55	4,76
JQ003	0	4,17	4,17	0	1,59
JR001	0	43,40	17,86	0	17,74
LP001	3,39	7,46	0	0	3,53
MA001	4,00	10,71	21,43	15,38	5,41
MA003	11,11	15,00	10	11,11	11,54
MC002	0	31,58	0	0	11,76
MC003	0	2,63	0	0	0
MC004	0	0	0	0	0
MC005	6,25	43,75	30	18,75	12,50
MC006	5,88	27,78	20	12,50	4,00
MR001	0	10,53	0	0	3,92
MR002	0	2,63	0	0	1,96
MTC001	0	17,86	20	0	10,53
MTC002	5,71	21,05	5,00	8,57	1,96
MTC006	0	0	0	0	0
PP001	13,16	26,42	14,29	19,05	19,35
PP002	2,86	18,42	0	5,71	0
PP004	0	5,00	10	5,56	0
RM001	0	5,00	0	0	0
SL001	1,89	1,61	5,41	0	3,75
SP001	0	10,45	0	0	3,53
SP002	0	10,53	5,00	2,86	5,88
SP003	0	0	0	0	0
VD001	1,79	10,53	0	0	3,61
VD003	1,37	25,33	9,09	1,33	13,89
VD013	1,56	16,92	0	3,03	4,21
VD020	5,56	10	10	2,78	1,92
VD021	3,77	25,86	10	7,41	22,08
VD022	5,56	5,00	0	0	3,85
VZ001	1,37	10,67	4,55	1,33	4,63
VZ006	3,13	9,23	2,56	1,52	7,37

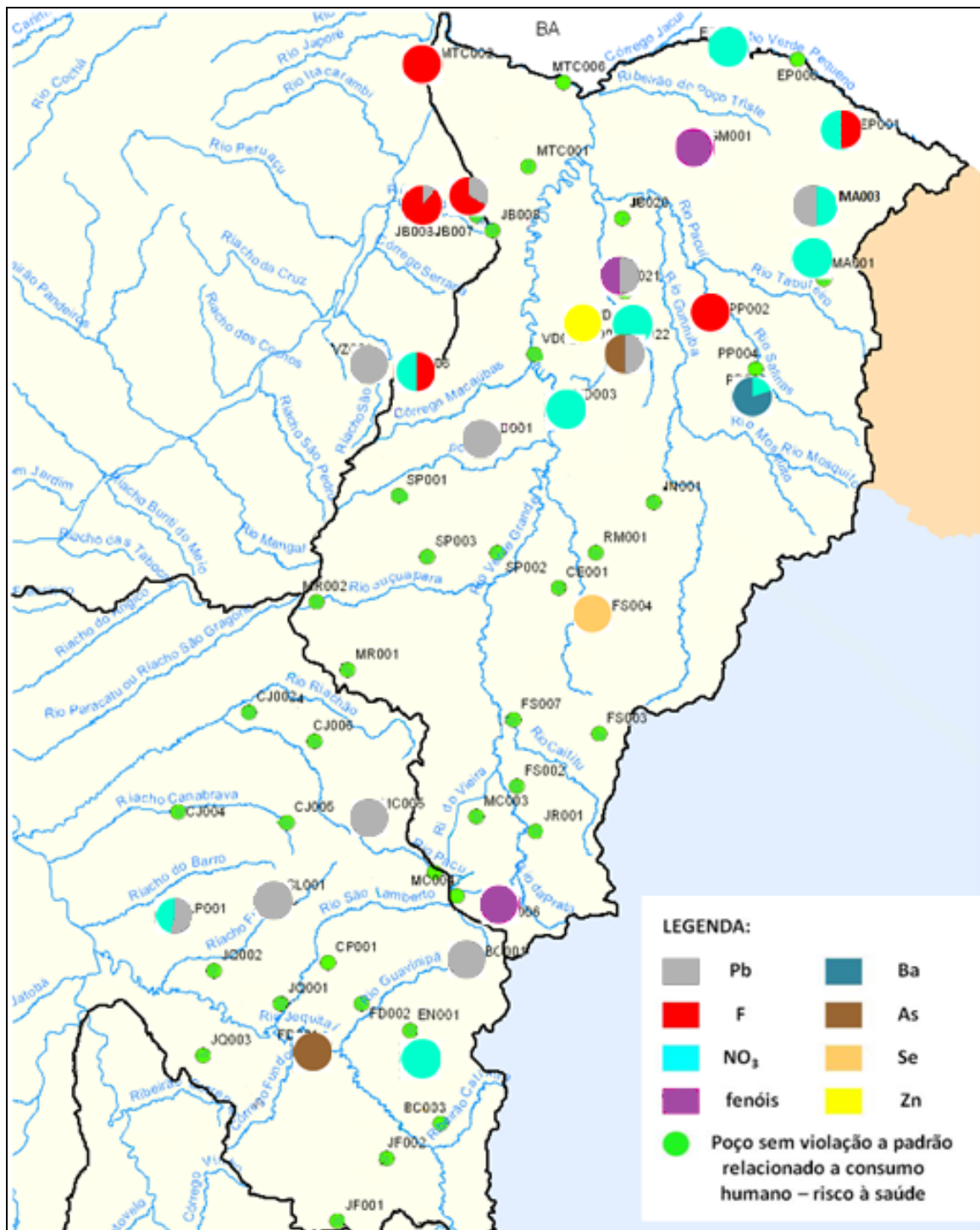
Com relação ao total de medições, cerca de 90% delas são adequadas para fins de consumo humano. Dentre os 10% que se apresentaram inadequadas, destacam-se os parâmetros F, Pb, nitrato e fenóis, além do Fe e Al.

Do percentual de medições que violaram os padrões, 6% foram por excederem limites relacionados a questões organolépticas e o restante, 4,3% refere-se à violação de padrões associados a riscos à saúde. Ainda para o consumo humano, verificou-se que 65% dos poços monitorados no período de 2005 a 2011 apresentaram águas inadequadas para este fim em função de excederem padrões relacionados a riscos à saúde, ainda que a violação possa ter ocorrido em somente uma medição nas águas de determinados poços.

Para permitir uma visualização da distribuição espacial do descumprimento a padrões legais nas águas subterrâneas da área de estudo, mostrado na tabela 7 e na figura 21, foi elaborada a figura 22 que corresponde a análise de padrões para o uso consumo humano e padrões associados a risco à saúde, segundo a Portaria do MS nº 2914/2011. A mesma foi elaborada a partir do mapa da figura 6 e da sua associação com gráficos de torta, referentes a cada poço e considerando os resultados de todo o período de monitoramento nos 60 poços da fase III (resultados da fase III acrescidos dos anteriores para os 21 poços comuns com esta fase).

De forma análoga e sequencialmente são apresentadas, as Figuras 23 a 26, sendo que cada um corresponde à análise de padrões para os seguintes usos: consumo humano – padrões organolépticos, segundo a Portaria do MS nº 2914/2011; dessedentação animal; irrigação; e recreação. Todos se referem aos percentuais relativos dos parâmetros associados à violação por poço, ou seja, dentre a parcela das violações de um dado poço, é mostrada qual a contribuição percentual de cada parâmetro com violação, em relação ao número total de violações.

FIGURA 22: Percentuais relativos de violação de padrões legais relacionados a consumo humano e com risco à saúde – número de violações de cada parâmetro em relação ao número total de violações do grupo de parâmetros especificados, em um dado poço.



A partir da figura 22, observa-se a mesma importância relativa, mostrada na tabela 7, dos parâmetros que violaram padrões relacionados a risco à saúde, ou seja, maior incidência de fluoreto, chumbo e nitrato, considerando as duas sub-bacias. O mapa permite visualizar a

distribuição dos poços e identificar os problemas do uso das águas em cada um deles. Fluoreto e chumbo foram os parâmetros com maior nível de violações na UPGRH SF10. Nitrato e chumbo predominam, em termos de violações, na UPGRH SF6. Provavelmente, uma explicação possível,

Nas duas sub-bacias, os números de poços que descumpriram limite legal foram: seis para fluoreto, onze para chumbo, três para fenóis, dois para arsênio. Em apenas um poço das sub-bacias houve descumprimento para zinco, outro para o selênio e um terceiro para o bário. : na UPGRH SF10 há maior percentual de poços com violação na porção norte, comparado à porção sul da bacia. Dos oito parâmetros que apresentaram alguma violação à legislação quanto ao consumo humano no período avaliado, cinco deles ocorreram em poços na UPGRH SF10. Provavelmente, este fato resulte da maior variedade de ambientes geológicos nesta sub-bacia, conforme já abordado, que se reflete em maiores variações hidroquímicas nas águas subterrâneas. Outra possível razão que contribua para esta diferença observada entre as UPGRH é que a sub-bacia do rio Verde Grande parece estar relativamente mais antropizada – é onde estão os maiores projetos de irrigação e em que as densidades populacionais são ligeiramente superiores.

Em relação ao fluoreto, sua ocorrência parece, conforme estudos anteriormente citados, ter origem natural, associada com a geologia da região. Já o chumbo, não constitui elemento presente na geologia e sua ocorrência deve ser mais bem elucidada, em face da presença em diversos poços distribuídos na área de estudo, sem que possa ser associado a uma ocorrência geológica específica e sem causa aparente. Este aspecto é discutido posteriormente, de forma mais detida. O nitrato destaca-se, em termos de violação, em oito poços na área de estudo, sendo que apenas dois deles estão próximos ou coincidem com as respectivas sedes municipais (EP001 em Espinosa e LP001 em Lagoa dos Patos), indicando possível contaminação das águas subterrâneas por esgotos não tratados. Zinco, selênio e bário são elementos que apresentaram elevados teores, mas sua ocorrência é de forma localizada (violação em um único poço para cada um deles). De forma análoga, o arsênio com violações em dois poços (VD020 e FD001). Estes metais, provavelmente, resultam da interação natural água-rocha e podem estar associados com incrustações geológicas específicas que explicariam a ocorrência localizada dos mesmos. Em relação aos fenóis, suas violações se deram em três poços: VD021 (em Verdelândia), GM001 (em Gameleiras) e MC006 (proximidades da cidade de Montes Claros). A presença de fenóis tem origem antrópica, podendo estar associada,

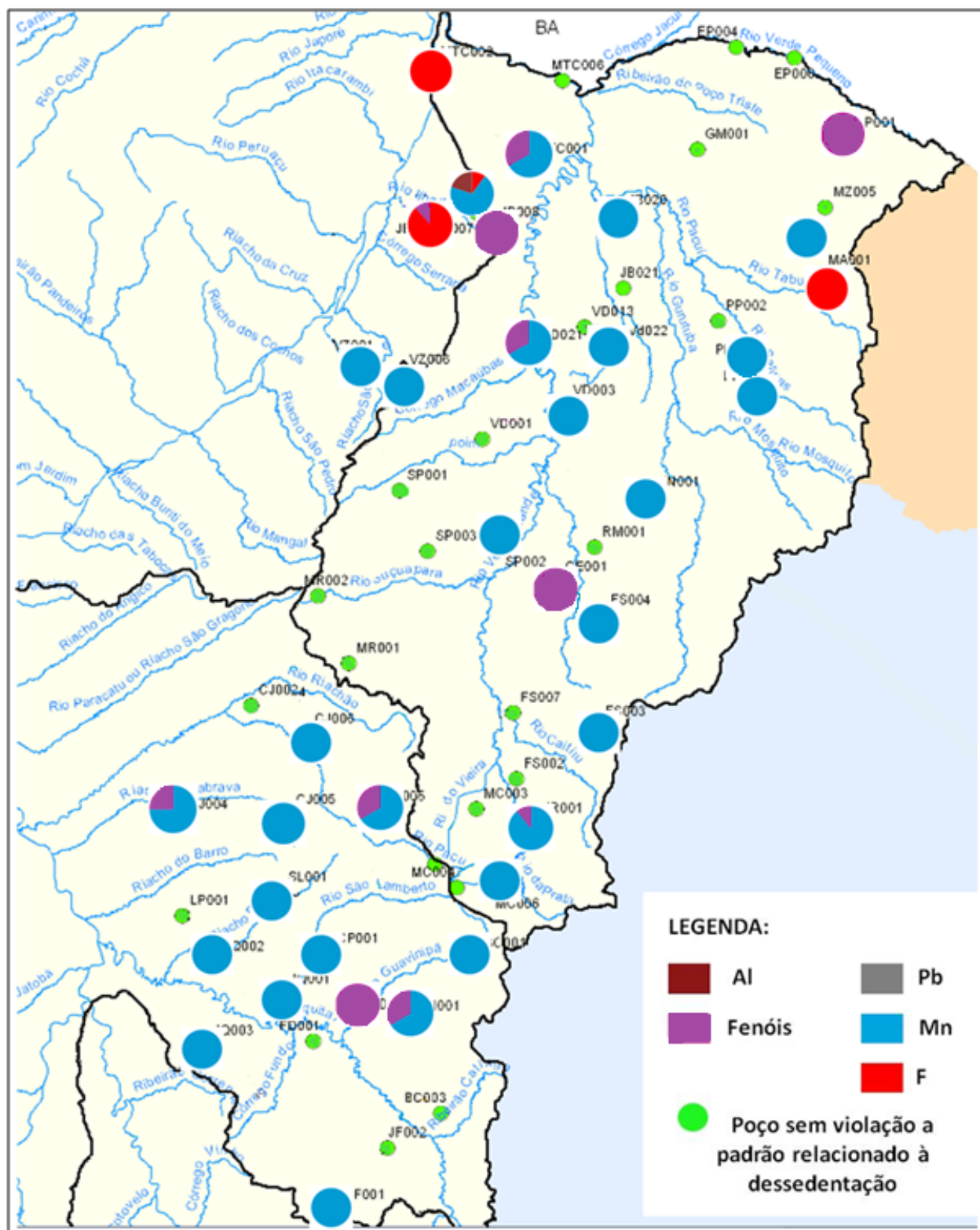
dentre outras fontes, à degradação química parcial de agrotóxicos, conforme discutido posteriormente. Ressalta-se que o poço GM001, embora se localize em área relativamente preservada e distante de cultivos, está localizado a jusante do município de Jaíba que se caracteriza por atividade agrícola relativamente intensa (Perímetro irrigado de Jaíba). As águas do poço MC006, por estar na área de influência de uma cidade pólo da região podem ter sofrido interferência e contaminação por atividades urbanas, a exemplo de armazenamento de combustíveis.

Da figura 23, observa-se maior incidência de violação dos parâmetros ferro, alumínio e turbidez, dentre os padrões organolépticos de potabilidade. Em relação à turbidez e à cor, suas respectivas ocorrências foram mais frequentes na porção sul da área de estudo – na UPGRH SF6.

Quanto aos percentuais de violação dos padrões legais relacionados a consumo humano e com caráter organoléptico, os mesmos foram maiores comparados com o grupo de parâmetros analisados anteriormente. Neste caso, apenas 12,6% dos poços das três fases do monitoramento não apresentaram nenhuma violação e dentre aqueles em que houve descumprimento dos limites legais, os respectivos percentuais variando entre 1,6% e 45% do total de medições no poço para estes padrões.

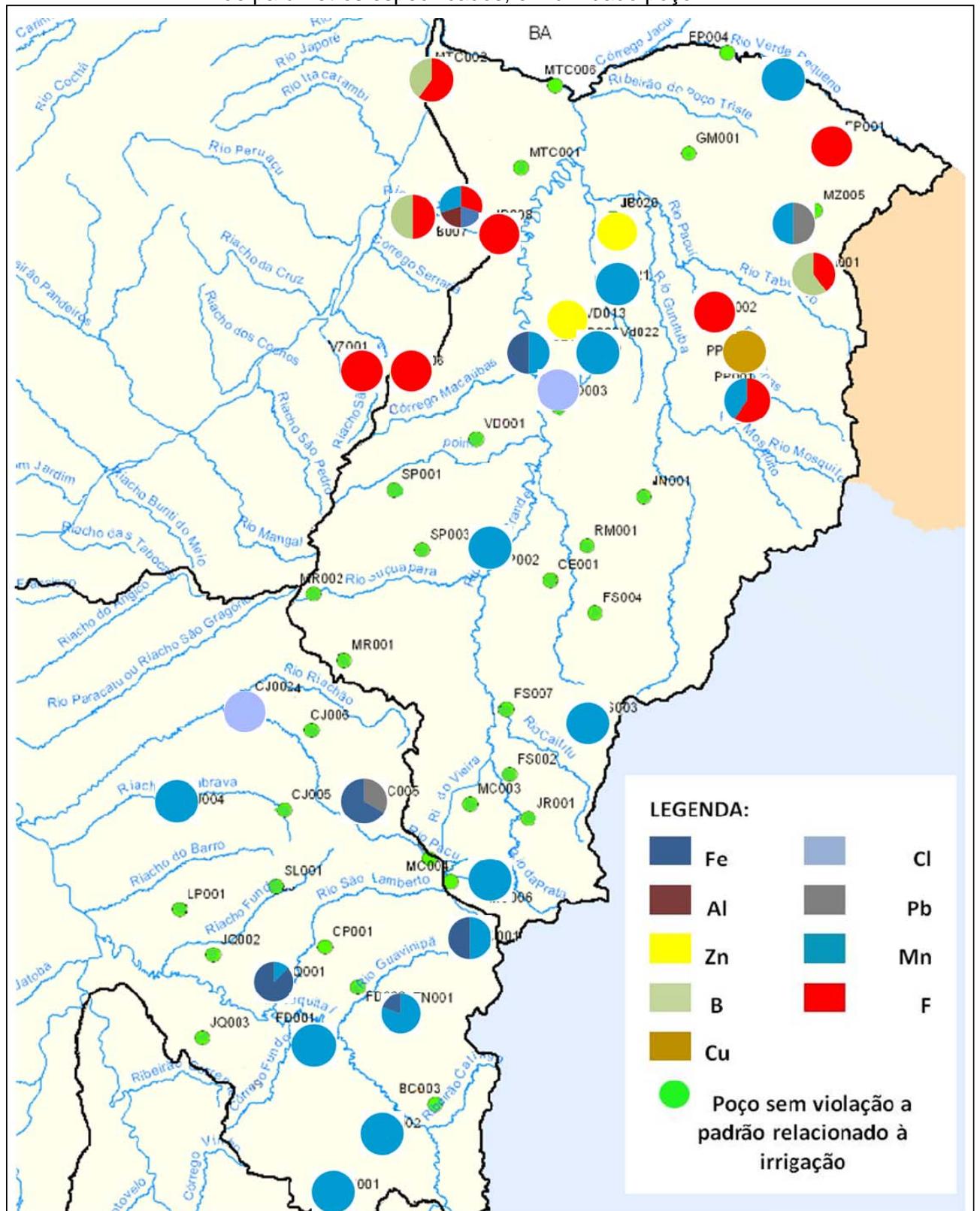
Verificou-se que a salinidade, de modo geral, ficou dentro dos limites de tolerância para o consumo humano. Exceção são os poços VD003, VD004, FS004 e EP001, que ultrapassaram 2.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ em relação à CE (cerca de 1.300 mg/L de STD), superior ao limite preconizado na Resolução Conama 396/2008 (1.000 mg/L para STD, no caso de consumo humano). Cloreto e sódio, parâmetros associados à salinidade, possivelmente tenham causas naturais de ocorrência, sendo bastante comuns em aquíferos de clima semi-árido, com tendência à concentração de sais. De forma semelhante, níveis elevados de dureza são esperados em aquíferos carstificados, como ocorre na região. Manganês e boro podem estar associados a minerais-fonte, de forma mais localizada. Quanto ao sulfato, com violação em três dos 60 poços, sua origem pode estar associada a fontes antrópicas, mas também pode estar associado a minerais-fonte. Já o ferro, alumínio e turbidez, de ocorrência em níveis elevados e de forma generalizada geograficamente nas sub-bacias, indicam possível distúrbio provocado pelo bombeamento, posteriormente discutido.

FIGURA 24: Percentuais relativos de violação de padrões legais relacionados à dessedentação animal – número de violações de cada parâmetro em relação ao número total de violações do grupo de parâmetros especificados, em um dado poço.



Quanto ao uso para dessedentação animal, 99% do total de medições resultaram em águas adequadas para este fim. Em relação ao total de poços monitorados no período de 2005 a 2011, verificou-se que 77% deles apresentaram águas adequadas para a dessedentação animal. Dentre os parâmetros que mais violaram limites para a dessedentação animal está o manganês, seguido de fenóis. Estes dois parâmetros apresentam valores menores ou mais restritivos, de acordo com a legislação, para a dessedentação animal do que os correspondentes para o consumo humano. Daí a ocorrência em níveis frequentes como observado na figura 24. No caso do manganês, este elemento não é esperado em níveis de concentrações elevadas em aquíferos carstificados, sendo que sua ocorrência, comumente associada ao ferro, pode estar relacionada com os problemas de bombeamento (interferência dos poços na qualidade das águas). Os fenóis, de natureza antrópica, podem estar associados com o uso de agrotóxicos, na região, e se constituírem em sub-produtos da degradação dos destes. Como mencionado, os agrotóxicos lançados diretamente no solo não foram detectados nas águas subterrâneas, provavelmente, em função de sua elevada taxa de degradação, o que não impede que compostos de sua decomposição possam atingir os aquíferos. Os fenóis, altamente tóxicos, são contaminantes estáveis em decorrência do anel benzênico e, por isso, podem persistir no ambiente, vindo a atingir águas profundas (MEHLMAN, 1992).

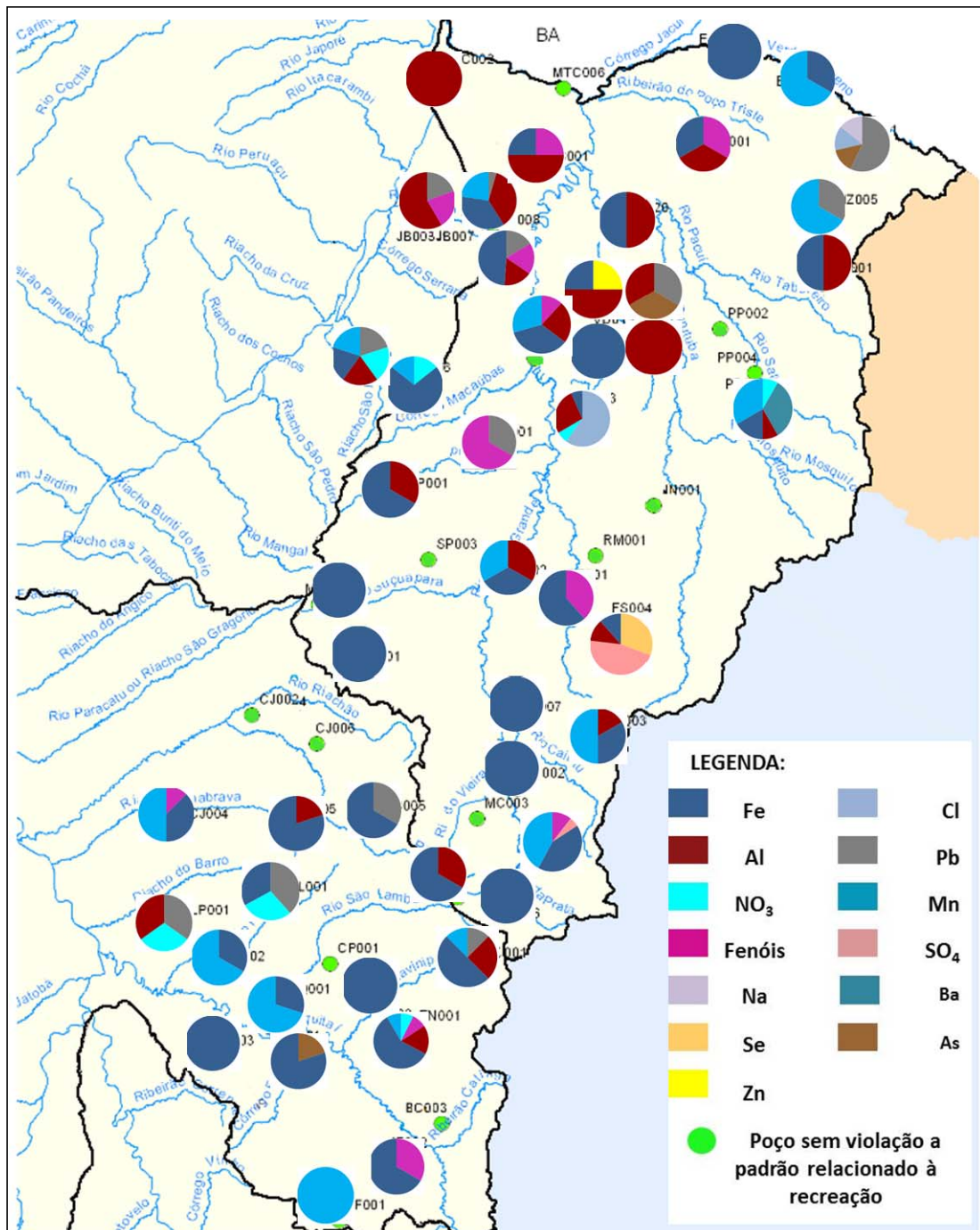
FIGURA 25: Percentuais relativos de violação de padrões legais relacionados à irrigação – número de violações de cada parâmetro em relação ao número total de violações do grupo de parâmetros especificados, em um dado poço.



Com relação ao uso na irrigação, 99,2% do total de medições são adequadas para este fim, de acordo com a Legislação. Para a irrigação, verificou-se que 68% dos poços monitorados no período de 2005 a 2011 apresentaram águas adequadas para este fim. Dentre os parâmetros que excederam os limites destacam-se o fluoreto e o manganês, seguido do ferro e do chumbo, em relação ao total de medições. Com relação ao total de poços, foram os percentuais de violação para parâmetro individual: 10,5% para Manganês; 5,6% para Fluoreto; 3,2% para Ferro; 1,6% para Zinco. Cinco poços (4% deles) excederam padrões de Ferro e Manganês, conjuntamente; dois poços excederam concentrações de Cloreto e Alumínio; e dois de Cloreto e Manganês. Outros poços excederam, individualmente, limites de mais de um parâmetro, a saber: Cobre e Manganês; Fluoreto e Cobre; Fluoreto e Zinco; e Cloreto, Fluoreto, Cobre e Ferro.

Além da comparação dos resultados obtidos com os valores dos limites legais para uso na agricultura, é apresentada posteriormente uma análise da adequação dessas águas em relação à relação iônica entre as concentrações de sódio, cálcio e magnésio nas mesmas, as quais podem também interferir, no longo prazo, em propriedades do solo como fertilidade e permeabilidade.

FIGURA 26: Percentuais relativos de violação de padrões legais relacionados à recreação – número de violações de cada parâmetro em relação ao número total de violações do grupo de parâmetros especificados, em um dado poço.



Para fins de recreação, 98% do total de medições resultaram em águas que são adequadas e em relação ao total de poços monitorados no período de 2005 a 2011, verificou-se que 76% deles apresentaram águas adequadas para recreação. Com relação ao número de poços, ocorreram as seguintes violações para parâmetro individual: 17 poços excederam limites para fenóis, 10 poços ultrapassaram padrão para nitrato, um poço excedeu limite de selênio.

Conjuntamente, um poço excedeu limites de nitrato e de chumbo, e um poço excedeu limites de fenóis e de chumbo.

Além dos percentuais de violação do limite legal em cada poço, também é importante avaliar os níveis em que ocorreram tais violações. A tabela 9 apresenta essa análise com relação aos padrões estabelecidos para o consumo humano.

TABELA 9: Limites legais, valores máximos observados no conjunto de dados, poços correspondentes aos valores máximos observados e relação entre o máximo observado e o limite legal, por parâmetro (127 poços, três fases do monitoramento).

Parâmetro	Limite legal ¹	Valor máximo observado	Unidades	Poço(s) destacado(s) ²	Razão entre o Valor máximo observado e o limite legal
Ferro total	0,3	2,3	mg/L	NR4.14*, EN001, VD021	7,7
Alumínio total	0,2	19,8	mg/L	JB011*, MC002	99
Turbidez	5	477	NTU	JB007, EN001 e MC002	95,4
Cor verdadeira	15	746	UPt	JB007, EN001 e MC002	49,7
Manganês total	0,1	5,5	mg/L	JB016*, SP002, FS003, JB007, JQ001	55
Dureza total	500	1261	mg/L	FS004, VD003	2,5
Cloreto total	250	801	mg/L	VD003	3,2
Fluoreto	1,5	6,3	mg/L	MTC002	4,2
Chumbo total	0,01	0,48	mg/L	MA003	48
Nitrato	10	42	mg/L	EP001	4,2
Sulfato total	250	796	mg/L	FS004	3,2
Fenóis totais	0,003	0,01	mg/L	GM001	3,3
Boro total	0,5	0,9	mg/L	JB003, MTC002	1,8
Sódio total	200	322	mg/L	EP001	1,6
pH ³ (campo)	6-9,5	5,1		FD001	0,9
Bário total	0,7	1,2	mg/L	PP001	1,7
Arsênio total	0,01	0,03	mg/L	VD020	3
Selênio total	0,01	0,013	mg/L	FS004	1,3
Níquel total	0,02	0,021	mg/L	VD010*	1,1
Zinco total	5	7,24	mg/L	VD013	1,4
STD	1000	2169	mg/L	EP001	2,2

Legenda:

Razão entre o valor máximo observado e o limite legal:

Entre 0 e 10

Entre 11 e 50

Maiores do que 51

(1) Adotado o valor - obrigatório ou recomendado - mais restritivo entre a Resolução Conama 396/2008 e a Portaria MS 2914/2011 para consumo humano.

(2) Os poços destacados são aqueles que foram mostrados na tabela porque tiveram resultados da mesma ordem de grandeza do valor máximo observado e que, por isso, merecem atenção. Portanto, não constam, na respectiva coluna, todos os poços em que houve violação.

(3) Para pH, o máximo observado refere-se ao limite inferior recomendado (=6), sendo que não houve nenhum dado maior que o limite superior (=9,5).

* poço desativado da rede de monitoramento atualmente

Ao se considerar a tabela 9 e os resultados de percentuais de violação de cada parâmetro mostrados na figura 21, o ferro, embora apresente o maior número de violações, para consumo humano, ultrapassou em 7,7 vezes seu limite legal, enquanto alumínio e turbidez atingiram 99 e 95,4 vezes os limites, respectivamente. Estes parâmetros (alumínio e turbidez) foram associados pela AF na UPGRH SF10.

Comparativamente, o manganês, elemento comumente associado ao ferro, apresentou valores mais elevados se comparados a este metal, tendo em vista ter atingido valor 55 vezes superior ao próprio limite legal para consumo humano. Em relação aos parâmetros de caráter organoléptico, cabe observar que há relativa coincidência de poços com problemas de elevada turbidez com aqueles em que a ocorrência de Fe, Al e Mn foram mais críticas. As elevadas concentrações de ferro, alumínio e manganês não são resultados esperados para águas subterrâneas em ambientes cársticos, o que deverá ser averiguado. A ocorrência destes três elementos, em níveis que violam os limites legais, deu-se de maneira relativamente generalizada, já que atingiu grande parcela dos poços monitorados. Como a turbidez também apresentou valores excessivos, da mesma ordem do alumínio, pode estar havendo interferências do bombeamento e de possível contaminação das águas por esses poços de extração, o que deverá ser mais bem avaliado. Para tanto, serão necessários estudos mais aprofundados da geologia, bem como investigação da possibilidade do próprio poço de extração estar contribuindo para estes valores, o que poderá ser feito a partir de levantamento do perfil, das características de construção e das condições de operação e de manutenção destes poços.

Com relação aos parâmetros que se associam a risco à saúde, segundo a legislação, os mesmos não ultrapassaram mais do que cinco vezes os respectivos limites de consumo humano, com exceção para o chumbo, 48 vezes superior ao padrão legal, o que é, a princípio, bastante preocupante.

Dentre os parâmetros limitados para consumo humano e que apresentam risco à saúde, o chumbo é, sem dúvida, um dos elementos mais importantes em função, tanto do grau de violação do padrão legal, quanto em relação à sua toxicidade. Responsável, nas intoxicações crônicas pelo saturnismo, o chumbo pode ocasionar: alteração do metabolismo oxidativo e dos mecanismos intracelulares de sinalização; redução da condução neural; danos ao sistema nervoso central; alteração de enzimas e proteínas estruturais; danos à integridade da barreira hematoencefálica, à síntese de colágeno e à permeabilidade vascular; alterações no transporte

membranar; perturbação da biossíntese da hemoglobina e anemia; aumento da pressão sanguínea; danos aos rins; dentre outros (MOREIRA & MOREIRA, 2004).

Todavia, em relação ao chumbo, número relativamente elevado de valores extremos evidenciados nos gráficos box-plot indicaram a necessidade da elaboração dos gráficos de linha temporais apresentados na figura 27, para alguns poços de monitoramento comuns a mais de uma fase do monitoramento. Tais gráficos ilustram a tendência de ocorrência destes valores extremos para o chumbo (concentrações entre 4 a 13 vezes os valores dos *outliers* superiores nos poços de monitoramento em que houve valor extremo) em datas de amostragem específicas (1ª campanha de monitoramento – abril/2005, 4ª campanha – março/2006 e 5ª campanha – outubro e novembro/2007).

Além disso, a ocorrência de valores extremos nestas coletas ocorreu de forma generalizada na área de estudo, em 10 poços de monitoramento, a saber: BC001, LP001, SL001, JB007, VD014, VD001, JB003, VZ001, JB008, VD003.

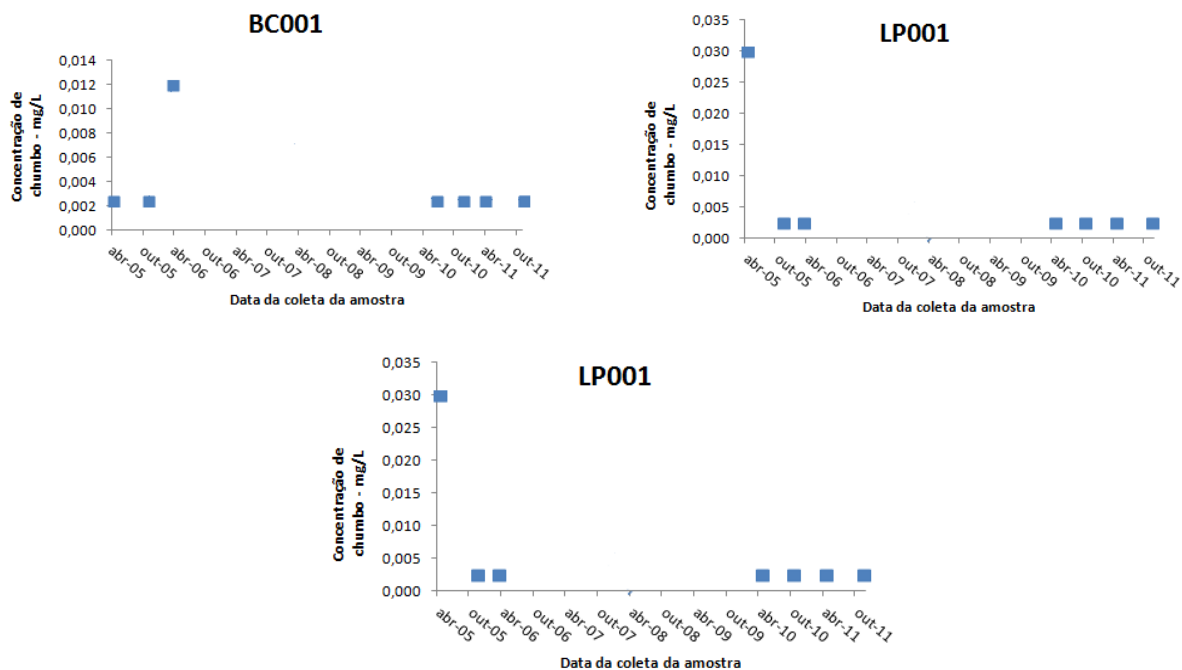
A conjugação da ocorrência de valores bastante elevados para o chumbo com a observação de muitos dados com valores extremos em relação à distribuição dos mesmos e sua associação com o fato destes resultados extremos terem ocorrido em determinadas campanhas e também de forma não localizada na área de estudo indicam possível erro sistemático nos dados obtidos. É desejável que novas análises sejam feitas futuramente com maior número de dados sem, contudo, desconsiderar possível erro nas análises executadas para este parâmetro. Em vista disso, é recomendável que, com a continuidade do monitoramento, os dados a serem gerados nestes poços sejam cuidadosamente examinados com relação ao chumbo e, mantida a tendência atual, se avalie a pertinência em invalidar estes resultados de monitoramento.

Ressalta-se que comportamento semelhante não ocorreu para os demais parâmetros analisados no monitoramento das águas subterrâneas na região do Estado. Embora haja valores extremos, os mesmos parecem ocorrer de maneira aleatória entre as diversas campanhas realizadas e, ao ocorrerem, não é de maneira generalizada nos poços monitorados como ocorre com o chumbo. Ou seja, as ocorrências de valores extremos são pontuais.

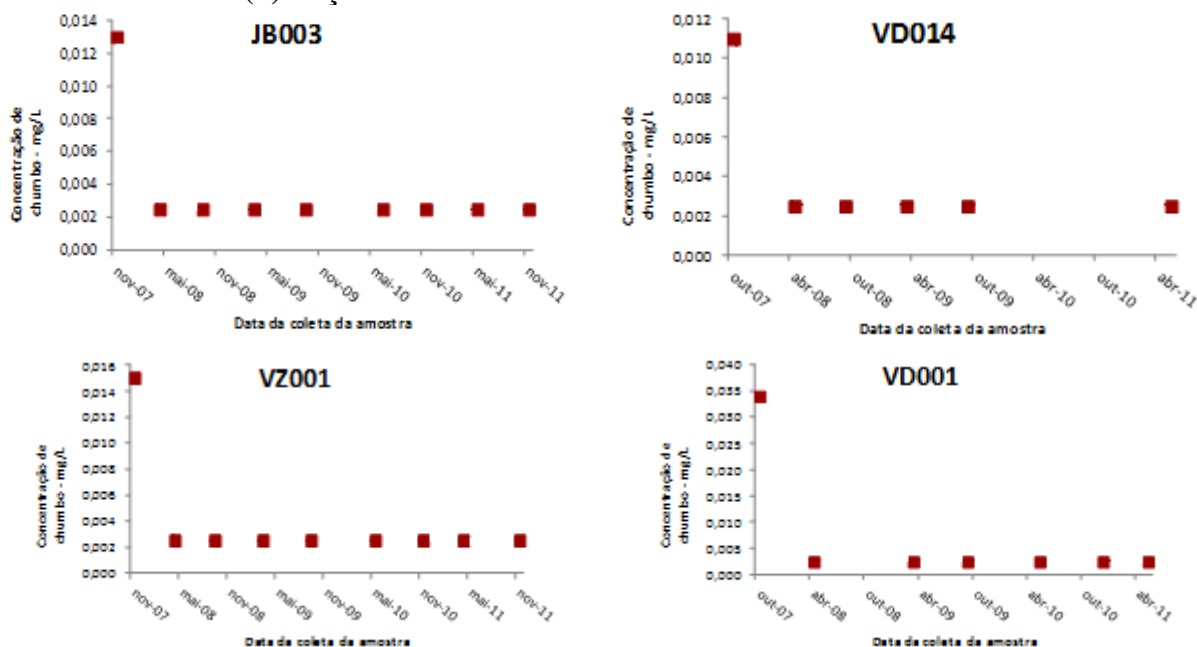
FIGURA 27: Gráficos de série temporal para os valores medidos de concentração de chumbo – mg/L – em alguns poços comuns entre diferentes fases do monitoramento, selecionados: (a) BC001, SP001, LP001, SL001 (comuns entre fases 1 e 3); e (b) JB003, VD014, VZ001 e VD001 (comuns entre fases 2 e 3).

(a) Poços comuns de monitoramento entre as fases I e III

(não houve monitoramento entre 2007 e 2009)



(b) Poços comuns de monitoramento entre as fases II e III



5.3.2 Padrões recomendados para uso das águas na irrigação

Em climas semiáridos, caso do Norte de Minas, as altas taxas de evaporação da água tendem a enriquecer o solo com os solutos, ao longo do tempo, potencializando o risco de salinização. Dois parâmetros são usados para avaliar a adequação da água na irrigação: a razão de adsorção de sódio – RAS (ou SAR em inglês) e a salinidade, medida indiretamente pela CE. A RAS indica a porcentagem de sódio contida na água que pode ser adsorvido pelo solo, sendo sua análise de grande importância, uma vez que concentrações excessivas deste elemento podem causar o endurecimento e a impermeabilização do solo. A salinidade também é um fator limitante ao uso na agricultura, impactando os solos e o desenvolvimento das plantas (LIMA *et al.*, 2010; HUSSEIN *et al.*, 2012).

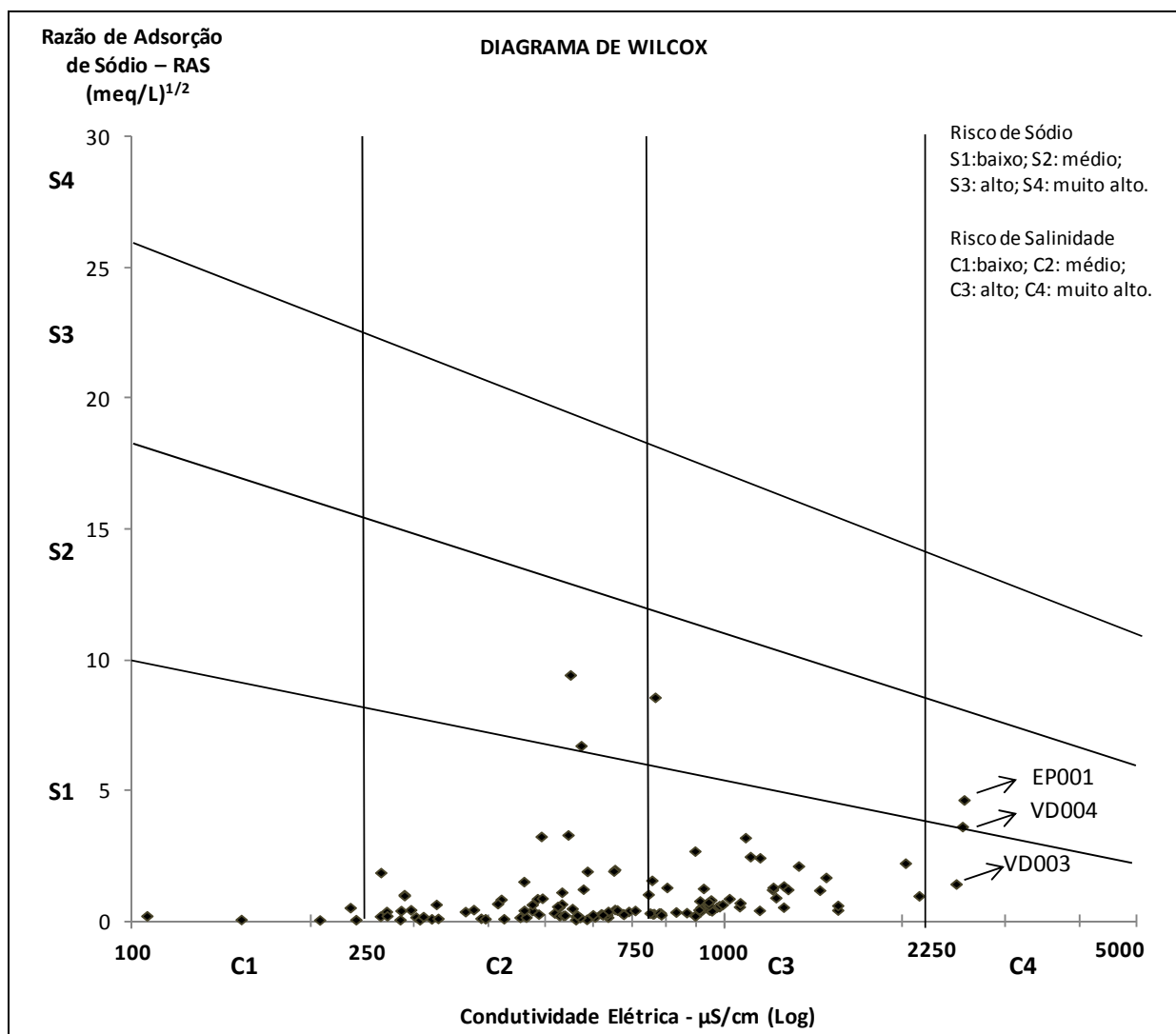
Para avaliar a adequação das águas subterrâneas do aquífero Bambuí na área de estudo para fins de irrigação, além da verificação do atendimento aos padrões legais, foi feita a classificação das águas para este uso específico, baseada na razão de adsorção de sódio (RAS) e na condutividade elétrica medidas na água.

A RAS variou de zero a 10,1 (meq/L)^{1/2}, com mediana de 0,48 (meq/L)^{1/2}. A classificação das amostras de água, de acordo com o Diagrama de Wilcox, é apresentada na figura 28. Cada ponto do diagrama refere-se à mediana das amostras de água de cada poço de monitoramento para os 127 poços das três fases do monitoramento (período 2005-2011).

Como observado, a maioria das amostras concentrou-se nos campos C2-S1 e C3-S1 do diagrama de Wilcox, ou seja, com risco de salinidade moderado e risco de sódio baixo; seguido de risco de salinidade alto e risco de sódio baixo, respectivamente. Um único poço (MTC002, no extremo noroeste da área de estudo) apresentou águas no campo C3-S2 com risco de salinidade alto e risco de sódio moderado. Um único poço foi enquadrado no campo C4-S1, ou seja, risco de salinidade muito alto e risco de sódio baixo (VD003, centro-norte da área). Dois poços apresentaram águas no campo C2-S2 com risco de salinidade moderado e risco de sódio moderado (JB003 e JB021, ao norte da área) e outros dois poços tiveram suas águas no campo C4-S2, com risco de salinidade muito alto e risco de sódio moderado (VD004, ao centro e EP001, a nordeste da área de estudo). Todos os poços localizados na UPGRH SF6 ficaram nos campos onde se concentraram a maioria dos poços - C2-S1 e C3-S1. Observa-se, como esperado, uma tendência de aumento gradual das águas por sódio a

partir das áreas de recarga, com concentrações de RAS maiores nos poços mais ao norte, de forma predominante.

FIGURA 28: Diagrama de Wilcox – medianas das concentrações da RAS e da CE – 127 poços monitorados no período de 2005 a 2011 (escala semilogarítmica).



Embora as águas de 32% dos poços sejam inadequadas para uso na agricultura em função da violação a limites da legislação ambiental, o risco por sódio não constitui fator crítico, mas a condutividade elétrica foi um fator limitante, localizadamente.

Nenhum poço de monitoramento teve suas águas enquadradas nos níveis S3 ou S4, de risco de sódio alto ou muito alto, o que reflete em pouco risco de modificação na estrutura do solo pelo uso continuado dessas águas na irrigação. Por outro lado, a aplicação das águas dos três

poços enquadrados em C4, com risco de salinidade muito alto – VD003, VD004 e EP001, na irrigação pode ocasionar perdas relativas de produtividade agrícola.

5.4 Aspectos gerais do aquífero Bambuí na área de estudo

5.4.1 Classificação hidroquímica das águas subterrâneas

Fácies hidroquímicas são corpos de água, no aquífero, com composições químicas diferentes, sendo que cada fácies hidroquímica define um grupo de águas subterrâneas com composição semelhante e tem, tipicamente, uma origem ou padrão de evolução único. As fácies são uma função da litologia, cinética da solução e padrão do fluxo do aquífero e fornecem indicações sobre os processos ambientais que atuam continuamente. Elas são classificadas com base nos íons dominantes, podendo ser mais facilmente expressas por meio do diagrama trilinear de Piper (MELO *et al.*, 2008). Identificar os principais constituintes iônicos da água e quantificá-los é, portanto, dentre os requisitos de qualidade analítica, de extrema importância para a análise hidroquímica. O cálculo do erro dos resultados é utilizado para avaliar as informações das análises laboratoriais confirmando, portanto, a consistência dos resultados. Muitos critérios podem ser utilizados, sendo o mais comum deles o balanço de cargas, empregado no presente estudo.

As relações iônicas predominantes, utilizando as unidades de miliequivalente-grama por litro (meq / L), no aquífero do Bambuí caracterizam-se pela sequência: $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > HCO_3^- + CO_3^{2-} > Cl^- > SO_4^{2-}$. Foram identificados cinco tipos de classes nas águas do Bambuí, sendo que 85,5% são de águas bicarbonatadas cálcicas, 7,3% cloretadas cálcicas e 5,6% bicarbonatadas sódicas. As cloretadas sódicas e bicarbonatadas magnesianas são a minoria com 0,8% cada.

Os cálculos do balanço iônico, feitos para cada amostra obtida (águas dos 127 poços no período 2005-2011), resultaram em erro médio de 2,69%. Tomando os valores absolutos dos erros, 25% deles não atenderam ao critério de erro máximo equivalente a 10%, sendo que 90% das medições apresentaram erro inferior ao valor de 20%. A memória de cálculo do balanço iônico é apresentada no Apêndice B, com alguns exemplos dos resultados dos cálculos efetuados, para parte das amostras, a título exemplificativo.

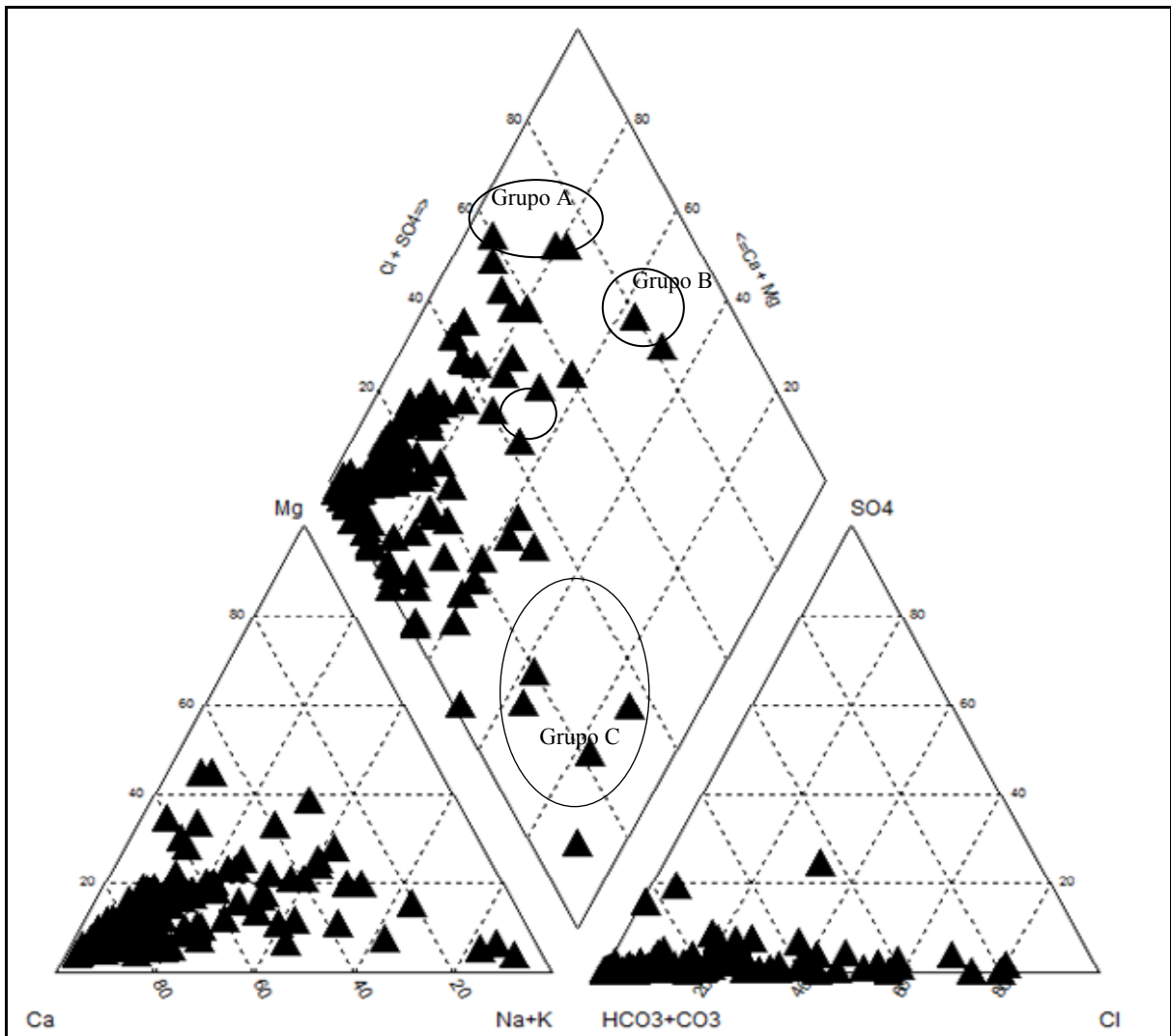
Este resultado, com praticamente um quarto das medições com erro superior a 10%, demonstra a necessidade de melhoria das análises laboratoriais, e que seja feita uma

intervenção breve ao se constatar estas ocorrências, antes que os dados sejam validados. Portanto, o próprio executor das análises deveria verificar o balanço iônico, repetindo as análises com erro maior do que o aceitável.

Outro aspecto identificado foi a necessidade da substituição da atual metodologia analítica do sulfeto que, em função do LD ser superior ao limite legal, inviabilizou a avaliação apropriada deste parâmetro.

Os valores analíticos dos elementos maiores obtidos permitiram a definição das fácies hidroquímicas de cada poço apresentadas no Diagrama de Piper da figura 30. Do total de amostras de águas, 50,4% delas águas pertencem às fácies hidroquímicas $\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-Na}^+\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}\text{-Cl}^- \text{-SO}_4^{2-}$; e 29% pertencem às fácies hidroquímicas: $\text{Ca}^{2+}\text{-Na}^+\text{-Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}\text{-Cl}^- \text{-SO}_4^{2-}$. As fácies hidroquímicas $\text{Na}^+\text{-Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-Cl}^- \text{-HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}\text{-SO}_4^{2-}$ e $\text{Mg}^{2+}\text{-Ca}^{2+}\text{-Na}^+\text{-HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}\text{-Cl}^- \text{-SO}_4^{2-}$ representam, cada uma, apenas 0,8% das águas dos poços analisados.

FIGURA 29: Diagrama trilinear de Piper para as medianas das concentrações iônicas nos 127 poços monitorados no período de 2005 a 2011.



As relações entre os íons dissolvidos na água subterrânea podem indicar certa relação com o litotipo do qual a água se origina (SANTOS, 1997). A predominância das águas bicarbonatadas cálcicas é característica de aquíferos associados ao carste e indica a presença dos minerais calcita e dolomita nas rochas. De acordo com Bertolo e colaboradores (2007), as águas com características mais magnesianas estão associadas, neste tipo de aquífero, a presença de calcários ricos em dolomitas, ou ainda a presença de argilo-minerais ricos em magnésio, combinados ao carbonato de cálcio. Os calcários (rochas sedimentares) e os mármore (rochas metamórficas) são constituídos basicamente de calcita e dolomita e as águas de infiltração que percolam pelas fendas daquelas rochas dissolvem, ainda que parcialmente seus minerais. Com o intemperismo, a calcita e a dolomita se dissolvem e o solo

resulta dos minerais acessórios, podendo predominar solos arenosos ou argilosos, dependendo dos outros minerais presentes. No caso do carste, este intemperismo pode até mesmo formar, após milhares de anos e em decorrência de determinada composição rochosa local, canais e cavernas de dissolução.

Na figura 30 foram destacadas as águas de alguns grupos de poços que se diferenciaram da maior parte da classificação, ou seja, águas que não foram classificadas como bicarbonatadas cálcicas. Dentre estes, destacam-se: águas dos poços PP001, VD021, VD003 e BC001, classificadas como cloretadas cálcicas (Grupo A); águas cloretadas sódicas dos poços EP001 e EP002 (Grupo B); e águas bicarbonatadas sódicas dos poços PP002, JB020, JB021, JB003 e MTC002 (Grupo C). Um único poço apresentou águas do tipo predominante bicarbonatada magnésiana, o poço FD001 (destacado na figura). Dentre estes poços, com tipos de água diferenciados, observa-se que o EP001 e PP001 encontram-se na borda leste da bacia geológica, sobre o domínio hidrogeológico do cristalino. Já os poços JB003 e MTC002, ambos do grupo das bicarbonatadas sódicas, encontram-se relativamente próximos e em região de vale, na margem esquerda do rio São Francisco e foram agrupados na Análise de Cluster (Grupo III da AC).

5.4.2 Determinação dos fluxos subterrâneos na área de estudo e do gradiente hidráulico médio

As águas subterrâneas ocorrem no calcário Bambuí em zonas caracterizadas com porosidade secundária, sendo que suas características hidráulicas exibem ampla variabilidade refletindo a heterogeneidade de comportamento dos aquíferos carbonáticos. Na região de estudo, a elevação do lençol freático, tomando como referência o nível do mar, variou de 436 a 928 m e o gradiente hidráulico médio calculado foi de 0,34.

A figura 30 mostra a distribuição dos níveis estáticos do lençol freático na área de estudo e, conseqüentemente, indica os prováveis sentidos dos fluxos regionais das águas subterrâneas, em função de gradientes hidráulicos localizados. De modo geral, o fluxo subterrâneo predominante na área de estudo tem sentido de SW para NE, coincidindo com a drenagem do curso de água principal da região, o rio São Francisco.

É o que se observa na porção norte da área de estudo, a leste dos pontos VZ001 e VZ006, em que o sentido do fluxo tende para o vale do rio Verde Grande. Já a oeste, embora com cobertura de pontos bem menos extensa, observa-se tendência de escoamento no sentido W e nos demais pontos da região tende para NE no sentido do rio São Francisco.

Na porção sul, os fluxos regionais estimados de acordo com os níveis estáticos indicam um escoamento preferencial das águas em direção ao vale do rio Jequitaiá, a sudoeste da Serra dos Fonseca e de porção do grupo espinhaço, ou seja, de NE para SW. Em sentido contrário, o fluxo observado a nordeste das unidades geomorfológicas citadas é no sentido SW para NE, em direção ao rio Verde Grande.

Particularmente, nas regiões de mudanças nos sentidos dos fluxos, é desejável melhor detalhar os escoamentos subterrâneos nestas regiões o que poderá ser feito como um adensamento futuro do monitoramento dos níveis estáticos.

De modo geral, pode-se observar que as águas subterrâneas do aquífero Bambuí na região de estudo tende a acompanhar o relevo da região, com comportamento característico de aquífero livre.

Para cada parâmetro de qualidade selecionado, são apresentados em sequência e analisados os seguintes resultados relativos à área de estudo:

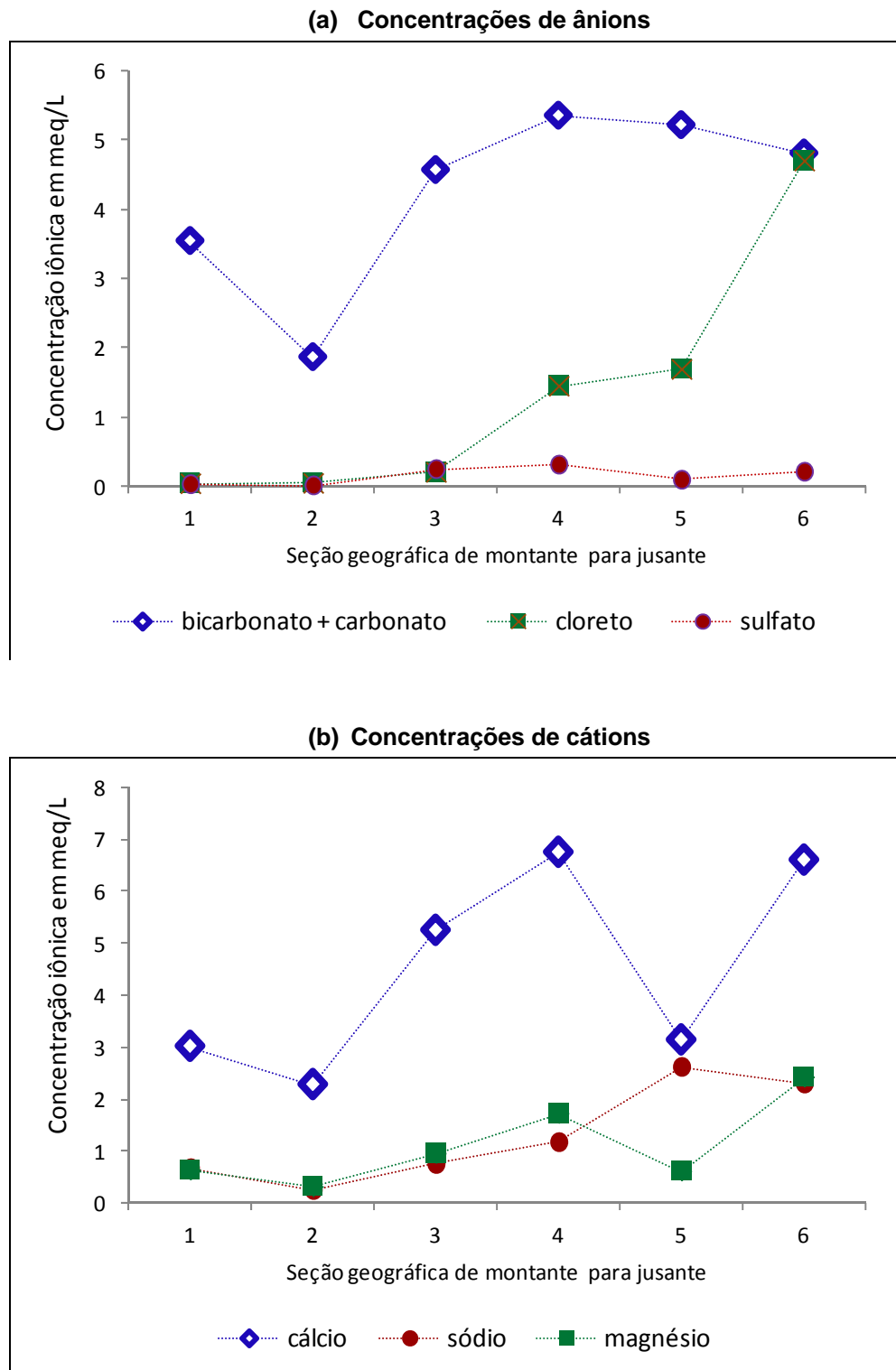
- Gráficos que indicam as tendências das variações das concentrações dos diferentes parâmetros de qualidade em relação ao fluxo predominante do aquífero, de montante para jusante – 6 seções hidroquímicas ao longo do caminho do fluxo predominante – SW-NE para os íons dominantes – Ca^{2+} , Mg^{2+} e Na^+ ; e $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, Cl^- e SO_4^{2-} e 12 seções hidroquímicas para os demais parâmetros físico-químicos selecionados.
- Mapas de plumas de isóteos para os resultados dos períodos secos e chuvosos.

Esperava-se um aumento dos valores dos parâmetros associados à salinidade das águas subterrâneas (íons, CE, STD, alcalinidade e dureza) no decorrer da trajetória das águas subterrâneas em função da tendência de dissolução gradual das rochas percoladas. Entretanto, este comportamento não foi observado para os íons dominantes do aquífero na área de estudo, conforme mostrado na figura 31, com exceção do cloreto.

Uma comparação entre o comportamento dos ânions indica tendência de aumento gradual nas concentrações do cloreto com a linha de fluxo. Já os íons bicarbonato/carbonato, analisados conjuntamente, e o sulfato não apresentam nenhuma tendência clara de variação com o fluxo, havendo predomínio dos carbonatos/bicarbonatos e do cloreto em relação ao sulfato em todos os pontos de monitoramento, o que é coerente com a classificação das águas feita anteriormente. Quanto à evolução dos cátions analisados, nenhum deles apresentou tendência de variação com o fluxo subterrâneo predominante no Bambuí, indicando possível variação aleatória em relação ao trajeto principal de percolação das águas nas porções sucessivas do aquífero de SW para NE. Em toda a área de estudo, as concentrações de cálcio, em meq/L, apresentam-se maiores que os dois outros cátions analisados, sódio e magnésio, o que também é coerente com a classificação das águas dos poços, uma vez que 92,8% das amostras foram de águas de natureza cálcica.

É bastante provável que o aumento da concentração de cloreto no decorrer do fluxo ocorra por dissolução deste íon a partir do meio rochoso. Por outro lado, possível explicação para o comportamento dos demais íons no aquífero, seria a ocorrência de reações de dissolução em equilíbrio com reações de precipitação no decorrer do fluxo desta região e talvez a redução da dissolução de alguns sais decorrente das baixas taxas de precipitações, características do clima semiárido da região.

FIGURA 31: Evolução dos resultados (medianas) dos íons principais monitoradas em seis seções hidroquímicas sequenciais ao longo do fluxo predominante das águas subterrâneas na área de estudo para (a) ânions e (b) cátions.



Os mapas de isotores dos íons predominantes – HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Na^+ e Mg^{2+} – são apresentados, sequencialmente, nas figuras 32 a 42.

FIGURA 32: Plumas de isotores da alcalinidade de bicarbonato (mg/L): (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos.

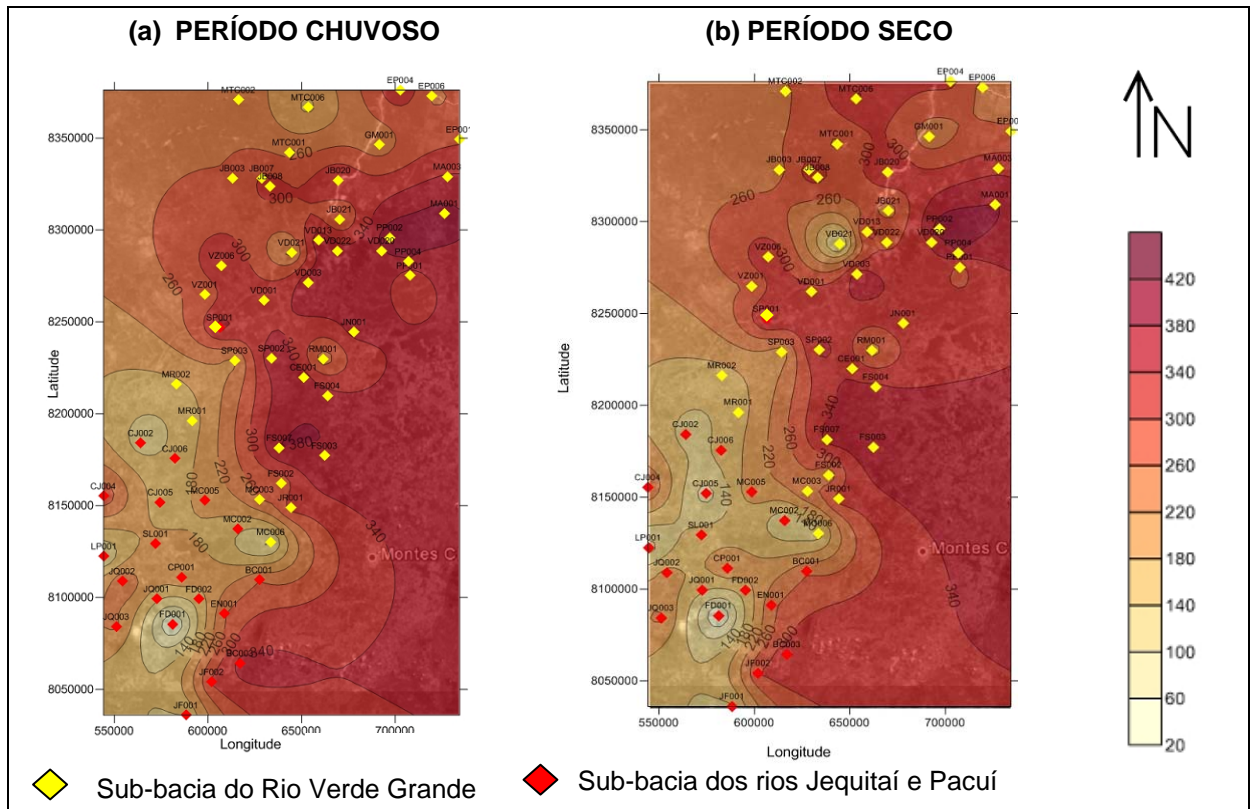


FIGURA 33: Plumagens de isóteores do cloreto total (mg/L): (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos.

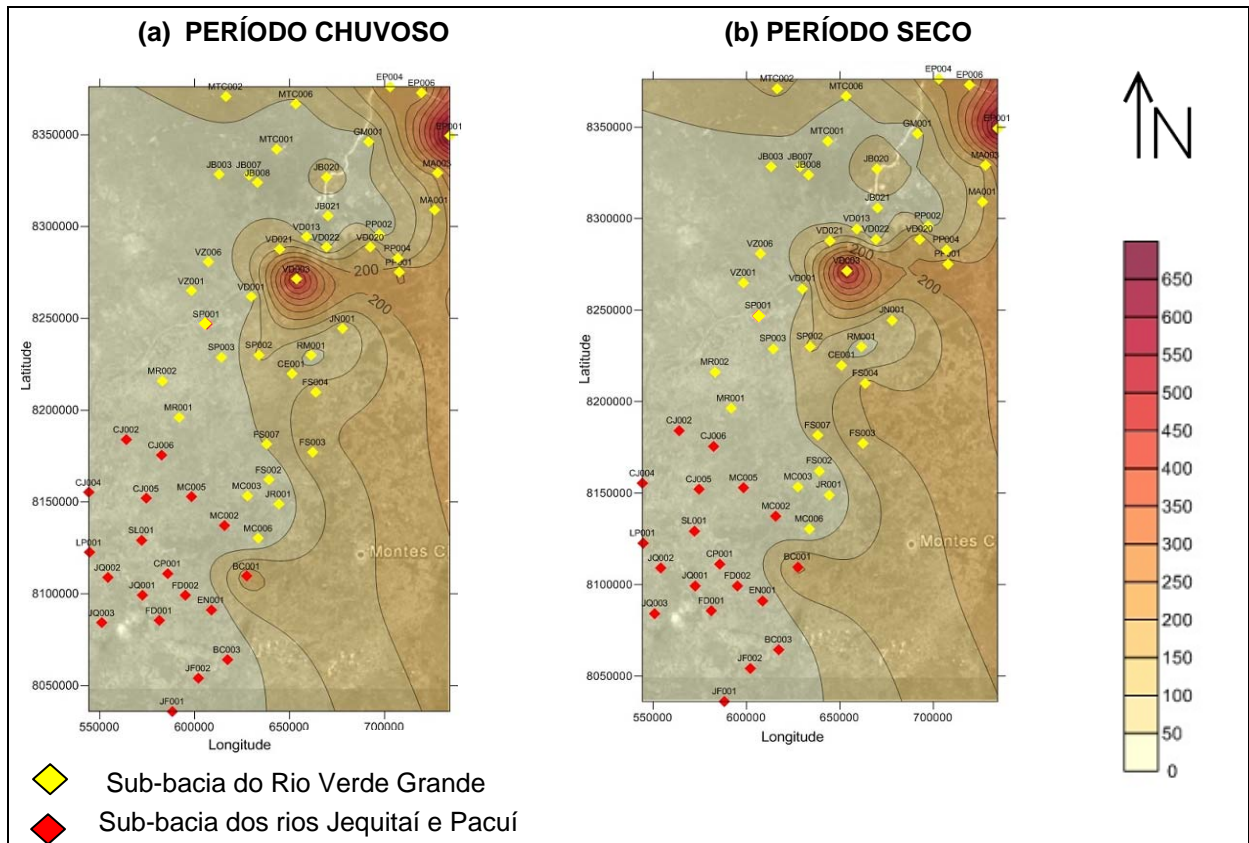


FIGURA 34: Plumagens de isóteores do sulfato total (mg/L): (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos.

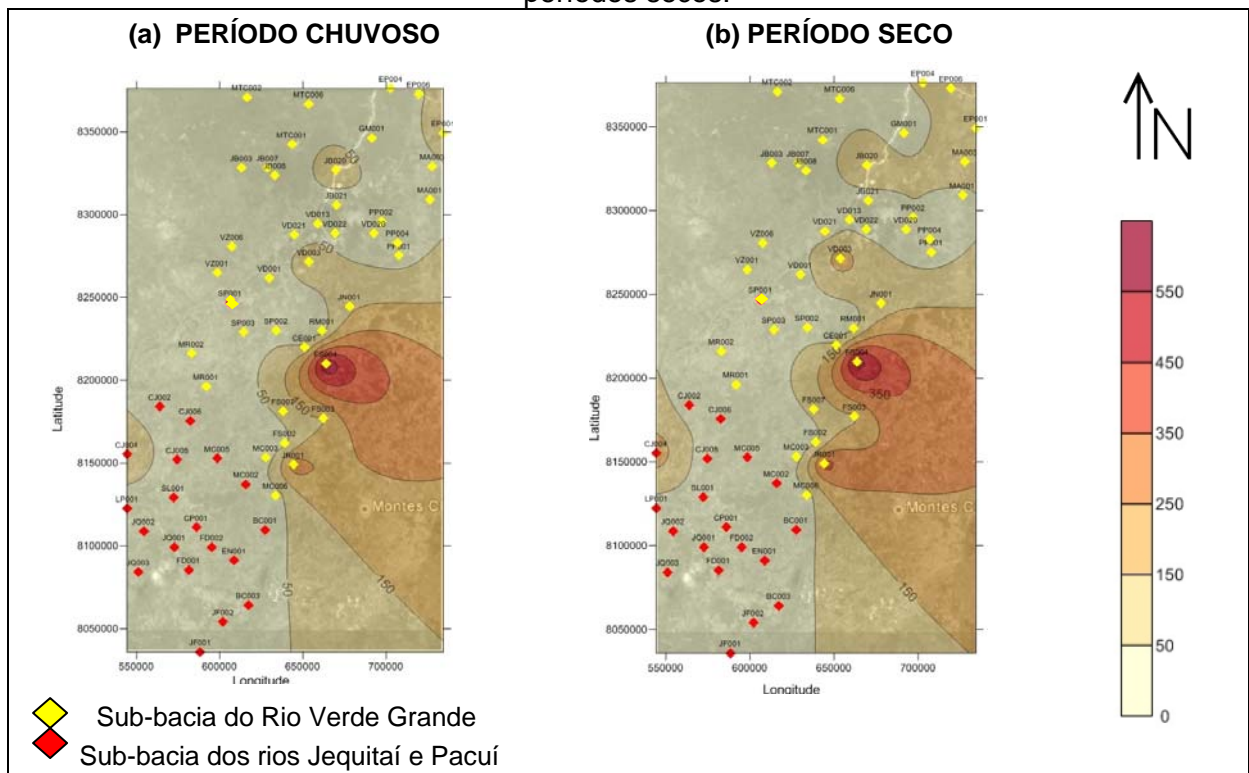


FIGURA 35: Plumas de isotores do cálcio dissolvido (mg/L): (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos.

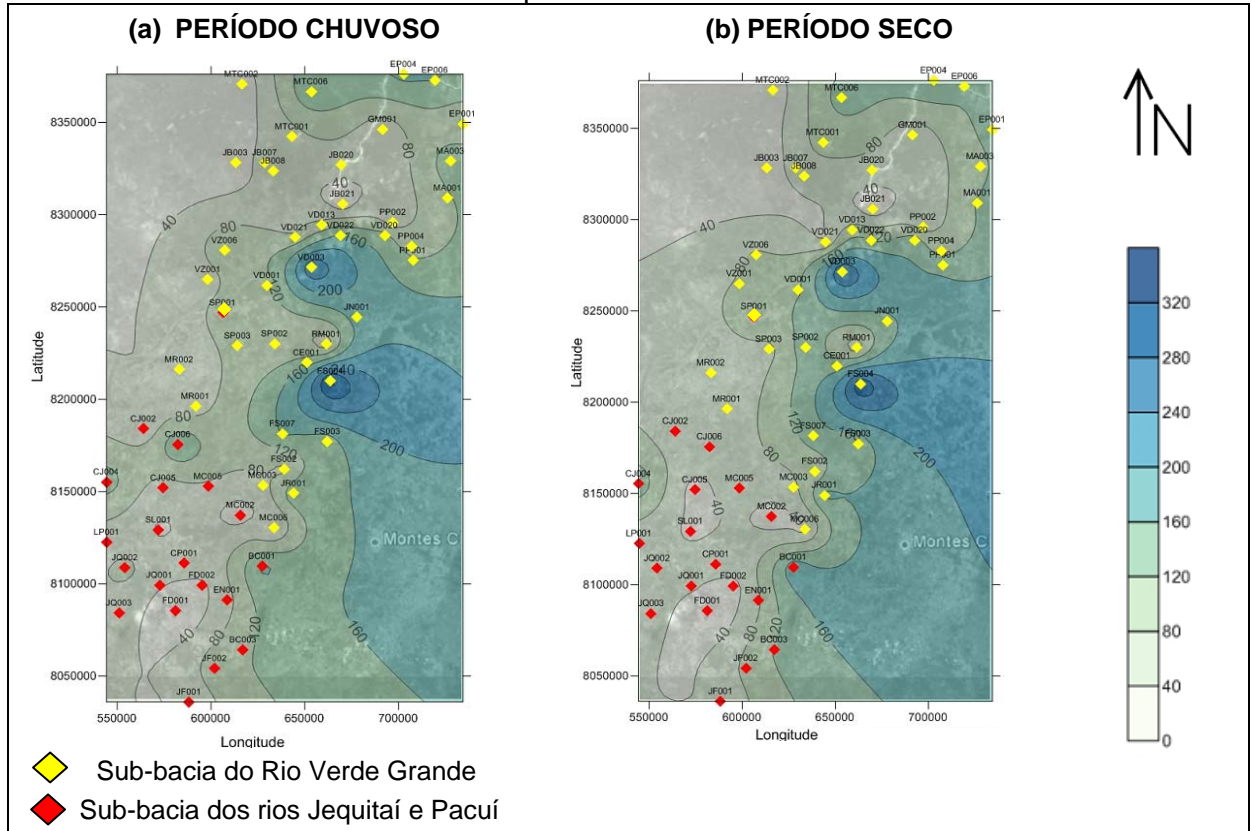


FIGURA 36: Plumas de isotores do sódio total (mg/L): (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos.

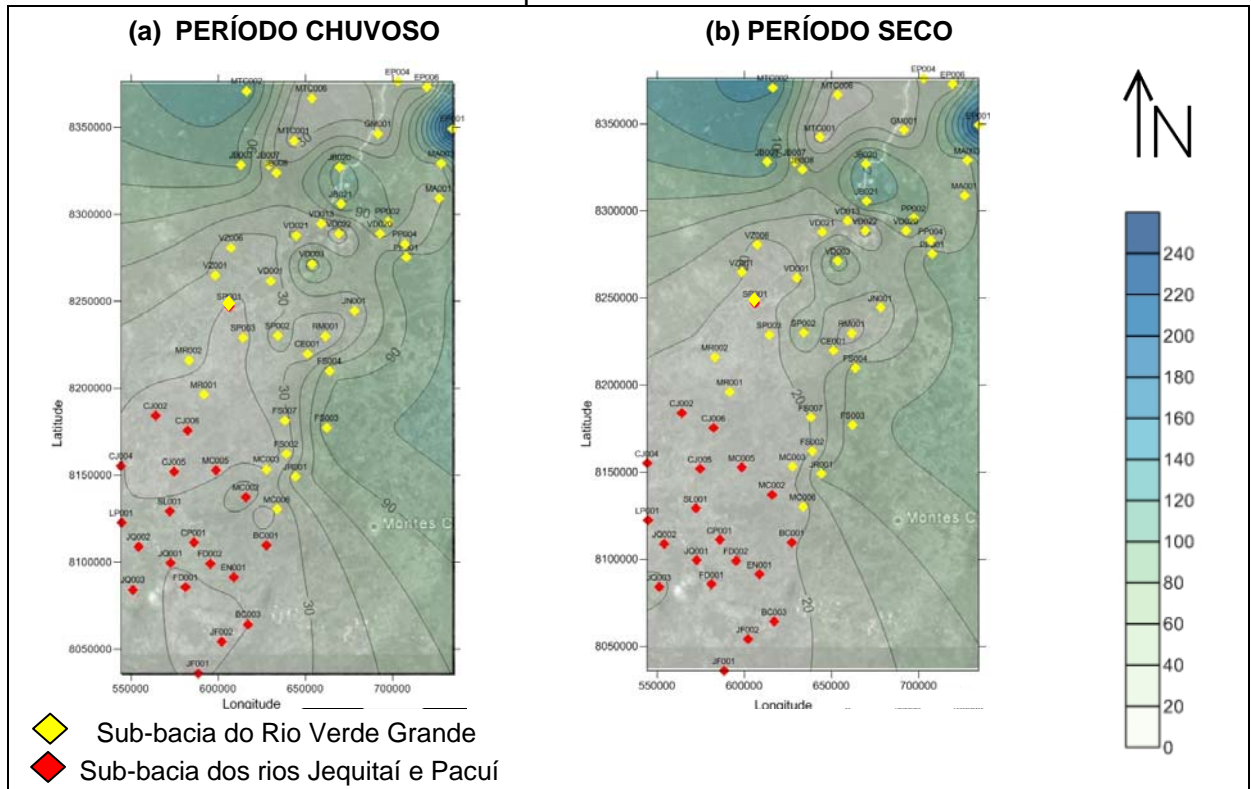
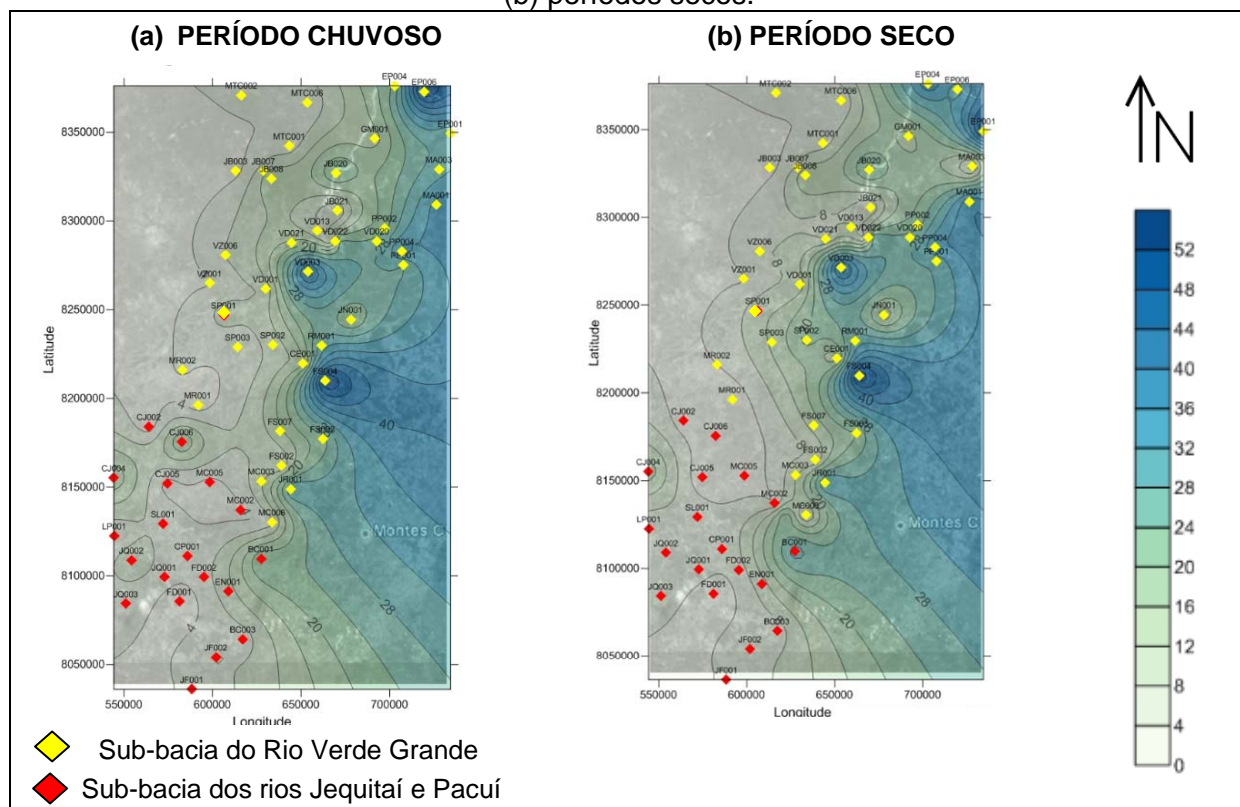


FIGURA 37: Plumas de isoteores do magnésio dissolvido (mg/L): (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos.



Para os íons dominantes, em todos os casos, houve coerência entre os mapas de plumas e os gráficos anteriores obtidos das medianas das concentrações nas seções hidroquímicas sequenciais no sentido SW-NE. Isto é, o aumento ou a diminuição ao longo da linha SW-NE, na direção do escoamento predominante do aquífero, pode ser percebido tanto nos mapas, quanto nos gráficos.

Há uma tendência dos íons dominantes apresentarem pouca variação sazonal, o que pode ser observado visualmente a partir das plumas e que comprovado pelos testes de Mann-Whitney. A pouca sensibilidade das concentrações iônicas às alternâncias dos períodos secos e chuvosos pode estar relacionada ao fato das águas estarem em profundidade tal que esta interferência seja relativamente pequena, uma vez que os poços na área de estudo são profundos. O cálcio, o magnésio e o bicarbonato apresentam maiores concentrações na porção leste da área de estudo. Já o sódio se concentrou na porção norte, o sulfato no centro-leste; e o cloreto concentrou-se mais na porção leste e de forma acentuada na região nordeste da área de estudo. Estas observações são corroboradas pelos resultados dos testes de Kruskal-Wallis e de comparações múltiplas, mostrados anteriormente.

Com relação aos demais parâmetros analisados, os mapas de isotores e respectivos gráficos de concentrações em seções hidroquímicas sucessivas são apresentados conjuntamente, nas Figuras 38 a 42, para os parâmetros que não apresentaram diferença espacial significativa (segundo os testes de Kruskal-Wallis e de comparações múltiplas): Pb total, fenóis, Cu total, Al total e Zn total. Para os demais parâmetros, que apresentaram diferenças espaciais significativas, os respectivos gráficos são apresentados no Apêndice C.

Em todos os casos analisados, houve coerência entre os mapas de plumas e os gráficos anteriores obtidos das medianas das concentrações nas seções hidroquímicas sentido SW-NE.

O chumbo e os fenóis, nos testes estatísticos de Kruskal-Wallis não apresentam variações significativas das concentrações nos diversos poços de monitoramento, em ambas sub-bacias, o que é corroborado nos respectivos gráficos da evolução em seções hidroquímicas sequenciais na direção predominante do fluxo do aquífero. Apesar da aparente migração das plumas de maior concentração na área entre os períodos secos e chuvosos, de fato, estas diferenças não podem ser consideradas significativas, conforme demonstrado pelos testes de Mann-Whitney.

FIGURA 38: Plumas de isotores do chumbo total: (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos (mg/L); e (c) evolução dos resultados (medianas) dos parâmetros físico-químicos monitorados em seções hidroquímicas sequenciais ao longo do fluxo predominante das águas subterrâneas na área de estudo (mmol/L).

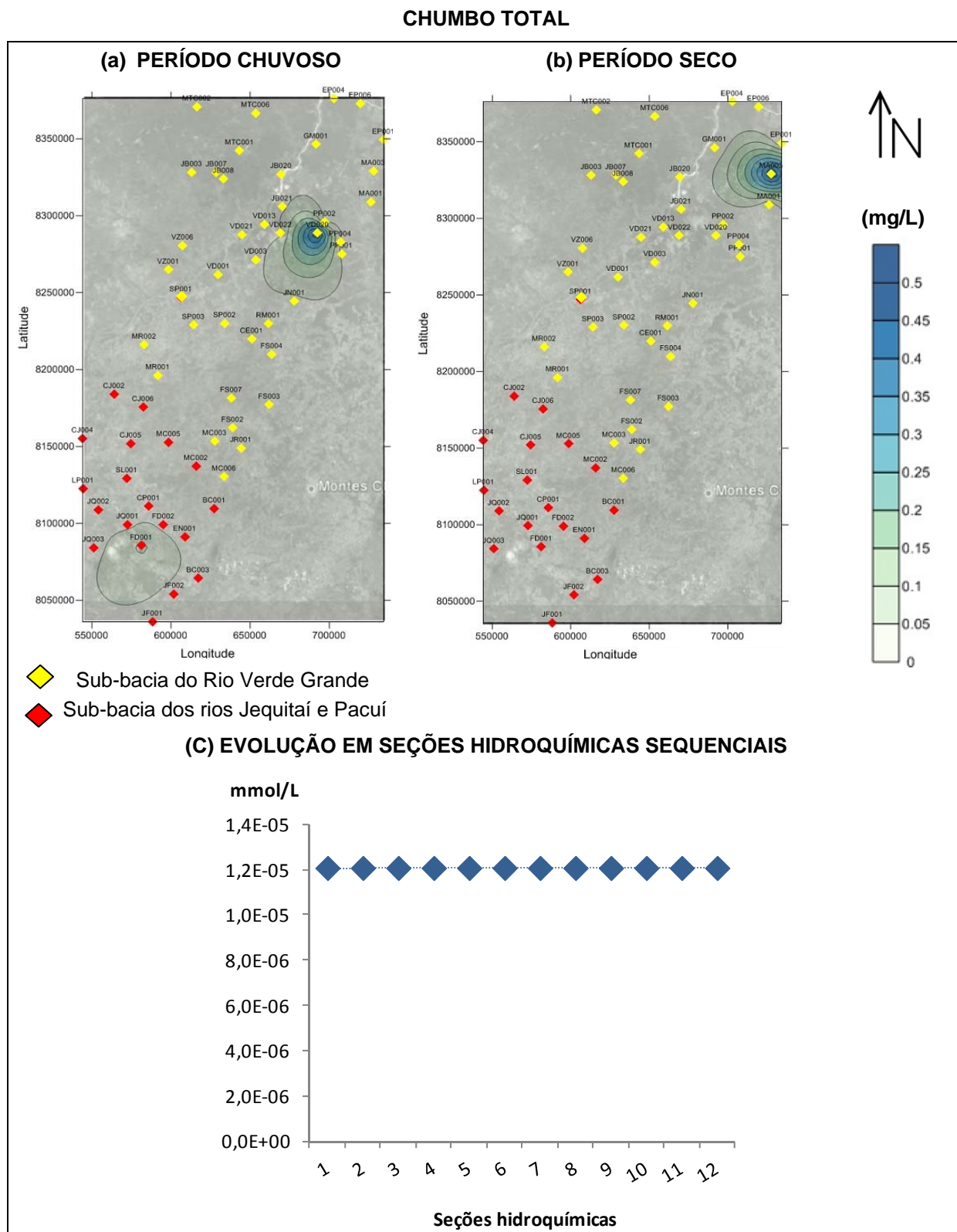
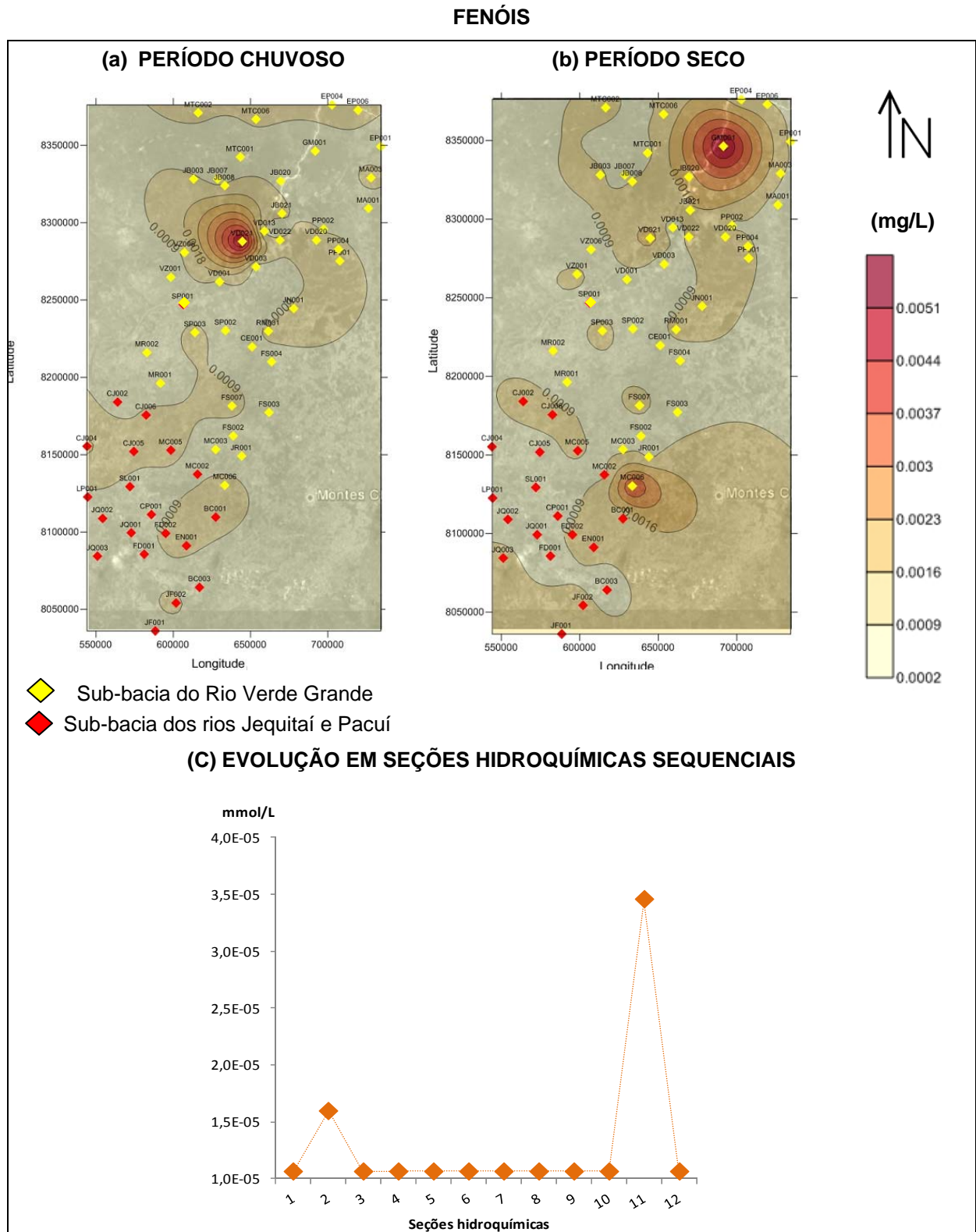


FIGURA 39: Plumas de isoteores de fenóis: (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos (mg/L); e (c) evolução dos resultados (medianas) dos parâmetros físico-químicos monitorados em seções hidroquímicas sequenciais ao longo do fluxo predominante das águas subterrâneas na área de estudo (mmol/L).



De acordo com os testes não paramétricos aplicados de Kruskal-Wallis nos diferentes poços de monitoramento, alumínio e cobre não apresentaram diferenças significativas, geograficamente, em ambas sub-bacias. Para o zinco, os testes apontam variação espacial somente na UPGRH SF6 (em função das concentrações mais significativas nos poços CJ004 e JF001). Portanto, apesar das plumas claramente distintas visualizadas nos mapas de isotores para estes elementos, as mesmas devem ser interpretadas, de modo geral, como pouco consideráveis para estes elementos.

Já com relação à sazonalidade, o cobre total e o alumínio total são parâmetros que apresentaram mudanças bem nítidas nas posições relativas das plumas de maior concentração entre os períodos secos e chuvosos. De acordo com os mapas de isotores correspondentes (figuras 40 e 41), o alumínio aumenta na porção sul da área de estudo nos períodos secos; e o cobre, concentra-se no nordeste da área no período seco. Tais observações são comprovadas pelos testes de Mann-Whitney aplicados.

Já o zinco apresenta maiores concentrações ao norte da área, independentemente da sazonalidade, o que é corroborado pelos testes de Mann-Whitney.

Os gráficos correspondentes da evolução em seções hidroquímicas sequenciais mostram comportamentos distintos: para Cu, não se pode afirmar que haja uma tendência clara de aumento com o fluxo subterrâneo, para o Al parece haver um ligeiro aumento e para o zinco a tendência de concentração em direção ao fluxo predominante do aquífero é mais clara. Tais variações ocorrem em função, provavelmente, de diferenças nas tendências de solubilização-precipitação destes elementos à medida que as águas subterrâneas se deslocam.

De modo geral, tanto os mapas de isotores, quanto os testes de Mann-Whitney, mostram que poucos parâmetros apresentaram variações na distribuição de suas concentrações na área de estudo em decorrência da sazonalidade. Todavia, é desejável a aplicação dos mesmos testes, futuramente, quando o número de medições por poços tornar estes dados mais representativos. As plumas de isoconcentrações apontam tendências nas distribuições dos diferentes parâmetros, provavelmente em decorrência de fatores naturais, especialmente geológicos, resultantes da interação da água-rocha.

Tais plumas apresentaram-se coerentes com os resultados (gráficos) obtidos nas análises de medianas em seções hidroquímicas no sentido predominante do fluxo das águas subterrâneas do aquífero na área de estudo, em relação a todos os parâmetros analisados. Portanto, estes

gráficos, embora sem o nível de detalhamento das plumas de isotores, constituem uma alternativa mais simples de análise e que pode também ser utilizada.

FIGURA 40: Plumagens de isotores do cobre total: (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos (mg/L); e (c) evolução dos resultados (medianas) dos parâmetros físico-químicos monitorados em seções hidroquímicas sequenciais ao longo do fluxo predominante das águas subterrâneas na área de estudo (mmol/L).

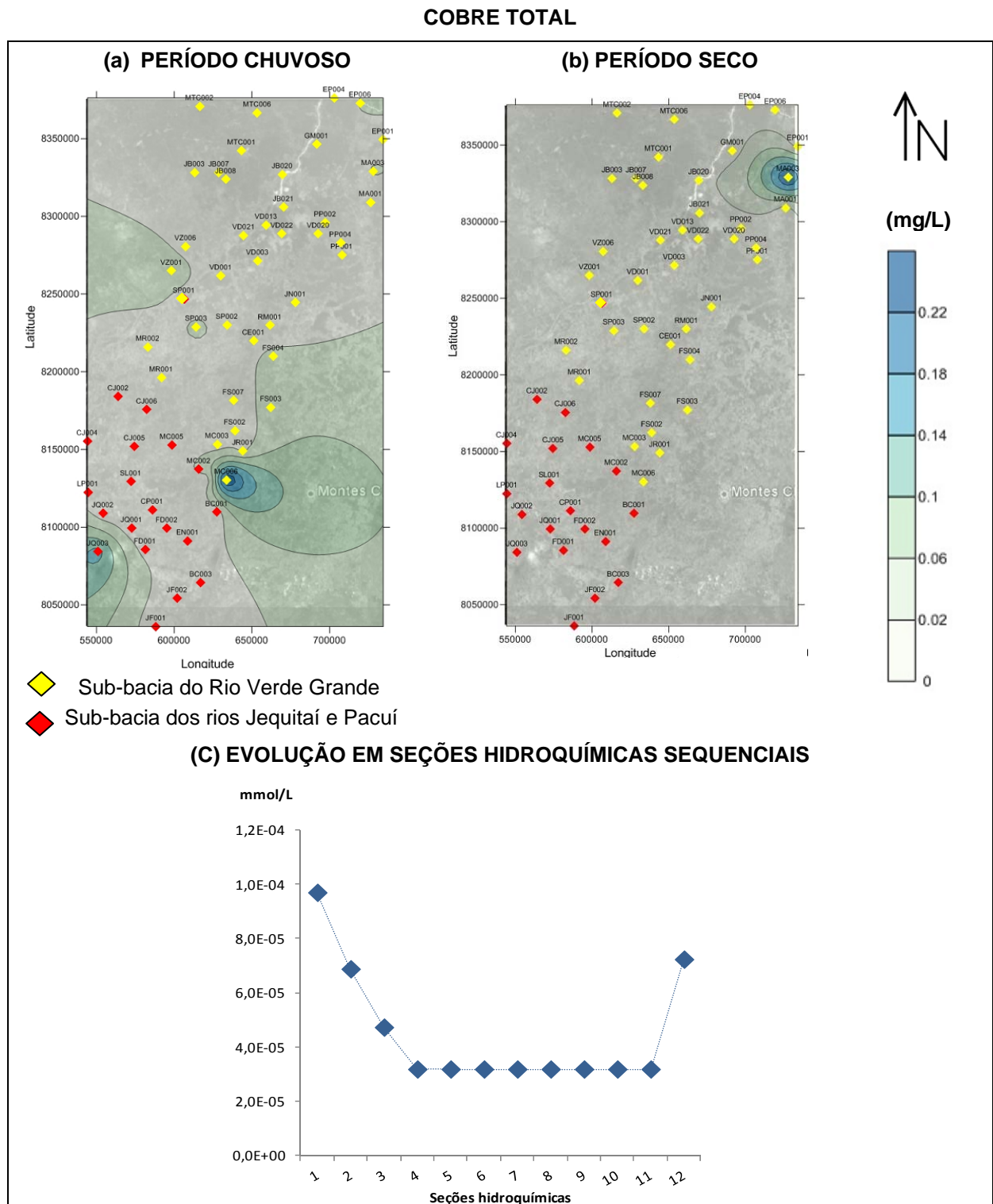


FIGURA 41: Plumas de isotores do alumínio total: (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos (mg/L); e (c) evolução dos resultados (medianas) dos parâmetros físico-químicos monitorados em seções hidroquímicas sequenciais ao longo do fluxo predominante das águas subterrâneas na área de estudo (mmol/L).

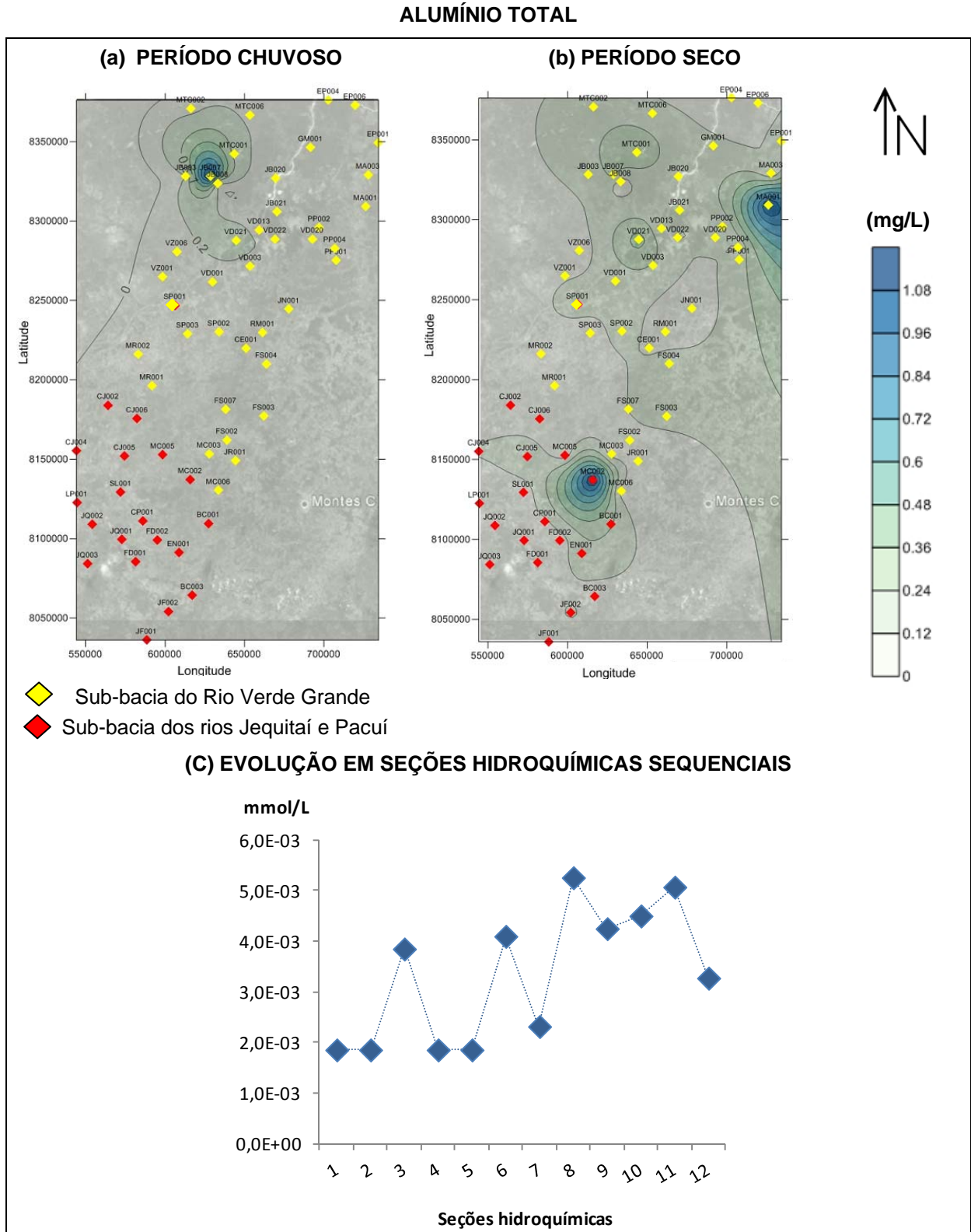
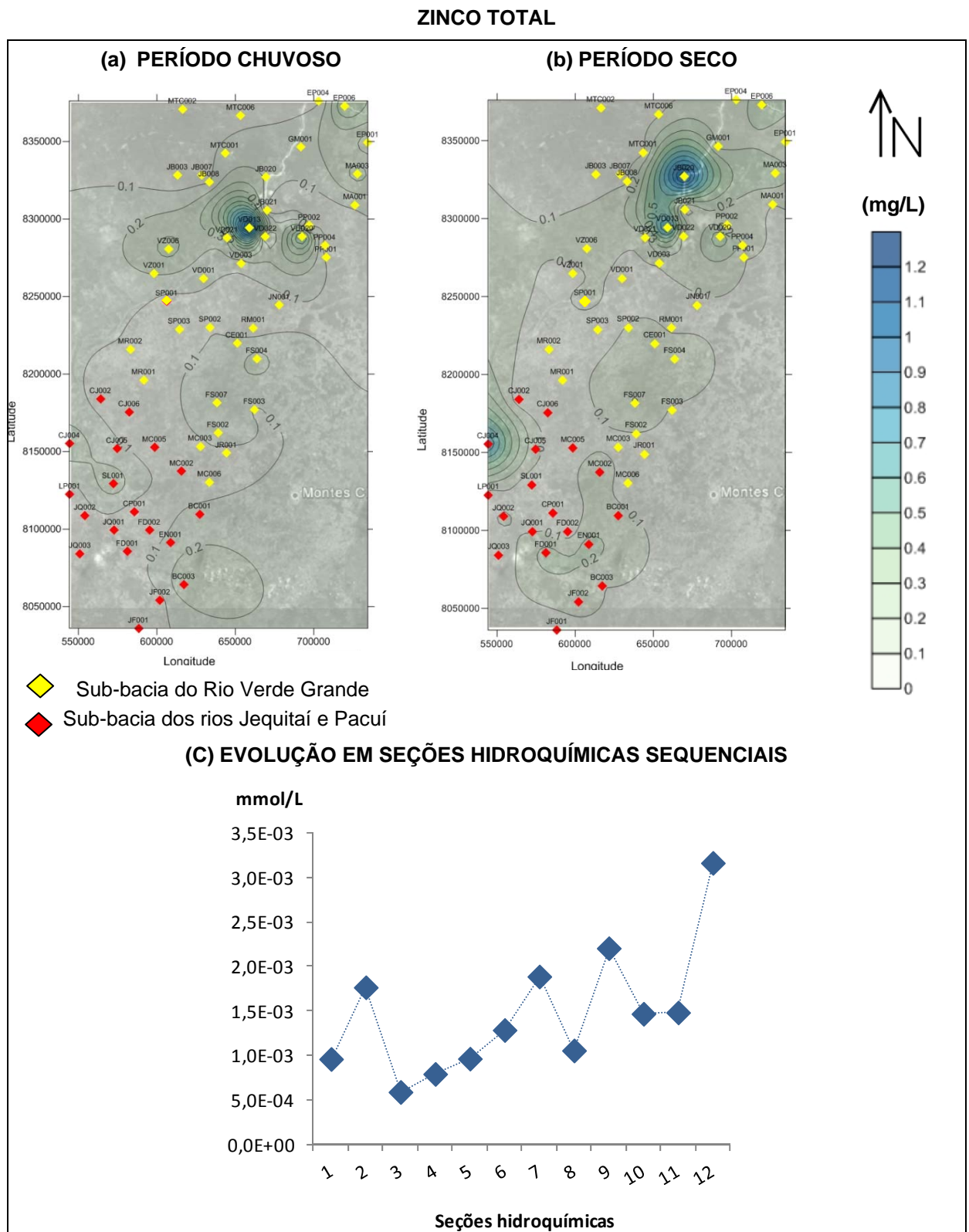


FIGURA 42: Plumas de isoteores do zinco total: (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos (mg/L); e (c) evolução dos resultados (medianas) dos parâmetros físico-químicos monitorados em seções hidroquímicas sequenciais ao longo do fluxo predominante das águas subterrâneas na área de estudo (mmol/L).



Os mapas de isotores dos demais parâmetros são apresentados no Apêndice C e discutidos em uma sequência que reflita comportamentos similares entre os diferentes parâmetros na área de estudo.

Um primeiro grupo de parâmetros são aqueles que parecem apresentar concentrações maiores na porção leste da área de estudo: CE, STD, dureza e manganês.

Dos gráficos correspondentes de evolução em seções hidroquímicas, a CE e os STD tendem a aumento no sentido do fluxo predominante do aquífero, provavelmente como resultado da dissolução gradual da rocha no decorrer da trajetória das águas, especialmente do íon cloreto, com consequente aumento da salinidade. Ambos, estando relacionados às concentrações de sais, refletem a soma de ânions e cátions, no conjunto, ainda que íons isolados possam não ter apresentado mesma tendência. De modo semelhante, a dureza, que reflete o comportamento conjunto dos elementos que contribuem para sua medida, especialmente o Ca e o Mg, apresentou tendência à concentração no decorrer do fluxo, embora os elementos cálcio e magnésio, isoladamente, não tenham apresentado padrão claro de variação no sentido do fluxo predominante das águas subterrâneas.

Mesmo com maiores concentrações a leste em ambos os períodos, secos e chuvosos, os parâmetros apresentam algumas variações. Assim, a CE e os STD (altamente correlacionados) parecem apresentar aumento das concentrações, a leste da área, nos períodos secos, embora haja, nos períodos chuvosos, aumento das concentrações na porção a oeste, com destaque para o sudoeste. Esta variação pode ser explicada por dois fenômenos de efeitos contrários. O primeiro é o da diluição das águas subterrâneas pelas águas pluviais no período chuvoso, que parece ser predominante na porção leste da área de estudo, mais concentrada. O segundo fenômeno estaria relacionado à ação, pelas chuvas, de arraste e concentração de sais da zona não saturada, predominante na porção oeste e sudoeste da área de estudo.

A dureza teve as maiores concentrações, em ambos os períodos (secos e chuvosos), na porção centro-leste da área de estudo. Na porção sul, observa-se tendência de aumento das concentrações no período chuvoso. Na porção noroeste, houve migração de pluma mais concentrada no período seco.

O manganês parece, visualmente, sofrer aumento das concentrações, no período seco, sendo que nesse período as menores concentrações ficaram restritas apenas ao noroeste da área de estudo. Os testes de Mann-Whitney, aplicados aos poços com $n > 6$, mostram que há diferença estatística significativa, ao nível de confiança de 95%, somente no poço EN001 da UPGRH SF6 (ao sul da área). Nos demais poços, a diferença não pode ser considerada significativa para este mesmo nível de confiança.

O pH também apresenta comportamento diferenciado entre as porções leste e oeste da área de estudo, com valores mais elevados (menor acidez), na porção oeste, e com valores mais acentuadamente elevados ao noroeste. Com relação à sazonalidade, não há diferença significativa entre os períodos seco e chuvoso, com exceção do ponto PP001.

O fluoreto apresentou um padrão claro de concentração localizada ao noroeste, o que se reflete na evolução ao longo das seções hidroquímicas. Há também uma concentração próxima ao poço PP001. Este comportamento ocorre nos períodos seco e chuvoso, indistintamente, sendo pouco significativa a variação das concentrações do fluoreto com a sazonalidade, o que é corroborado pelos testes de Mann-Whitney.

Embora não haja correlação (de acordo com as correlações de Spearman) entre o fluoreto e o pH, os maiores valores do fluoreto ocorrem em pH mais elevado, sugerindo o favorecimento da dissolução deste elemento em ambientes menos ácidos.

Ainda em relação ao fluoreto, sua distribuição na área de estudo, considerando as interpolações dos valores obtidos nos poços a noroeste (JB003, JB007, MTC001, MTC002, MTC006), mostra uma tendência de aumento das concentrações a partir de Jaíba, em direção ao município de Matias Cardoso, mais ao norte, na porção oeste. Esta observação, todavia, não coincide com o mapa de análises superficiais deste elemento em águas, sedimentos e solo – áreas de ocorrência de anomalias de flúor, produzido por Viglio e colaboradores (2011). No mapa citado não se observa, na região de Matias Cardoso, ocorrência de flúor em solos, nem em sedimentos e, nas águas superficiais, sua área de ocorrência é relativamente restrita. A ocorrência de elevadas concentrações deste elemento nas águas subterrâneas, somente, reforça a influência de aspectos geológicos e a provável ocorrência de flúor nos aquíferos em decorrência de minerais-fonte em profundidade. Isso evidencia a necessidade de estudos

geológicos mais aprofundados na região como um todo, para auxiliar na adequada interpretação dos dados de qualidade.

Ao se considerar, de maneira associada, os resultados das correlações de Spearman com uma comparação entre as plumas de isótopos para o fluoreto e para o sódio total, há provável correlação entre estes dois parâmetros. De fato, observa-se um padrão das plumas de concentração, muito semelhantes, sendo que as águas sódicas predominam juntamente com as águas fluoretadas. Tal fato também é reforçado pelo resultado da AF na UPGRH SF10, área de ocorrência do fluoreto e que indica alta correlação entre Na^+ e F^- , pertencentes ao Fator 3 desta sub-bacia.

Ao compararmos as regiões com elevadas concentrações de fluoreto, mostradas nas plumas de isótopos, com as regiões com fluorose endêmica apontadas em pesquisas anteriores, observa-se que há coerência nos resultados observados, embora os poços de monitoramento não sejam todos coincidentes. Tais estudos destacam Varzelândia e Jaíba, onde, realmente, há maiores concentrações do elemento. Entretanto, as mesmas pesquisas não mencionam o município de Matias Cardoso e arredores como uma região crítica, sendo que esta foi a área que apresentou as concentrações mais elevadas de fluoreto. Na literatura, não se encontrou estudos que associam esta região a casos de fluorose, conforme mostram os resultados obtidos. É desejável, portanto, adensar o monitoramento no entorno do poço MTC002, objetivando melhor avaliar a pluma de concentrações de fluoreto nesta micro-região, de forma mais detalhada.

Outro estudo que foi comparado com os resultados obtidos na presente pesquisa foi o de Viglio e colaboradores (2011) que avaliaram as ocorrências superficiais de anomalias de flúor em águas superficiais e em sedimentos de fundo e solo. Os autores identificaram ocorrências em águas superficiais na região de Varzelândia e Jaíba e em parte da região de Matias Cardoso. Interessante observar que houve também certa discordância entre as regiões de maior ocorrência de fluoreto, uma vez que, na região mais ao noroeste (Matias Cardoso e proximidades) os pesquisadores não detectaram ocorrência de anomalias por flúor nas águas superficiais. Isso aponta para uma tendência de que o fluoreto possa estar nesta região específica, associado à geologia em profundidade.

O bário tem ocorrência em concentrações altas (1,1 mg/L) de forma bem localizada, no entorno do poço de monitoramento PP001, no município de Pai Pedro. Buscando delimitar

melhor a ocorrência deste elemento nestes níveis de concentração são desejáveis novas investigações em pontos a sudeste do poço citado. As plumas indicam haver pouca variação sazonal, o que é confirmado pelos testes de Mann-Whitney aplicados. O gráfico da evolução em seções hidroquímicas para o Ba mostra tendência de concentração gradual deste parâmetro com o escoamento predominante das águas, na área de estudo como um todo.

De maneira análoga ao que ocorreu para o fluoreto, o bário parece estar associado ao potássio. Ao se considerar os resultados das correlações de Spearman, os mapas de isotores dos dois elementos e os resultados da AF para a UPGRH SF10 (Fator 5), conclui-se que há correlação entre estes dois parâmetros.

O poço PP001 também apresentou, além da ocorrência de bário em níveis relativamente altos, baixa acidez e ocorrência de fluoreto. Pode haver, portanto, a contribuição de mineral-fonte que ocorra de forma associada bário-fluoreto-potássio.

O nitrato, de acordo com os mapas, concentra-se na porção nordeste da área de estudo. De forma coerente, o gráfico da evolução em seções hidroquímicas sequenciais na direção predominante do fluxo do aquífero para o nitrato mostra tendência de aumento dos teores com o escoamento predominante das águas, com crescimento acentuado das concentrações no extremo nordeste.

Ocorre aparente migração da pluma mais concentrada em função da sazonalidade (da região de Pai Pedro, Verdelândia, no período chuvoso, para a região de Espinosa, no período seco), havendo alterações na forma e na distribuição das plumas. Os testes de Mann-Whitney aplicados mostram diferença significativa na UPGRH SF10 para este parâmetro e no poço VZ006 (a noroeste da área - Varzelândia, UPGRH SF10), havendo maior concentração no período seco.

O nitrato, em concentrações até 10 mg/L pode ser considerado associado a aspectos naturais. Entretanto, este parâmetro alcançou valor em torno de 25 mg/L na região nordeste da área de estudo (poços EP001 e EP004, ambos na UPGRH SF10 e no período seco), indicando, neste caso, causas antrópicas, provavelmente. Pode haver contaminação por esgotos não tratados. Entretanto, por tratar-se de águas profundas, a contaminação é dificultada e outras causas devem ser consideradas, sem que se descarte a hipótese de erro analítico, a qual deve ser também considerada.

Como mencionado na revisão da literatura, este elemento ocorre em águas naturais subterrâneas em concentrações que variam de 0,1 a 10 mg/L, sendo que as maiores concentrações ocorrem principalmente em áreas densamente florestadas. É usual concentrações próximas de 5 mg/L.

O potássio, o ferro e o fósforo apresentam, de acordo com os mapas de isotores, pluma de concentrações mais localizadas. Entretanto, o ferro violou limites legais em diversos poços, no caso de consumo humano, ou seja, embora muito concentrado na região de Verdelândia (centro-norte da área de estudo), este metal encontra-se em níveis relativamente elevados em todas as plumas. Para estes elementos parece haver pouca interferência da sazonalidade, o que é corroborado pelos testes de Mann-Whitney.

O potássio tem plumas mais concentradas no centro-norte e nordeste, aumentando os teores no sentido do fluxo dominante do aquífero. O ferro concentrou-se mais no centro-norte da área, embora tenha apresentado também uma segunda pluma concentrada no centro-sul mais visível no período seco. O ferro não apresenta padrão claro de comportamento em direção ao fluxo do aquífero. O fósforo concentra-se a sudoeste da área de estudo e apresenta tendência de redução gradual ao longo da linha do fluxo dominante.

Observando-se as faixas de variação das concentrações nos mapas de isotores dos parâmetros analisados, observa-se que a maior parte deles indica que os valores observados, nos poços de maiores teores, ultrapassam as faixas características para águas subterrâneas reportadas na literatura (tabela 5). Exceção são os parâmetros: alcalinidade de bicarbonato, dureza e cobre. Além destes, os parâmetros temperatura e Eh também ficaram na faixa de valores típica.

A delimitação das plumas de isotores constitui uma ferramenta útil para a visualização da distribuição espacial dos componentes, de forma rápida, mas cabe ressaltar que sua interpretação deve ser feita, como no presente trabalho, associada a técnicas estatísticas e conjugada com o conhecimento da região de estudo. Quanto maior a densidade da rede, menores os erros incorridos nas interpolações, o que ficou evidente no caso da ocorrência do bário, no poço PP001.

Os resultados obtidos considerando cada uma das técnicas empregadas – análises estatísticas, classificação das águas, verificação do atendimento a padrões, plumas de isotores a partir da

krigagem – foram coerentes e refletiram as mesmas tendências de concentrações nos mesmos poços de monitoramento.

A pesquisa desenvolvida se insere no contexto de pesquisas semelhantes desenvolvidas no Brasil e também internacionais, tendo aplicado técnicas semelhantes, ainda que com limitações decorrentes do número relativamente pequeno de dados. Os resultados são difíceis de serem comparados com aqueles de outras regiões do mundo, em função das variações advindas de aspectos naturais característicos da região de estudo, especialmente de aspectos geológicos. Assim, as águas subterrâneas foram menos salinas e apresentaram resultados de dureza diferentes (maiores ou menores, conforme o caso) em relação a estudos análogos desenvolvidos em climas áridos e em regiões cársticas. Apesar da relativa escassez de pesquisas semelhantes na região estudada, foi possível comparar os resultados obtidos com alguns estudos, como os de Mourão e colaboradores (2001) e de Santos e colaboradores (2010), os quais, embora com análises hidroquímicas restritas a número bem menor de parâmetros, apresentaram as mesmas ordens de grandeza para os resultados obtidos na região.

O conjunto dos resultados demonstra a necessidade de ações direcionadas aos recursos hídricos subterrâneos da região estudada, que caberiam aos gestores públicos. Dentre as mesmas, estaria, obrigatoriamente, as restrições de alguns usos junto às comunidades envolvidas. Outras ações a serem avaliadas seriam:

- O incentivo ao tratamento prévio conforme os diferentes usos e para poços específicos, os quais devem levar em conta os problemas observados, para propor soluções apropriadas a cada localidade, cabendo, a princípio, a desfluoretação, o abrandamento, a dessalinização.
- O incentivo à melhoria na manutenção de alguns poços, a serem submetidos, por exemplo, ao redensolvimento.
- O incentivo a usos alternativos combinados, tal como a utilização de águas pluviais adequadamente armazenadas e distribuídas, especialmente para usuários da zona rural.

Qualquer medida de gestão nesse sentido perpassa, necessariamente, pelo envolvimento inicial de todos os responsáveis, incluindo órgãos ambientais, de abastecimento de água, de

saúde, além da sociedade organizada (comitês de bacia locais, representações das comunidades afetadas, dentre outros).

CONCLUSÕES

As águas do aquífero Bambuí, na área de estudo, foram classificadas de acordo com o conjunto de resultados obtidos a partir dos Diagramas de Piper, de Wilcox e da estatística descritiva como: bicarbonatadas cálcicas, predominantemente, muito duras a duras, neutras a levemente alcalinas e com salinidade tolerável. Localizadamente, todavia, alguns poços (três deles) apresentam CE limitante para a irrigação, segundo o Diagrama de *Wilcox*. Tais características são condizentes com aquíferos de natureza cárstica. O estudo possibilitou estabelecer correlações entre alguns elementos presentes nas águas subterrâneas na área de estudo.

A pesquisa sobre a qualidade das águas subterrâneas na porção mineira das UPGRH SF6 e SF10, utilizando dados secundários de monitoramento disponibilizados pelo IGAM, mostrou que, embora haja certa similaridade hidroquímicas das águas subterrâneas na região estudada considerando o conjunto dos parâmetros físico-químicos avaliados, ao se analisar cada parâmetro de forma detida, observam-se variações geográficas na qualidade das águas monitoradas.

A análise de cluster – AC – mostrou que, ao se considerar, conjuntamente, a hidroquímica das águas a partir dos parâmetros selecionados, há relativa semelhança hidroquímica no aquífero da região estudada, uma vez que foram formados poucos agrupamentos (somente três, sendo que um deles agregou 85% do total de poços) e as águas de poucos poços ficaram isoladas dos agrupamentos formados (cinco deles apenas). Todavia, para cada parâmetro, individualmente analisado, observa-se variabilidade dos resultados, com significativa diferença geográfica das águas, considerando a maior parte dos parâmetros analisados e o período estudado. Dos 22 parâmetros analisados, 18 apresentaram diferenças estatísticas significativas entre diferentes poços, ao nível de confiança de 95%, de acordo com os testes não paramétricos de *Kruskal-Wallis* e de comparações múltiplas. Alguns parâmetros têm ocorrência bem localizada na área de estudo, tais como fluoreto, bário, fósforo, zinco, sulfato, arsênio e selênio.

A partir dos testes de Mann-Whitney, conclui-se que poucos parâmetros apresentaram variações na distribuição de suas concentrações na área de estudo em decorrência da sazonalidade. Considerando o conjunto de resultados na área de estudo foram: nitrato, alumínio total e cobre total.

A análise fatorial – AF – mostrou que sete fatores responderam por 78,5% da variância do conjunto de dados, em ambas sub-bacias. Na UPGRH SF6, os fatores foram associados a 14 parâmetros (CE, STD, Cl^- , Mg^{2+} , Ca^{2+} , P, Pb, Fe, SO_4^{2-} , K^+ , NO_3^- , Cu, Na, e Al). Na UPGRH SF10, os fatores foram associados a 16 parâmetros (CE, STD, Cl^- , Mg^{2+} , Ca^{2+} , fenóis, Pb, Fe, F^- , K^{2+} , Ba, Cu, Na^+ , turbidez, Al e Zn).

Em relação ao total de poços monitorados no período de 2005 a 2011, verificou-se que as águas subterrâneas na região podem ser consideradas inadequadas para fins de consumo humano, uma vez que 82% dos poços de monitoramento da área estudada apresentaram violação de padrões legais – Resolução Conama N° 396/2008 e pela Portaria do Ministério da Saúde N° 2914/2011. Todavia, 64% dos poços apresentaram-se inadequados exclusivamente em função de parâmetros organolépticos, a maioria em função de concentrações elevadas de ferro, alumínio, manganês e turbidez. As elevadas concentrações de ferro, alumínio e manganês não são resultados esperados para águas subterrâneas em ambientes cársticos, o que deverá ser averiguado.

Os poços que necessitam de restrições de uso mais emergenciais são aqueles cujas águas subterrâneas estão não conformes frente aos limites de qualidade para consumo humano e com relação a parâmetros associados a risco à saúde: fluoreto, chumbo total, nitrato, fenóis totais, bário total, arsênio, selênio, e níquel total.

Para a dessedentação animal, as águas de 62% dos poços apresentaram-se adequadas para este fim, e para a irrigação, foram 68% dos poços, sendo que, neste último caso, o risco por sódio não constitui fator crítico.

O número de amostras variou, para cada poço e por parâmetro, entre 1 e 9, relativamente pequenos ao se considerar que os mesmos são bem inferiores ao número mínimo considerado adequado para a maior parte das análises estatísticas ($n = 30$).

De modo geral, pode-se afirmar que a qualidade das águas subterrâneas monitoradas ao norte do Estado apresenta qualidade inadequada, inclusive para o consumo humano, o que tornam necessárias medidas de gestão a serem conduzidas pelos órgãos responsáveis, visando o uso deste importante recurso, de maneira mais apropriada.

A partir das medidas dos níveis estáticos, foi possível mapeá-los e estimar os sentidos dos fluxos subterrâneos regionais, bem como o gradiente hidráulico médio do aquífero Bambuí na área de estudo.

O presente estudo contribuiu para subsidiar ações futuras, apontando os principais problemas e sua ocorrência na região e poderá vir a ser utilizado para o aprimoramento da gestão ambiental dos recursos hídricos subterrâneos na região norte mineira, nas UPGRH SF6 e SF10.

6 RECOMENDAÇÕES

Como recomendações podem ser citadas:

- O conjunto dos resultados demonstra a necessidade de restrições de alguns usos dos recursos hídricos subterrâneos da região estudada junto às comunidades envolvidas, de iniciativa do poder público, a ser desenvolvida por órgãos ambientais, de abastecimento de água, e de saúde.
- Considerando o número relativamente reduzido de dados gerados, até o momento, e as limitações decorrentes observadas no tratamento estatístico dos dados, é recomendável a manutenção do monitoramento para que uma série histórica de dados mais representativa possa ser gerada e a análise dos resultados possa ser aprimorada. Ressalta-se a importância da manutenção da atual configuração da rede de monitoramento atual, para o aproveitamento dos dados existentes.
- A execução de análises temporais do monitoramento das águas subterrâneas na área de estudo, visando avaliar tendências dos parâmetros mais importantes, a exemplo dos testes de Mann-Kendall. Tais testes carecem de séries históricas de dados mais representativas, conforme citado.
- É recomendável a redução de erros analíticos, como evidenciou o balanço iônico, sendo que o cálculo do mesmo deverá ser executado pelo próprio laboratório responsável pelas análises iônicas, de modo que, ultrapassado o erro máximo admissível de 10% recomendado na literatura, as análises possam ser repetidas.
- Outras duas medidas também relacionadas diretamente com o monitoramento seriam: a substituição da atual metodologia analítica do sulfeto que, em função do LD ser superior ao limite legal, inviabilizou a avaliação apropriada deste parâmetro; e a verificação das tendências futuras das concentrações de chumbo, objetivando avaliar a conveniência e a pertinência na invalidação dos resultados questionáveis identificados neste trabalho.
- Estudos para definição de metodologias adequadas que possam vir a ser aplicadas aos resultados no sentido de se estabelecer alguns *backgrounds* do aquífero na região estudada, especialmente para os parâmetros que apresentaram baixa variabilidade e estiveram de acordo

com valores característicos de aquíferos de natureza cárstica. Como base nestes estudos, deverá ser verificada a pertinência e a conveniência da redução do número de parâmetros analisados no monitoramento, futuramente, considerando ainda os critérios aplicados no presente trabalho para a seleção dos parâmetros analisados.

- Estudos para identificação e delimitação das áreas de recarga indireta mais importantes, visando sua proteção.
- Estudos sobre a efetiva capacidade do aquífero, buscando definir os níveis de exploração seguros/sustentáveis. Para tanto, é fundamental a continuação e a ampliação do monitoramento quantitativo (medidas de NE) na região. Recomenda-se, o adensamento da rede de monitoramento quantitativo, especialmente nas regiões em que há alterações nos sentidos dos fluxos subterrâneos.
- A investigação das possíveis razões da não detecção de agrotóxicos nas águas subterrâneas na área de estudo, especialmente nas águas menos profundas, tendo em vista os níveis relativamente elevados de aplicação dos mesmos nos solos da região, pela atividade agrícola. Sugere-se uma análise de possível interferência analítica ou ainda, avaliação de potencial degradação dos compostos e pesquisa sobre os metabólitos conservativos, indicadores de contaminação.
- Para verificar o excesso das concentrações de Al, Fe e Mn, que tornam parcela considerável dos poços inapropriada, inclusive para consumo humano, são recomendáveis avaliações mais detalhadas em cada poço de monitoramento, a serem iniciadas nos poços mais críticos, ou seja, naqueles em que as concentrações destes elementos forem maiores e associadas a níveis relativamente elevados de turbidez. Tais avaliações devem considerar aspectos construtivos, operacionais e de manutenção dos poços, junto a cada usuário.
- O desenvolvimento de pesquisas sobre o potencial de uso de diferentes tipos de tratamento das águas desta região, incluindo desfluoretação, dessalinização e abrandamento, e também de estudos para o desenvolvimento de técnicas que tornem mais simples a operação e a manutenção dos equipamentos utilizados no tratamento e que reduzam seus custos, de modo a viabilizar a aplicação do tratamento pelas próprias comunidades usuárias.

- A execução de pesquisas que possam avaliar as causas da ocorrência de níveis diferenciados de concentrações nos diferentes poços de monitoramento em relação a parâmetros específicos, tanto causas naturais, quanto antrópicas, por meio de avaliação conjunta dos resultados obtidos no presente trabalho, com aqueles gerados por estudos de uso e ocupação do solo na região, bem como estudos sobre vulnerabilidades do aquífero e sobre a disponibilidade hídrica.
- É desejável a ampliação da atual rede de monitoramento na região norte, a fim de se avaliar também a qualidade da água subterrânea em outras UPGRH com elevado nível de aproveitamento do recurso hídrico subterrâneo, como ocorre na área de estudo, incluindo: SF4, SF5, SF7, SF8, SF9, JQ1 e PA1. Sugere-se ainda o adensamento da rede de monitoramento no entorno do poço PP001, a leste do mesmo, de modo a delimitar melhor a ocorrência do bário na região. De forma análoga, é desejável também o adensamento da rede no entorno do poço MTC002 para delimitar as ocorrências de fluoreto mais ao noroeste da região estudada.
- As medidas de gestão sugeridas devem envolver, além do poder público, a sociedade organizada (comitês de bacia locais, representações das comunidades afetadas, dentre outros), tendo em vista que a gestão das águas deve ser compartilhada tendo em conta o interesse coletivo.
- Aplicação das técnicas utilizadas no presente trabalho ao monitoramento de águas subterrâneas em outros aquíferos, inclusive no estado de Minas Gerais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DAS 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 DAS ÁGUAS – ANA. *Disponibilidade e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil*. Brasília: ANA, 2005. Cadernos de Recursos Hídricos. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/planejamento/planos/pnrh/VF%20DisponibilidadeDemanda.pdf>>. Acesso em: 18 jul. 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS – ANA. *Atlas nordeste – Abastecimento urbano de água: Alternativas de oferta de água para as sedes municipais da região nordeste do Brasil e do norte de Minas Gerais*. Brasília: ANA, 2006. 79p. Relatório.

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS – ANA. Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM. *Estudo de caracterização dos recursos hídricos no estado de Minas Gerais: primeira etapa do Plano Estadual de Recursos Hídricos*. Belo Horizonte: Projeto PROÁGUA / Semiárido, 2006. 177p. Relatório.

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS – ANA. *Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Verde Grande*. Brasília: 2011. 180 p. Relatório-Síntese.

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS – ANA. *Atlas Brasil: abastecimento urbano de água*. Brasília: ANA, 2012. Disponível em: < <http://atlas.ana.gov.br/Atlas/forms/Analise/Geral.aspx?est=8&mapa=diag>>. Acesso em: 18 Ago. 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS – ANA. *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil*. Ed. Especial. Brasília: ANA, 2012. 215 p. Informe-2012.

AGHAZADEH, N.; MOGADDAM, A. A. Investigation of hydrochemical characteristics of groundwater in the Harzandat aquifer, Northwest of Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 176, n. 1-4, p. 183-195, 2011.

ALMEIDA, M. I. S.; PEREIRA, A. M. *Uso da terra e degradação ambiental em municípios do norte e nordeste de Minas Gerais*, 2005.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA. *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 21 ed. Washington, 2005. 1200p.

AMORIM, Julio R. A. de; CRUZ, Marcus A. S.; RESENDE, Ronaldo S. Qualidade da água subterrânea para irrigação na bacia hidrográfica do rio Piauí, em Sergipe. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, n.8, p.804–811, 2010.

ANDRADE, Eunice Maia de; AQUINO, Deodato Nascimento; CRISÓSTOMO, Lindbergue Araújo; RODRIGUES, Joseilson Oliveira; CHAVES, Luiz Carlos Guerreiro. Similaridade da composição hidroquímica das águas freáticas do perímetro irrigado do Baixo Acaraú, Ceará, Brasil. *Revista Agroambiente On-line*, v. 4, n. 1, 2010.

ANDRADE, Eunice Maia de; LOPES, Fernando Bezerra; PALÁCIO, Helba Araújo Queiroz; AQUINO, Deodato do Nascimento; ALEXANDRE, Deborah Mithya Barros. Land use and groundwater quality: the case of Baixo Acaraú Irrigated Perimeter, Brazil. *Revista Ciência Agronômica*, v. 41, n. 2, p. 208-215, abr-jun, 2010.

ANDRADE, Renata Marson Teixeira. *The Third Bank of the lower São Francisco river: culture, nature and power in the northwest Brazil*. Tese (Doutorado em Energia e Recursos Naturais), Universidade da Califórnia, Berkeley, 2006.

ARAÚJO, Ricardo; GOEDERT, Wenceslau J.; LACERDA, Marilusa Pinto Coelho. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob cerrado nativo. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v. 31, p. 1099-1108, 2007.

ASSIS, Artur Ângelo Alcântara de. Panorama da indústria de água mineral na região metropolitana do Recife. Orientador: Tânia Mara Dussin. 2012. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral), Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 10560. 1988. Águas – Determinação de Nitrogênio Amoniacal - métodos de Nesslerização, Fenato e titulométrico. Rio de Janeiro. 14p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 10357. 1988. Águas – Determinação da demanda química de oxigênio (DQO) – Métodos de refluxo aberto. Refluxo Fechado – Titulométrico e Refluxo Fechado – Colorimétrico. Rio de Janeiro. 18p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 10664. 1989. Águas – Determinação de Resíduos Sólidos- método gravimétrico. Rio de Janeiro. 14p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR ABNT 10740. 1989. Água – Determinação de fenol total. Rio de Janeiro. 6p.

ATMAN, Dora; VELÁSQUEZ, Leila Nunes Menegasse; FANTINEL, Lúcia Maria. Controle estrutural na circulação e composição das águas no sistema aquífero cárstico-fissural do grupo Bambuí, norte de Minas Gerais. *Águas Subterrâneas*, v.25, n.1, p.74-90, 2011.

BAGHVAND, Akbar; NASRABADI, Touraj; BIDHENDI, Gholamreza Nabi; VOSOOGH, Ali; KARBASSI, Abdolreza; MEHRDADI, Nasser. Groundwater quality degradation of an aquifer in Iran central desert. *Desalination*, v. 260, p. 264-275, 2010.

BANCO MUNDIAL. *Groundwater Quality Protection: A Guide for Water Utilities, Municipal Authorities and Environment Agencies*. São Paulo – SP: 2002. 101 p.

BELL, Fred G. *Environmental Geology - Principles and Practice*, Blackwell Publishing. Oxford, 1998. 523p.

BERTOLO, Reginaldo; HIRATA, Ricardo; FERNANDES, Amélia. Hidrogeoquímica das águas minerais envasadas do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 37, n. 3, p. 515-529, 2007.

BRAGA, Leticia Teixeira Palla; VELÁSQUEZ, Leila Nunes Menegasse; FLEMING, Peter Marshall; RODRIGUES, Paulo César Horta; SILVA, Sérgio Melo da. Investigação da recarga do tipo localizada nos aquíferos cársticos do grupo Bambuí em região semi-árida, norte de MG. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 16., 2010, São Luis, *Anais...*, São Luis: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas - ABAS, 2010. p. 1-20.

BRASIL, Ministério da Integração Nacional. Secretaria de Políticas de Desenvolvimento Regional. *Nova Delimitação do Semiárido Brasileiro*. Brasília: MI-SDR, 35 p., 2005.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. 2008. Resolução Conama N° 396, de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais

para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. DOU nº 66, 07/04/2008, Seção 1, p. 64 - 68. Classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas. Brasília: Diário Oficial da União, 2008.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria n 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. DOU de 04/01/2012, Seção 1, p. 43 - 49. Brasília: Diário Oficial da União, 2012.

CAMPOS, José Eloi Guimarães; DARDENNE, Marcel Auguste. Estratigrafia e sedimentação da bacia sanfranciscana: uma revisão. *Revista Brasileira de Geociências*, Brasília, v. 27, n. 3, p. 269-282, Set. 1997.

CARLSON, Mark A.; LOHSE, Kathleen A.; MCINTOSH, Jennifer C.; MCLAIN, Jean E.T. Impacts of urbanization on groundwater quality and recharge in a semi-arid alluvial basin. *Journal of Hydrology*, v. 409, p. 196-211, 2011.

COELHO, Cristiano J. da C.; DAMÁZIO, Eduardo. Aspectos da disponibilidade e dos usos da água na bacia do rio Bacanga – Ilha do Maranhão – MA. *Boletim do Laboratório de Hidrobiologia*, v. 19, p. 73-84, 2006.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB; AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS – ANA. *Guia nacional de coleta e preservação de amostras: Água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos*. Organizadores: Carlos Jesus Brandão ... [et al.]. São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 2011. 326 p.

COMPANHIA DO DESENVOLVIMENTO DOS VALES DO SÃO FRANCISCO E DO PARNAÍBA – CODEVASF. *Áreas de atuação: Vegetação*. 2010. Disponível em: <http://www.codevasf.gov.br/osvales/vale-do-sao-francisco/vegetacao>. Acesso em: Out. 2012.

COMITÊ DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS JEQUITAI E PACUÍ – CBH JEQUITAI E PACUÍ. Plano diretor das bacias hidrográficas dos rios Jequitai, Pacuí e trechos do rio São Francisco. 2010. 61 p. Resumo-Executivo.

CORCÓVIA, Josilaine Amâncio; CELLIGOI, André. Avaliação preliminar da qualidade da água subterrânea no município de Ibiporã-PR. *Revista de estudos ambientais*, v. 14, n. 2, p. 39-48, 2012.

CORREIA FILHO, Francisco Lages; MONTEIRO, Adson Brito; SOARES FILHO, A. Reinaldo; FEITOSA, Edilton Carneiro; SOUSA, Ney Gonzaga de. Hidroquímica do aquífero Cabeças na borda sudestada bacia sedimentar do Parnaíba – PI. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 15, 2008, Natal, Suplemento..., Natal: ABAS, 2008, 20 p.

CUNHA, Fernanda Gonçalves da; MACHADO, Gilberto José. Estudos de geoquímica ambiental e o impacto na saúde pública no município de São Gonçalo Do Piauí, estado do Piauí. Brasília: CPRM. 47 p. 2004.

CUNHA, Maria da Conceição; NUNES, Luis Miguel. *Groundwater Characterization, Management and Monitoring*. British Library 273 p. 2011.

CUSTODIO, Emílio; LLAMAS, Manuel Ramón. *Calidad Del agua subterrânea*. In: CUSTODIO & LLAMAS. Hidrología subterrânea. 2ª Ed. Barcelona: Ediciones Omega, p. 1883-1959. 2001.

DELGADO, C.; PACHECOB, J.; CABRERAB, A.; BATLLORI, E.; ORELLANAA, R.; BAUTISTA, F. Quality of groundwater for irrigation in tropical karst environment: The case of Yucatan, Mexico. *Agricultural Water Management*, v. 97, p. 1423-1433, 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA Florestas. Manual de procedimentos de amostragem e análise físico-química de água. Lucília Maria Parron; Daphne Heloísa de Freitas Muniz; Cláudia Mara Pereira. Colombo: EMBRAPA, 2011. 69 p.

FARNHAM, Irene M.; SINGH, Ashok K.; STETZENBACH, Klaus J.; JOHANNESSON, Kevin H. Treatment of nondetects in multivariate analysis of groundwater geochemistry data. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, v. 60, p. 265-281, 2002.

FERNANDES, Francisco Bergson Parente; de ANDRADE, Eunice Maia; FONTENELE, Sávio de Brito; MEIRELES, Ana Célia Maia; RIBEIRO, José Alberto. Análise de agrupamento como suporte à gestão qualitativa da água subterrânea no semiárido cearense. *Revista Agroambiente On-line*, v. 4, n. 2, p. 86-95, 2010.

FERNANDES, Rinaldo Afrânio. Gestão integrada de águas subterrâneas: critérios gerais orientadores para definição e caracterização de áreas estratégicas de abastecimento. Orientador: Celso de Oliveira Loureiro. 2005. 494 f. Dissertação (Mestrado em meio ambiente) – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, 2005.

FOSTER, Stephen. Hard-rock aquifers in tropical regions: using science to inform development and management policy. *Hydrogeology Journal*, v. 20, p. 20: 659–672, 2012.

FRAGOSO, Daniel Galvão Carnier; UHLEIN, Alexandre; SANGLARD, Júlio Carlos Destro; SUCKAU, Guilherme Labaki; GUERZONI, Henrique Trópia Granja; FARIA, Paulo Henrique. Geologia dos Grupos Bambuí, Areado e Mata da Corda na Folha Presidente Olegário (1:100.000), MG: Registro Depositional do Neoproterozóico ao Neocretáceo da Bacia do São Francisco. *Geonomos*, v. 19, n. 1, p. 28 – 38, 2011.

FREITAS, Adriana Miranda; PEREIRA, Cristiany; COSTA, Dora Atman. Geologia e hidrogeologia de Jaíba, Verdelândia e Varzelândia, norte de Minas Gerais. 2008. 140 p. Trabalho de conclusão de curso em geologia. Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

FREITAS, Alan Rogério Ferreira de; CRUZ, Rômulo Thiago Ribeiro. Geologia e Hidrogeologia das porções média e alta da sub-bacia do Córrego Buriti do Meio, município de São Francisco-MG. 2010. 159 p. Trabalho de conclusão de curso em geologia. Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

GASTMANS, D.; ALBERTO, M. C.; BUFON, A. G. M.; MORAES, F. T.; SANTOS, M. M.; SILVA, J. R. M.; CHANG, H. K., Implicações hidroquímicas da interação rocha-água: interpretações através da representação gráfica de análises químicas de águas subterrâneas. In: XIV ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS E NO II SIMPÓSIO DE HIDROGEOLOGIA DO SUDESTE, 2005, Ribeirão Preto, SP. Anais do XIV Encontro Nacional de Perfuradores de Poços e no II Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste, 2005.

GOOVAERTS, P.; AVRUSKIN, G.; MELIKER, J.; SLOTNICK, M.; JACQUEZ, G.; NRIAGU, J. Geostatistical modeling of the spatial variability of arsenic in groundwater of southeast Michigan. *Water Resources Research*, v. 41, p. 1-19, 2005.

GUGGENMOS, M. R.; DAUGHNEY, C. J.; JACKSON, B. M.; MORGENSTERN, U. Regional-scale identification of groundwater-surface water interaction using hydrochemistry and multivariate statistical methods, Wairarapa Valley, New Zealand. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, v. 8, p. 6443–6487, 2011.

GÜLER, Cüneyt; KURT, Mehmet Ali; ALPASLAN, Musa; AKBULUT, Can. Assessment of the impact of anthropogenic activities on the groundwater hydrology and chemistry in Tarsus coastal plain

(Mersin, SE Turkey) using fuzzy clustering, multivariate statistics and GIS techniques. *Journal of Hydrology*, v. 414–415, n. 11, p. 435-451, 2012.

HUSSEIN, Mohammed Tahir; MAZIN, YOUSIF, M. Al; AWAD, Hussein S. Potentiality of Secondary Aquifers in Saudi Arabia: Evaluation of Groundwater Quality in Jubaila Limestone. *International Journal of Geosciences*, v. 3, p. 71-80, 2012.

IGLESIAS, Mario Iglesias; UHLEIN, Alexandre. Estratigrafia do Grupo Bambuí e coberturas fanerozóicas no vale do rio São Francisco, norte de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 39, n. 2, p. 256-266, Jun. 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *Censo Demográfico 2010*. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/censo2010/primeiros_dados_divulgados/index.php. Acesso em: Ago. 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Geociências: Área Territorial Oficial – *Consulta por município 2012*. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/areaterritorial/area.shtm>. Acesso em: 30 set. 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Mapa Temático: meio físico – Regional: Sudeste - Brasília, 2012. Mapa físico (sem unidade). Escala 1: 1.800.000. Disponível em: < ftp://geofp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/fisico/regionais/sudeste_fisico.pdf >. Acesso em: Out. 2012.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS – IGAM. Comitês de Bacias Hidrográficas: Unidades de Planejamento – UPGRH SF10 – *Conheça a bacia*. 2012. Disponível em: http://comites.igam.mg.gov.br/comites-estaduais/bacia-do-rio-sao-francisco/UPGRH_SF10-comite-afluentes-mineiros-do-rio-verde-grande. Acesso em: 30 set. 2012.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS – IGAM. Comitês de Bacias Hidrográficas: Unidades de Planejamento – UPGRH SF6 – *Conheça a bacia*. 2012. Disponível em: http://comites.igam.mg.gov.br/comites-estaduais/bacia-do-rio-sao-francisco/UPGRH_SF6-cbh-dos-rios-jequitai-e-pacui/1116. Acesso em: 30 set. 2012.

INVERNIZZI, André Luís. *Caracterização hidrogeoquímica do aquífero Botucatu, no setor médio da bacia hidrográfica Mogi-Pardo*. Orientadora: Sônia Maria Barros de Oliveira. 2001. 103 f. Dissertação (Mestrado em geoquímica e geotectônica) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

KETATA, M.; HAMZAOUI, Fadoua; GUEDDARI, Moncef; BOUHLILA, Rachida; RIBEIRO, Luis. Hydrochemical and statistical study of groundwaters in Gabes-south deep aquifer. *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 36, p. 187–196, 2011.

LEE, Jin-Yong; CHOI, Mi-Jung; KIM, Yoon-Young; LEE, Kang-Kun. Evaluation of hydrologic data obtained from a local groundwater monitoring network in a metropolitan city, Korea. *Hydrological Processes*, v. 19, n. 13, p. 2525–2537, 2004.

LIMA, Jorge Enoch Furquim Werneck. *Recursos hídricos no Brasil e no mundo*. Planaltina: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa, 2001. 46 p. Relatório.

LIMA, Eugenio Antônio de; BERALDO, Valdir José; GUILERA, Selma Chaves; BRANDÃO, Luiz Carlos Ribeiro; COSTA, Estácio Alves. Possibilidades de aproveitamento das águas subterrâneas do estado da Paraíba na agricultura irrigada utilizando o gráfico do U. S. Salinity Laboratory. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 16., 2010, São Luis, *Anais...*, São Luis: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas - ABAS, 2010. p. 1-12.

- LITAOR, M. I.; BRIELMANN, H.; REICHMANN, O.; SHENKER, M. Hydrochemical analysis of groundwater using a tree-based model. *Journal of Hydrology*, v. 387, p. 273–282, 2010.
- MAGALHÃES, Vanessa Souza. *Hidroquímica e Qualidade das Águas Superficiais e Subterrâneas em Áreas sob Influência de Lavras Pegmatíticas nas Bacias dos Córregos Água Santa e Palmeiras, Município de Coronel Murta (MG)*. Orientadora: Tânia Mara Dussin. 2006. 109 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Econômica e Aplicada) – Instituto de Geociências, Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- MARTÍNEZ, Mario Iglesias. Estratigrafia e tectônica do grupo Bambuí no norte do Estado de Minas Gerais. Orientador: Alexandre Uhlein. 2007. 147 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- MARTINS, Maria Rita Vieira. *Regulação econômica no setor das águas: Promoção da concorrência e sustentabilidade tarifária*. Orientador: Adelino Manuel Guimarães Fortunato. 2007. 290 f. Tese (Doutorado em Teoria Econômica e Economia Internacional) – Faculdade de Economia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2007.
- MEDEIROS, Jailsa da Silva. Análise dos fatores responsáveis pela alta salinidade do aquífero fissural da microbacia do riacho do Feijão – Pedro Avelino/RN. Orientador: Jean Michel Legrand. 2004. 80 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geociências, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2004.
- MEHLMAN, Myron A. *Dangerous and cancer-causing properties of products and chemicals in the oil refining and petrochemical industry*. VIII. Health effects of motor fuels: carcinogenicity of gasoline-scientific update, *Environmental Research*. v. 59 p. 238-249, 1992.
- MELO, Jose Geraldo de; VASCONCELOS, Mickaelon Belchior; MORAES, Franklin de; MORAIS, Samara Danielle Oliveira de; MEDEIROS, José Ivan de. Aspectos da salinização das águas subterrâneas na borda sul da bacia Potiguar, RN. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 15., 2008, Natal, *Suplemento...*, Natal: ABAS, 2008, p. 1-13.
- MENEGASSE, L.N.; COSTA, W.D.; FANTINEL, L.M.; UHLEIN, A.; FERREIRA, E.F.; CASTILHO, L.S. Controle estrutural do fluoreto no aquífero cárstico do município de São Francisco – MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13, Cuiabá, 2004. Cuiabá: ABAS, 2004. CD-ROM.
- MILLER, G. Wade. Integrated concepts in water reuse: managing global water needs. *Desalination*, v. 187, p. 65–75, 2006.
- MINGOTI, S.A. *Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. *Águas subterrâneas: um recurso a ser conhecido e protegido*. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano, 2007. Disponível em: < <http://www.aesas.com.br/Server/src/arquivos/midia/documento.pdf> > Acesso em: 3 abr. 2012. Relatório.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME; Banco Internacional para a Reconstrução e Desenvolvimento – BIRD. *Análise das Informações sobre Recursos Hídricos Subterrâneos no País (Relatório Técnico 015)*. 111p. 2009. Relatório.
- MISHRA, Ashok K.; COULIBALY, Paulin. Developments in hydrometric network design: A review. *Reviews of Geophysics*, v. 47, p. 1-24, 2009.

MOGHEIR, Y.; DE LIMA, J. L. M. P. ; SINGH, V. P. Entropy and multi-objective based approach for groundwater quality monitoring network assessment and redesign. *Water Resources Management*, v. 23, p. 1603–1620, 2009.

MOREIRA, Fátima Ramos; MOREIRA, Josino Costa. A cinética do chumbo no organismo humano e sua importância para a saúde. *Ciência e Saúde Coletiva*, Rio de Janeiro, v. 9, n. 1, p. 167-181, 2004 .

MOURÃO, Maria Antoniete Alcântara; CRUZ, Waldemir Barbosa da; GONÇALVES, Ronaldo de Luca Fernandes. Caracterização hidrogeológica da porção mineira da bacia hidrográfica do São Francisco. In: PINTO, C.P e MARTINS-NETO, M.A.M. (ed). *Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais*. Belo Horizonte: SBG-MG, p. 327-349, 2001.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. *Hidrologia Estatística*. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552 p.

NAVAL FACILITIES ENGINEERING COMMAND – NAVFAC. *Guidance for environmental background analysis: Groundwater*. 1ª ed., v. 3, 2003. 237 p.

NOBRE, Manoel de Melo Maia; NOBRE, Rosane Cunha Maia. Caracterização hidrogeológica para o uso racional e proteção dos mananciais subterrâneos em Maceió – AL. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 6, n.1, p. 7-20, 2001.

NUNES, Walder Antonio Gomes de Albuquerque; KER, João Carlos; NEVES, Júlio César Lima; RUIZ, Hugo Alberto; BEIRIGO, Raphael Moreira; BONCOMPANI, André Luís Piovan. Características químicas de solos da região de Janaúba, MG, irrigados com água de poços tubulares e do rio Gorutuba. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v.32, n.1, p. 227-236, 2008.

OLIVEIRA-FILHO, Eduardo Cyrino de; LIMA, Jorge Enoch Furquim Werneck. Potencial de Impacto da agricultura sobre os recursos hídricos na região do Cerrado. Planaltina: Embrapa. 48 p. 2002.

OLOBANIYI, S. B; OWOYEMI, F. B. Characterization by factor analysis of the chemical facies of groundwater in the deltaic plain sands aquifer of Warri, western Niger delta, Nigeria. *African Journal of Science and Technology*. v. 7, p. 73-81. 2006.

PARALTA, Eduardo A.; FRANCÉS, Alain P.; NUNES, Luís M.; RIBEIRO, Luís F. Optimização de redes de monitorização de águas subterrâneas em áreas agrícolas – um caso de estudo no bloco de rega de canhestros (sistema de rega de Alqueva). Lisboa: Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos – APRH. 17p. 2004.

PATRUS, Maria Letícia Rabelo; SANTOS, Augusto César Soares; FIGUEIREDO, Vânia Lúcia Souza; MATOS, Alcione Ribeiro; MENEZES, Isabel Cristina R. *Parcela mineira da bacia do rio São Francisco: caracterização hidroclimática e avaliação dos recursos hídricos de superfície*. In: PINTO, Claiton Piva; MARTINS-NETO, Marcelo Augusto (Org.). *A Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais*. 1ª ed. Belo Horizonte: SBG-MG, p. 285-326. 2001.

PEDROSA, Célio Augusto; CAETANO, Francisco A. *Águas Subterrâneas*. Brasília: Agência Nacional de Águas - SUPERINTENDÊNCIA DE INFORMAÇÕES HIDROLÓGICAS – SIH, 2002.85 p.

PEREIRA, Elder Resende de Santana. *Caracterização hidrogeoquímica da ilha de Itaparica, Bahia*. Orientador: Manoel Jerônimo Moreira Cruz. 2009. 146 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental) – Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2009.

PEREIRA, Vera Lúcia Vilela de Oliveira. Evolução hidroquímica em áreas adjacentes a locais de deposição de resíduos sólidos. Orientador: Alberto da Silva Lima. 2005. 243 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Ciências da Universidade do Minho, Braga, 2005.

PINTO, Claiton Piva; MARTINS-NETO, Marcelo Augusto. Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais. Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo de Minas Gerais, 2001. Belo Horizonte: SBG - MG, v. 1, 245 p.

PIUS, Anitha; JEROME, Charmaine; SHARMA, Nagaraja. Evaluation of groundwater quality in and around Peenya industrial area of Bangalore, South India using GIS techniques. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 184, p. 4067–4077, 2012.

POLITANO, Alexandre Tadeu. *Investigação de técnicas exploratórias de dados aplicadas a qualidade ambiental em sistemas de informação geográfica*. Orientador: Nelson Francisco Favilla Ebecken. 2009. 156 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

RIBEIRO, Moisés Santiago; FARIA, Fábio Henrique de Souza; LIMA, Luiz Antônio; SANTOS, Silvânio Rodrigues dos; JESUS, Marina Rosa de. Avaliação da qualidade e tratamento das águas subterrâneas para irrigação em Jaíba e Janaúba – precipitação química e corrosão. *Irriga*, Botucatu, v. 14, n. 3, p. 336-347, julho-setembro 2009.

RODRIGUES, Elaine Aparecida. Vida do homem/o homem sem vida: retratos da degradação sócio-ambiental. In: Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade. Encontro da Associação Nacional de Pós Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade. São Paulo: ANPPAS, p.1-20, 2004.

SAHEBJALAL, Ehsan. Application of geostatistical analysis for evaluating variation in groundwater characteristics. *World Applied Sciences Journal*, v. 18, n. 1, p. 135-141, 2012.

SALGADO, Eveline Viana; de ANDRADE, Eunice Maia; FONTENELE, Sávio de Brito; MEIRELES, Ana Célia Maia. Similaridade das variáveis hidroquímicas com o uso de análise multivariada, na bacia do Salgado, Ceará. *Revista Caatinga*, v. 24, n. 3, p. 158-166, 2011.

SANTOS, A. C. Noções de Hidroquímica. In: Feitosa A. C. & Manoel Filho J. (eds.) *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. CPRM, LABHID-UFPE. p. 81-108, 1997.

SANTOS, Rubens Manoel dos; VIEIRA, Fábio de Almeida; FAGUNDES, Marcílio; NUNES, Yule Roberta Ferreira; GUSMÃO, Eduardo. Riqueza e similaridade florística de oito remanescentes florestais no norte de Minas Gerais, Brasil. *Revista Árvore* [online], v. 31, n.1, p. 135-144, 2007.

SANTOS, Estefânia Fernandes dos; PAIXÃO, Maricene Menezes Oliveira Mattos; DA SILVA, Sergio Melo. Aspectos hidrogeoquímicos e classes de água do aquífero cárstico na região de Jaíba, Varzelândia e Verdelândia, MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 16, e ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS, 17, 2010, São Luís. [Anais eletrônicos]. São Luís: ABAS, 2010. Disponível em: < <http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/asubterraneas/article/viewArticle/23136>>. Acesso em: 03 abr. 2012.

SCANLON, Bridget R.; REEDY, Robert C.; TONESTROM, David A. S.; PRUDIC, David E.; DENNEHY, Kevin F. Impact of land-use and land cover change on groundwater recharge and quality in the south-western US. *Global Change Biology*, v. 11, p. 1-17, 2005.

SCHOBBER, Juliana. Preservação e uso racional do único bioma exclusivamente nacional. *Ciência e Cultura*, v.54, n.2, p. 06-07, 2002.

SCHVARTZMAN, Alberto Simon. Avaliação de alternativas para suprimento de água para consumo humano na região semi-árida de Minas Gerais. Orientador: Doutor Luiz Rafael Palmier. 2007. 232 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, 2007.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM. Implantação de Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas: proposta técnica. Belo Horizonte: CPRM, 2009. 85p. Relatório.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM. Siagas – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (Brasília – DF). Mapa da distribuição espacial de poços cadastrados no Siagas até o ano de 2012, incluindo poços de abastecimento público e de abastecimento doméstico. Brasília, 2012.

SHAND, P.; FRENGSTAD, B. *Baseline Groundwater Quality : a comparison of selected British and Norwegian aquifers*. Groundwater Systems and Water Quality Programme: British Geological Survey, 92 p., 2001.

SILVA, Adelbani Braz da; GIMENA, Emílio Custódio; ESCONDINO, Paulo Cyro Baptista. Estudo Hidrogeológico do carste da Jaíba, norte de Minas Gerais. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2, 1982, Salvador, Anais..., Salvador, 1982. p. 65-88.

SILVA, Adelbani Braz da. *Hidrogeologia de Meio Cársticos*. In: Feitosa, Fernando A. C. et al. (Org.). Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações. 3 ed. (rev. e amp.), Rio de Janeiro: CPRM – LABHID, p. 153-172. 2008.

SILVA, Fernandha Batista da; COUTINHO, Arthur Paiva; MONTENEGRO, Suzana Maria Gico Lima; CABRAL, Jaime Joaquim da Silva Pereira; ANTONINO, Antônio Celso Dantas Antonino; DA SILVA, Simone Rosa. Análise crítica e comparativa dos sistemas de gestão dos recursos hídricos subterrâneos nos estados de Pernambuco, Ceará e São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 16 e ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS, 17. 2010. 20 p. Disponível em: <<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/asubterraneas/article/viewFile/23088/15203>>. Acesso em: abr. 2012.

SILVA, José Maria Cardoso; TABARELLI, Marcelo. *Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2004. 382 p.

SILVA, José Tadeu Alves da; CARVALHO, Janice Guedes de. Propriedade do solo, estado nutricional e produtividade de bananeiras ‘Prata anã’ (AAB) irrigadas com águas calcárias. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v.28, n.2, p.332-338, mar/abr 2004.

SILVA, Mirna Karla Amorim; ROSA, Roberto. Diagnóstico do meio físico da bacia hidrográfica do rio São Francisco, no Estado de Minas Gerais - Brasil. IN: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, 2009, Natal, Anais..., Natal: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2009. p. 4393-4400.

SOMLYODY, L; VARIS, O. Freshwater under pressure. *International Review for Environmental Strategies*, v.6, n.2, p.181-204, 2006.

SUVEDHA, M.; GURUGNANAM, B.; SUGANYA, M.; VASUDEVAN, S. Multivariate statistical analysis of geochemical data of groundwater in Veeranam catchment area, Tamil Nadu. *Journal of the Geological Society of India*, v. 74, n. 5, p. 573-578, 2009.

SZIKSZAY, Maria. Geoquímica das águas. *Boletim IG-USP. Série Didática*, n. 5, p. 1-166, 1993.

TUNDISI, José Galizia. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. *Estudos Avançados*. v. 22, n. 63, p. 7-16, 2008.

UFV – Universidade Federal de Viçosa. Atlas Digital das Águas de Minas. 3ª edição [online], 2009. Disponível em: http://www.atlasdasaguas.ufv.br/atlas_digitaldas_aguas_de_minas_gerais.html. Acesso em: Set. 2012.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY - USGS - USGS Test Method I-1187-85. Chloride, calorimetric, ferric thiocyanate - parameter and code: chloride, dissolved, I-1187-85 (mg/L as Cl): 00940. 1985. p.149-

150. Disponível em: <http://www.caslab.com/Test-Methods-Search/PDF/USGS-Method-I-1187-85.pdf>. Acesso em: Set. 2012.

VASCONCELOS, Bruno Nery Fernandes. *Gênese de antropossolos em sítios arqueológicos de ambiente cárstico no norte de Minas Gerais*. 2010. 138 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

VAUX, Henry. Groundwater under stress: the importance of management. *Environmental Earth Sciences*, v. 62, p. 19-23, 2011.

VELÁSQUEZ, L. N. M.; UHLEIN, A.; FANTINEL, L. M.; VARGAS, A. M. D.; FERREIRA, E. F.; CASTILHO, L. S.; ARANHA, P. R. A. Investigação hidrogeológica do flúor em aquíferos carbonáticos do Médio São Francisco, MG, e epidemiologia da fluorose dentária associada. Relatório CNPq. 2009. 130 p.

VIGLIO, Eduardo Paim; VELASQUEZ, Leila Nunes Menegasse; BAGGIO, Hernando. Prospecção Geoquímica de Baixa Densidade de Flúor em bacias da margem direita do rio São Francisco - Norte de MG. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 13, SIMPÓSIO DE GEOQUÍMICA DOS PAÍSES DO MERCOSUL, 3., 2011, Gramado, *Anais...*, Gramado: Sociedade Brasileira de Geoquímica - SBGQ, 2011. p. 1-4.

VON SPERLING, Eduardo. Afinal, Quanta Água Temos no Planeta? *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 11, n.4, p. 189-199, 2006.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. Environmental health criteria 165: inorganic lead. Geneva: United Nations Environment Program, International Labour Organization, World Health Organization. 300 p., 1995.

YUAN, Tian; FENGMIN, Li; PUHAI, Liu. Economic analysis of rainwater harvesting and irrigation methods, with an example from China. *Agricultural Water Management*, v. 60, p. 217–226, 2003.

ZOBY, José Luiz Gomes; Matos, Bolivar Antunes; Conejo, João Gilberto Lotufo. Disponibilidade de águas subterrâneas na bacia do rio São Francisco. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13., 2004, Cuiabá, MT, *Anais...*, São Paulo: Revista Águas Subterrâneas - ABAS, 2004. p. 1-21.

ZOBY, José Luiz Gomes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 15, 2008, Natal. *Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil*. São Paulo: ABAS, 2008. Disponível em: < [http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/ asubterraneas/article/view/23802](http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/asubterraneas/article/view/23802)> Acesso em: mar. 2012.

APÊNDICE A

Matriz de Correlação de Spearman para os
parâmetros físico-químicos monitorados nas águas
subterrâneas da área de estudo

TABELA A.1: Resultados (p-valores) do teste de Spearman para 39 parâmetros, excluídos agrotóxicos e biológicos.

Classificação de Spearman por ordem de correlações (Norte de Minas) - eliminados MD em pares - correlações marcadas são significativas a p < 0,05

Variáveis	pH campo	CE campo - µS/cm	OD campo - mg/L	STD campo - mg/L	Alcalinidade de bicarbonato - mg/L	Cloreto total - mg/L	Dureza total - mg/L	Fenóis totais - mg/L	Fluoreto - mg/L	Fósforo total - mg/L	Magnésio dissolvido - mg/L	Nitrato - mg/L	Sulfato total - mg/L	Alumínio total - mg/L	Arsênio total - mg/L	Bário total - mg/L	Boro total - mg/L	Cádmio total - mg/L	Cálcio dissolvido - mg/L	Cálcio total - mg/L	Chumbo total - mg/L
pH campo	1,000000	-0,351015	0,595123	-0,340959	-0,340167	-0,275855	-0,280828	0,139253	0,038018	0,100921	-0,256740	-0,250549	-0,232038	-0,110910	-0,000141	-0,027930	0,456438	0,026616	-0,423117	-0,477151	0,065090
CE campo - µS/cm	-0,351015	1,000000	-0,279565	0,963660	0,777405	0,814908	0,833210	-0,084566	0,303485	-0,344722	0,669486	0,384342	0,715161	0,210806	-0,105106	0,278214	-0,091533	-0,063755	0,713337	0,806984	0,009659
OD campo - mg/L	0,595123	-0,279565	1,000000	-0,233909	-0,217010	-0,098675	-0,260976	0,053498	-0,177130	0,072433	-0,323166	0,114436	-0,113165	0,037173	-0,139497				-0,168631		0,039414
STD campo - mg/L	-0,340959	0,963660	-0,233909	1,000000	0,794975	0,834334	0,855568	-0,047129	0,329271	-0,360280	0,683318	0,384022	0,752898	0,207201	-0,145779	0,290072	-0,115209	-0,067298	0,722919	0,813495	-0,013658
Alcalinidade bicarbonato - mg/L	-0,340167	0,777405	-0,217010	0,794975	1,000000	0,584297	0,830718	-0,088660	0,401231	-0,375175	0,601631	0,293081	0,687770	0,175850	-0,134440	0,149191	-0,135158	-0,013410	0,628902	0,704823	-0,030218
Cloreto total - mg/L	-0,275855	0,814908	-0,098675	0,834334	0,584297	1,000000	0,646875	-0,026997	0,268277	-0,293629	0,575028	0,453109	0,617967	0,240332	-0,126182	0,404040	-0,073211	-0,025536	0,531487	0,613570	0,070742
Dureza total - mg/L	-0,280828	0,833210	-0,260976	0,855568	0,830718	0,646875	1,000000	0,012360	0,308157	-0,440012	0,729841	0,413243	0,715488	0,142069	-0,131309	0,237631	-0,369345		0,900264	0,949137	-0,009181
Fenóis totais - mg/L	0,139253	-0,084566	0,053498	-0,047129	-0,088660	-0,026997	0,012360	1,000000	-0,024744	0,057194	0,013381	-0,015780	-0,042080	-0,193423	-0,039299	-0,091444	0,130083	-0,048386	-0,065556	-0,119444	-0,011801
Fluoreto - mg/L	0,038018	0,303485	-0,177130	0,329271	0,401231	0,268277	0,308157	-0,024744	1,000000	-0,222989	0,214013	0,129877	0,333337	0,225097	-0,101383	0,208702	0,216968	0,084643	0,064462	0,087342	0,065915
Fósforo total - mg/L	0,100921	-0,344722	0,072433	-0,360280	-0,375175	-0,293629	-0,440012	0,057194	-0,222989	1,000000	-0,269135	-0,152162	-0,239926	-0,195832	0,064154	-0,059686	0,032124	0,061425	-0,265009	-0,237734	0,072397
Magnésio dissolvido - mg/L	-0,256740	0,669486	-0,323166	0,683318	0,601631	0,575028	0,729841	0,013381	0,214013	-0,269135	1,000000	0,160367	0,602355	0,093091	-0,006333	0,224770	-0,202082	-0,028558	0,505256	0,511415	-0,031847
Nitrato - mg/L	-0,250549	0,384342	0,114436	0,384022	0,293081	0,453109	0,413243	-0,015780	0,129877	-0,152162	0,160367	1,000000	0,354532	0,154960	-0,205739	0,072905	-0,115161	-0,073979	0,435557	0,482655	-0,160512
Sulfato total - mg/L	-0,232038	0,715161	-0,113165	0,752898	0,687770	0,617967	0,715488	-0,042080	0,333337	-0,239926	0,602355	0,354532	1,000000	0,160032	-0,173835	0,211037	-0,046862	-0,003965	0,581315	0,675235	-0,042785
Alumínio total - mg/L	-0,110910	0,210806	0,037173	0,207201	0,175850	0,240332	0,142069	-0,193423	0,225097	-0,195832	0,093091	0,154960	0,160032	1,000000	-0,035311	0,169805	0,067757	-0,062835	0,198341	0,227091	-0,087797
Arsênio total - mg/L	-0,000141	-0,105106	-0,139497	-0,145779	-0,134440	-0,126182	-0,131309	-0,039299	-0,101383	0,064154	-0,006333	-0,205739	-0,173835	-0,035311	1,000000	0,025249	-0,032038	-0,025708	-0,132082	-0,128882	0,121986
Bário total - mg/L	-0,027930	0,278214		0,290072	0,149191	0,404040	0,237631	-0,091444	0,208702	-0,059686	0,224770	0,072905	0,211037	0,169805	0,025249	1,000000	0,074464	-0,001398	0,069698	0,118737	0,084312
Boro total - mg/L	0,456438	-0,091533	-0,115209	-0,135158	-0,073211	-0,369345	0,130083	0,216968	0,032124	-0,202082	-0,115161	-0,046862	0,067757	-0,032038	0,074464	1,000000			-0,400812	-0,401637	-0,084877
Cádmio total - mg/L	0,026616	-0,063755	-0,067298	-0,013410	-0,025536		-0,048386	0,084643	0,061425	-0,028558	-0,073979	-0,003965	-0,062835	-0,025708	-0,001398		1,000000		-0,108184	0,035612	0,317032
Cálcio dissolvido - mg/L	-0,423117	0,713337	-0,168631	0,722919	0,628902	0,531487	0,900264	-0,065556	0,064462	-0,265009	0,505256	0,435557	0,581315	0,198341	-0,132082	0,069698	-0,400812	-0,108184	1,000000	0,948666	-0,206709
Cálcio total - mg/L	-0,477151	0,806984		0,813495	0,704823	0,613570	0,949137	-0,119444	0,087342	-0,237734	0,511415	0,482655	0,675235	0,227091	-0,128882	0,118737	-0,401637	0,035612	0,948666	1,000000	-0,101849
Chumbo total - mg/L	0,065090	0,009659	0,039414	-0,013658	-0,030218	0,070742	-0,009181	-0,011801	0,065915	0,072397	-0,031847	-0,160512	-0,042785	-0,087797	0,121986	0,084312	-0,084877	0,317032	-0,206709	-0,101849	1,000000
Cobre dissolvido - mg/L	-0,132385	0,300356	-0,276404	0,251914	0,169842	0,242757	0,265293	-0,014635	-0,020982	-0,181264	0,330866	0,052131	0,131402	0,070247	0,057710	0,017726	-0,151204		0,235190	0,161784	0,288546
Cobre total - mg/L	-0,088466	0,038387	-0,166912	0,045560	0,012142	0,012618	0,013100	0,008925	-0,049684	0,041679	0,068748	-0,003843	0,022946	0,071594	0,131133	0,014688	-0,044419	-0,053539	0,064910	0,049580	0,046169
Estrôncio - mg/L	-0,105705	0,781038		0,782159	0,715083	0,596511	0,668625	-0,025911	0,349201	-0,333537	0,658290	0,197622	0,741809	0,190127	-0,042249	0,266644	-0,063678		0,597949	0,650606	-0,005511
Ferro dissolvido - mg/L	-0,074263	0,004631	-0,006752	-0,000521	-0,017936	0,000169	0,034416	-0,130680	-0,061612	0,053920	0,033997	-0,084496	-0,045159	0,122248	0,055338	0,047939	0,176526	0,010290	0,043627	-0,031603	0,118031
Ferro total - mg/L	-0,018112	-0,049708	-0,242368	-0,056098	-0,096342	-0,076923	-0,122780	-0,078272	-0,183089	0,136640	-0,011434	-0,249222	-0,068742	0,287337	0,159106	-0,040243	0,033143	-0,049122	-0,000056	-0,075501	0,021844
Lítio - mg/L	0,176932	0,474572		0,474226	0,367990	0,464985	0,185690	0,120740	0,439440	-0,289134	0,370111	0,071732	0,346477	0,148916	-0,045058	0,295196	0,402400		0,065292	0,107384	0,046663
Manganês dissolvido - mg/L	-0,078895	0,104558	-0,038396	0,097232	-0,009647	0,064875	0,039294	0,072167	-0,178142	0,063427	0,132466	-0,102250	0,030791	0,053560	0,060458	-0,056695	-0,042631	-0,010175	0,134334	0,090002	0,012665
Manganês total - mg/L	0,011480	0,076284	-0,351788	0,067686	-0,057651	0,053954	0,050910	0,013306	-0,209064	0,148134	0,113340	-0,263226	0,016412	0,110901	0,122860	0,090711	0,043787	-0,067955	0,045061	0,004212	0,030812
Mercúrio total - mg/L	0,014154	0,003808	-0,029929	-0,011480	0,022497	-0,005995	-0,071585	-0,097144	-0,017620	0,044822	0,046566	-0,067477	0,022443	0,026052	-0,020943	0,044710		-0,011288	-0,001805	0,064104	0,057748
Níquel total - mg/L	0,065304	-0,044629	-0,046107	-0,062937	-0,079054	-0,020084	0,040186	0,075204	-0,070121	-0,001828	-0,048306	0,014709	-0,067470	0,033488	0,081465	-0,012483	0,105308	0,086322	-0,054166	-0,050192	0,068422
Potássio dissolvido - mg/L	-0,007486	0,208532	-0,098429	0,211723	0,026595	0,254823	0,277990	0,076497	-0,085221	0,065875	0,271352	0,088245	0,163934	0,046416	-0,066914	0,279217	-0,060351	-0,107902	0,152200	0,125056	-0,023820
Potássio total - mg/L	0,021553	0,269762		0,263422	0,057523	0,307618	0,482528	-0,001072	0,016412	0,041679	0,216795	0,163061	0,229077	0,120508	-0,043846	0,330692	-0,047876	-0,061192	0,171895	0,162971	0,092534
Selênio total - mg/L	-0,171516	0,109285		0,114978	0,025500	0,135130	0,202006	0,037312	0,034495	-0,073140	0,108251	0,193659	0,247125	0,145231	0,033177	0,165630	-0,131848		0,197530	0,228294	-0,057314
Silício dissolvido - mg/L	0,015065	0,142495	-0,099390	0,095141																	

TABELA A.1: Resultados (p-valores) do teste de Spearman para 39 parâmetros, excluídos agrotóxicos e biológicos. (continuação)

Classificação de Spearman por ordem de correlações (Norte de Minas) - eliminados MD em pares - correlações marcadas são significativas a p < 0,05

Variáveis	Cobre dissolvido - mg/L	Cobre total - mg/L	Cromo total - mg/L	Estrôncio - mg/L	Ferro dissolvido - mg/L	Ferro total - mg/L	Lítio - mg/L	Manganês dissolvido - mg/L	Manganês total - mg/L	Mercúrio total - mg/L	Níquel total - mg/L	Potássio dissolvido - mg/L	Potássio total - mg/L	Selênio total - mg/L	Silício dissolvido - mg/L	Sódio dissolvido - mg/L	Sódio total - mg/L	Zinco total - mg/L	
pH campo	-0,132385	-0,088466		-0,105705	-0,074263	-0,018112	0,176932	-0,078895	0,011480	0,014154	0,065304	-0,007486	0,021553	-0,171516	0,015065	-0,001916	0,002136	-0,056054	
CE campo - µS/cm	0,300356	0,038387		0,781038	0,004631	-0,049708	0,474572	0,104558	0,076284	0,003808	-0,044629	0,208532	0,269762	0,109285	0,142495	0,534012	0,541734	0,324766	
OD campo - mg/L	-0,276404	-0,166912			-0,006752	-0,242368		-0,038396	-0,351788	-0,029929	-0,046107	-0,098429		-0,099390	-0,166783			0,162282	
STD campo - mg/L	0,251914	0,045560		0,782159	-0,000521	-0,056098	0,474226	0,097232	0,067686	-0,011480	-0,062937	0,211723	0,263422	0,114978	0,095141	0,564515	0,540848	0,304753	
Alcalinidade bicarbonato - mg/L	0,169842	0,012142		0,715083	-0,017936	-0,096342	0,367990	-0,009647	-0,057651	0,022497	-0,079054	0,026595	0,057523	0,025500	0,047870	0,406335	0,370718	0,282067	
Cloreto total - mg/L	0,242757	0,012618		0,596511	0,000169	-0,076923	0,464985	0,064875	0,053954	-0,005995	-0,020084	0,254823	0,307618	0,135130	0,062351	0,618502	0,601145	0,237108	
Dureza total - mg/L	0,265293	0,013100		0,668625	0,034416	-0,122780	0,185690	0,039294	0,050910	-0,071585	0,040186	0,277990	0,482528	0,202006	0,161693	0,353785	0,322213	0,496338	
Fenóis totais - mg/L	-0,014635	0,008925		-0,025911	-0,130680	-0,078272	0,120740	0,072167	0,013306	-0,097144	0,075204	0,076497	-0,001072	0,037312	0,096109	0,013473	0,014477	-0,184943	
Fluoreto - mg/L	-0,020982	-0,049684		0,349201	-0,061612	-0,183089	0,439440	-0,178142	-0,209064	-0,017620	-0,070121	-0,085221	0,016412	0,034495	-0,323806	0,229408	0,290656	0,069270	
Fósforo total - mg/L	-0,181264	0,041679		-0,333537	0,053920	0,136640	-0,289134	0,063427	0,148134	0,044822	-0,001828	0,065875	0,041679	-0,073140	0,152785	-0,168567	-0,144645	-0,149754	
Magnésio dissolvido - mg/L	0,330866	0,068748		0,658290	0,033997	-0,011434	0,370111	0,132466	0,113340	0,046566	-0,048306	0,271352	0,216795	0,108251	0,335019	0,556509	0,431679	0,286831	
Nitrato - mg/L	0,052131	-0,003843		0,197622	-0,084496	-0,249222	0,071732	-0,102250	-0,263226	-0,067477	0,014709	0,088245	0,163061	0,193659	-0,024541	0,036723	0,017076	0,112500	
Sulfato total - mg/L	0,131402	0,022946		0,741809	-0,045159	-0,068742	0,346477	0,030791	0,016412	0,022443	-0,067477	0,163934	0,229077	0,247125	0,092835	0,421262	0,394995	0,253539	
Alumínio total - mg/L	0,070247	0,071594		0,190127	0,122248	0,287337	0,148916	0,053560	0,110901	0,026052	0,033488	0,046416	0,120508	0,145231	-0,105093	0,155354	0,175238	0,220840	
Arsênio total - mg/L	0,057710	0,131133		-0,042249	0,055338	0,159106	-0,045058	0,122860	-0,020943	0,081465	-0,066914	-0,043846	0,033177	0,086112	-0,024772	-0,016035	-0,020607		
Bário total - mg/L	0,017726	0,014688		0,266644	0,047939	-0,040243	0,295196	-0,056695	0,090711	0,044710	-0,012483	0,279217	0,330692	0,165630	-0,030345	0,320554	0,376381	0,029322	
Boro total - mg/L	-0,151204	-0,044419		-0,063678	0,176526	0,033143	0,402400	-0,042631	0,043787		0,105308	-0,060351	-0,047876	-0,131848	-0,144068	0,215987	0,201009	-0,275790	
Cádmio total - mg/L		-0,053539			0,010290	-0,049122		-0,010175	-0,067955	-0,011288	0,086322	-0,107902	-0,061192		-0,036284	-0,075062	-0,028840	-0,055918	
Cálcio dissolvido - mg/L	0,235190	0,064910		0,597949	0,043627	-0,000056	0,065292	0,134334	0,045061	-0,001805	-0,054166	0,152200	0,171895	0,197530	0,143689	0,190910	0,160106	0,241643	
Cálcio total - mg/L	0,161784	0,049580		0,650606	-0,031603	-0,075501	0,107384	0,090002	0,004212	0,064104	-0,050192	0,125056	0,162971	0,228294	0,199961	0,158401	0,194419	0,311909	
Chumbo total - mg/L	0,288546	0,046169		-0,005511	0,118031	0,021844	0,046663	0,012665	0,030812	0,057748	0,068422	-0,023820	0,092534	-0,057314	-0,078962	0,019122	0,066161	0,062363	
Cobre dissolvido - mg/L	1,000000	0,253092		0,134023	0,100246	0,195954	-0,011852	0,064306	0,059689	0,104148	0,020392	0,261902	0,238035	0,065333	0,194396	0,190583	0,074984	0,201603	
Cobre total - mg/L	0,253092	1,000000		0,047443	0,072891	0,173500	0,016403	0,021915	0,112545	0,076409	0,022388	0,048912	0,051339	0,027901	0,093260	0,030957	0,043874	0,069311	
Cromo total - mg/L			1,000000																
Estrôncio - mg/L	0,134023	0,047443		1,000000	0,093665	-0,003381	0,474342	0,276748	0,275373		-0,096509	0,324475	0,360601	0,214586	0,266867	0,598990	0,660794	0,452669	
Ferro dissolvido - mg/L	0,100246	0,072891		0,093665	1,000000	0,218281	0,213748	0,358911	0,165649	-0,061876	0,041554	0,068989	0,065245	0,036910	0,014438	0,057697	0,054599	0,029041	
Ferro total - mg/L	0,195954	0,173500		-0,003381	0,218281	1,000000	-0,095010	0,259032	0,508659	0,054227	0,068648	-0,077816	-0,070555	-0,122952	0,025431	0,024305	-0,007137	0,227806	
Lítio - mg/L	-0,011852	0,016403		0,474342	0,213748	-0,095010	1,000000	0,071563	0,171512		-0,040291	0,357442	0,369141	0,048986	0,226246	0,665542	0,726620	0,055937	
Manganês dissolvido - mg/L	0,064306	0,021915		0,276748	0,358911	0,259032	0,071563	1,000000	0,576853	-0,014206	0,006406	0,097791	0,082893	0,008179	0,173848	0,187602	0,196188	0,038282	
Manganês total - mg/L	0,059689	0,112545		0,275373	0,165649	0,508659	0,171512	0,576853	1,000000	0,082975	0,000564	0,083489	0,117945	-0,004432	0,265426	0,266904	0,249758	0,135122	
Mercúrio total - mg/L	0,104148	0,076409			-0,061876	0,054227		-0,014206	0,082975	1,000000	-0,018033	-0,054345	0,011054		0,045240	0,021299	0,050616	0,111097	
Níquel total - mg/L	0,020392	0,022388		-0,096509	0,041554	0,068648	-0,040291	0,006406	0,000564	-0,018033	1,000000	-0,067584	-0,001813	-0,095154	0,027886	-0,057288	-0,126773	0,054456	
Potássio dissolvido - mg/L	0,261902	0,048912		0,324475	0,068989	-0,077816	0,357442	0,097791	0,083489	-0,054345	-0,067584	1,000000	0,911181	0,393212	0,357042	0,308519	0,300039	0,056211	
Potássio total - mg/L	0,238035	0,051339		0,360601	0,065245	-0,070555	0,369141	0,082893	0,117945	0,011054	-0,001813	0,911181	1,000000	0,443933	0,316422	0,282657	0,299234	0,146094	
Selênio total - mg/L	0,065333	0,027901		0,214586	0,036910	-0,122952	0,048986	0,008179	-0,004432		-0,095154	0,393212	0,443933	1,000000	-0,005339	-0,033982	0,033872	0,101843	
Silício dissolvido - mg/L	0,194396	0,093260		0,266867	0,014438	0,025431	0,226246	0,173848	0,265426	0,045240	0,027886	0,357042	0,316422	-0,005339	1,000000	0,315355	0,289494	0,076333	
Sódio dissolvido - mg/L	0,190583	0,030957		0,598990	0,057697	0,024305	0,665542	0,187602	0,266904	0,021299	-0,057288	0,308519	0,282657	-0,033982	0,315355	1,000000	0,940797	0,116647	
Sódio total - mg/L	0,074984	0,043874		0,660794	0,054599	-0,007137	0,726620	0,196188	0,249758	0,050616	-0,126773	0,300039	0,299234	0,033872	0,289494	0,940797	1,000000	0,110416	
Zinco total - mg/L	0,201603	0,069311		0,452669	0,029041	0,227806	0,055937	0,038282	0,135122	0,111097	0,054456	0,056211	0,146094	0,101843	0,076333	0,116647	0,110416	1,000000	

APÊNDICE B

Memória de cálculo e exemplificação de balanços
iônicos feitos para parte das amostras

O balanço iônico consiste no cálculo do coeficiente de erro dos resultados das análises químicas, considerando que, em uma análise química completa, a concentração total de cátions deve ser aproximadamente igual à de ânions. Toma-se o valor de $e\% = 10$ como o máximo de erro aceitável para que a análise possa ser considerada correta. As principais causas de erros são atribuídas a erros de medição (coleta e análises), erros de cálculos e análises incompletas. O cálculo do balanço iônico foi aplicado para os resultados das amostras empregando a equação definida como:

$$Erro = \frac{\Sigma[cátions] - \Sigma[ânions]}{\Sigma[cátions] + \Sigma[ânions]} \times 100$$

Onde: $\Sigma[cátions] = \text{somatório das concentrações dos cátions em } \frac{meq}{L}$;

$\Sigma[ânions] = \text{somatório das concentrações dos ânions em } \frac{meq}{L}$.

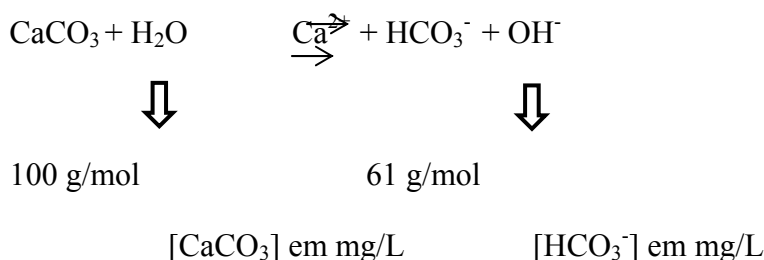
Inicialmente, foi realizada a complementação das análises faltantes dos íons HCO_3^- (bicarbonato) e CO_3^{2-} (carbonato). Para o cálculo destes íons foram utilizados, respectivamente, o balanço estequiométrico a partir dos resultados de alcalinidade de bicarbonato expressa como CaCO_3 (bicarbonato de cálcio CaCO_3) e a equação de Logan (1965). Esta última é baseada nas relações entre a concentração do bicarbonato e o pH com a concentração do carbonato, como segue:

$$[\text{CO}_3^{2-}] = [\text{HCO}_3^-] \times 9,38 \times 10^{\text{pH}-11}$$

Onde: $[\text{CO}_3^{2-}] = \text{concentração do carbonato em meq/L}$;

$[\text{HCO}_3^-] = \text{concentração do bicarbonato em meq/L}$.

Para se obter a concentração do bicarbonato em meq/L, utilizou-se a relação estequiométrica, como mostrado:



Como a alcalinidade de bicarbonato foi expressa em $[\text{CaCO}_3]$ em mg/L, a conversão da mesma é feita por proporcionalidade como segue:

$$[\text{HCO}_3^-] = [\text{CaCO}_3] \text{ em mg/L} \times 61/100; \text{ (obtem-se } [\text{HCO}_3^-] \text{ em mg/L); ou}$$

$$[\text{HCO}_3^-] = [\text{CaCO}_3] \text{ em mg/L} / 100; \text{ (obtem-se } [\text{HCO}_3^-] \text{ em meq/L).}$$

Os resultados dos cálculos descritos anteriormente foram feitos para todas as amostras das águas subterrâneas nas UPGRH SF6 e SF10, para os 127 poços das três fases do monitoramento (período 2005-2011). Porém, são apresentados os resultados parciais apenas para uma parte das amostras, a título ilustrativo apenas. Os exemplos são mostrados apresentados na tabela B.1, a seguir:

TABELA B.1: Resultados dos balanços iônicos, por amostra, para o monitoramento nas UPGRH SF6 e SF10, executado em 127 poços das três fases (período 2005-2011) – destacadas as análises com erro absoluto superior a 10%.

POÇO	CAMPANHA	DATA DA COLETA	Elemento dissolvido em meq/L									Soma de cátions (meq/L)	Soma de ânions (meq/L)	ânions - cátions	ânions + cátions	Erro (%)
			Sódio	Potássio	Cálcio	Magnésio	Bicarbonato	Carbonato	Sulfato	Nitrato	Cloreto					
BC001	1	14/04/05	1,02	0,06	10,67	2,67	-5,18	-0,0001	-0,10	0,00	-3,39	14,43	8,67	-5,76	23,10	-24,93
BC001	2	21/07/05	1,10	0,07	9,08	2,93	-5,42	-0,0001	-0,23	0,00	-6,07	13,17	11,72	-1,45	24,89	-5,81
BC001	3	09/11/05	1,23	0,07	9,50	2,91	-5,17	-0,0001	-0,17	0,00	-7,46	13,70	12,80	-0,90	26,49	-3,40
BC001	4	31/03/06	0,82	0,05	8,49	2,02	-4,71	-0,0001	-0,11	0,00	-5,37	11,38	10,20	-1,19	21,58	-5,50
BC001	10	30/06/10	0,96	0,05	9,72	2,37	-5,04	-0,0001	-0,18	-0,01	-7,80	13,10	13,02	-0,08	26,13	-0,29
BC001	11	08/12/10	1,08	0,06	10,41	2,46	-5,38	-0,0009	-0,36	-0,01	-10,45	14,00	16,21	2,21	30,21	7,30
BC001	12	12/04/11	0,59	0,04	3,03	0,94	-4,54	-0,0013	-0,05	0,00	-0,23	4,59	4,83	0,24	9,42	2,53
BC001	13	24/11/11	0,66	0,04	3,39	0,99	-4,56	0,0000	-0,18	0,00	-0,30	5,08	5,03	-0,04	10,11	-0,43
BC001	13	24/11/11	0,44	0,02	6,36	0,49	-5,38	0,0000	-0,35	-0,01	-0,21	7,32	5,96	-1,36	13,27	-10,26
2	1	14/04/05	0,15	0,05	1,24	0,15	-1,06	0,0000	-0,31	-0,01	-0,09	1,58	1,47	-0,11	3,06	-3,64
2	2	25/07/05	0,20	0,06	2,01	0,22	-1,81	-0,0004	-0,61	0,00	-0,10	2,49	2,53	0,04	5,01	0,77
2	3	09/11/05	0,20	0,06	1,66	0,24	-1,43	-0,0001	-0,01	0,00	-0,10	2,16	1,55	-0,62	3,71	-16,66
2	4	29/03/06	0,13	0,05	0,71	0,08	-0,52	0,0000	-0,01	-0,01	-0,13	0,97	0,67	-0,30	1,64	-18,10
NR4.14	1	14/04/05	0,27	0,01	6,67	0,41	-5,76	-0,0003	-0,16	-0,05	-0,28	7,37	6,25	-1,12	13,61	-8,20
NR4.14	2	25/07/05	0,32	0,02	4,24	0,45	-5,79	-0,0003	-0,15	-0,04	-0,08	5,02	6,05	1,03	11,07	9,30
NR4.14	3	09/11/05	0,18	0,01	3,79	0,36	-5,72	-0,0004	-0,11	-0,02	-0,05	4,33	5,90	1,57	10,23	15,32
NR4.14	4	29/03/06	0,28	0,01	5,90	0,37	-5,32	0,0000	-0,23	-0,05	-0,15	6,56	5,75	-0,81	12,30	-6,57
NR4.15	1	14/04/05	0,24	0,03	6,17	0,36	-5,58	-0,0003	-0,10	-0,01	-0,09	6,79	5,78	-1,02	12,57	-8,08
NR4.15	2	25/07/05	0,27	0,03	3,33	0,40	-5,72	-0,0004	-0,24	0,00	-0,09	4,03	6,04	2,02	10,07	20,03
NR4.15	3	09/11/05	0,29	0,02	3,89	0,38	-5,89	-0,0005	-0,13	-0,01	-0,16	4,57	6,19	1,61	10,76	15,01
NR4.15	4	29/03/06	0,24	0,02	5,51	0,32	-5,18	0,0000	-0,08	-0,01	-0,09	6,09	5,36	-0,73	11,44	-6,36
CE001	1	04/04/05	0,79	0,04	8,22	1,23	-6,40	-0,0001	-1,21	-0,04	-1,36	10,28	9,02	-1,26	19,30	-6,52
CE001	2	15/07/05	0,83	0,04	4,80	1,35	-6,89	-0,0001	-1,04	-0,02	-1,03	7,03	8,98	1,95	16,01	12,18

APÊNDICE C

Plumas de isoteores e respectivos gráficos de concentrações em seções hidroquímicas sucessivas

FIGURA C.1: Plumas de isotores da CE – medida em campo ($\mu\text{S}/\text{cm}$): (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos; e (c) evolução dos resultados (medianas) dos parâmetros físico-químicos monitorados em seções hidroquímicas sequenciais ao longo do fluxo predominante das águas subterrâneas na área de estudo.

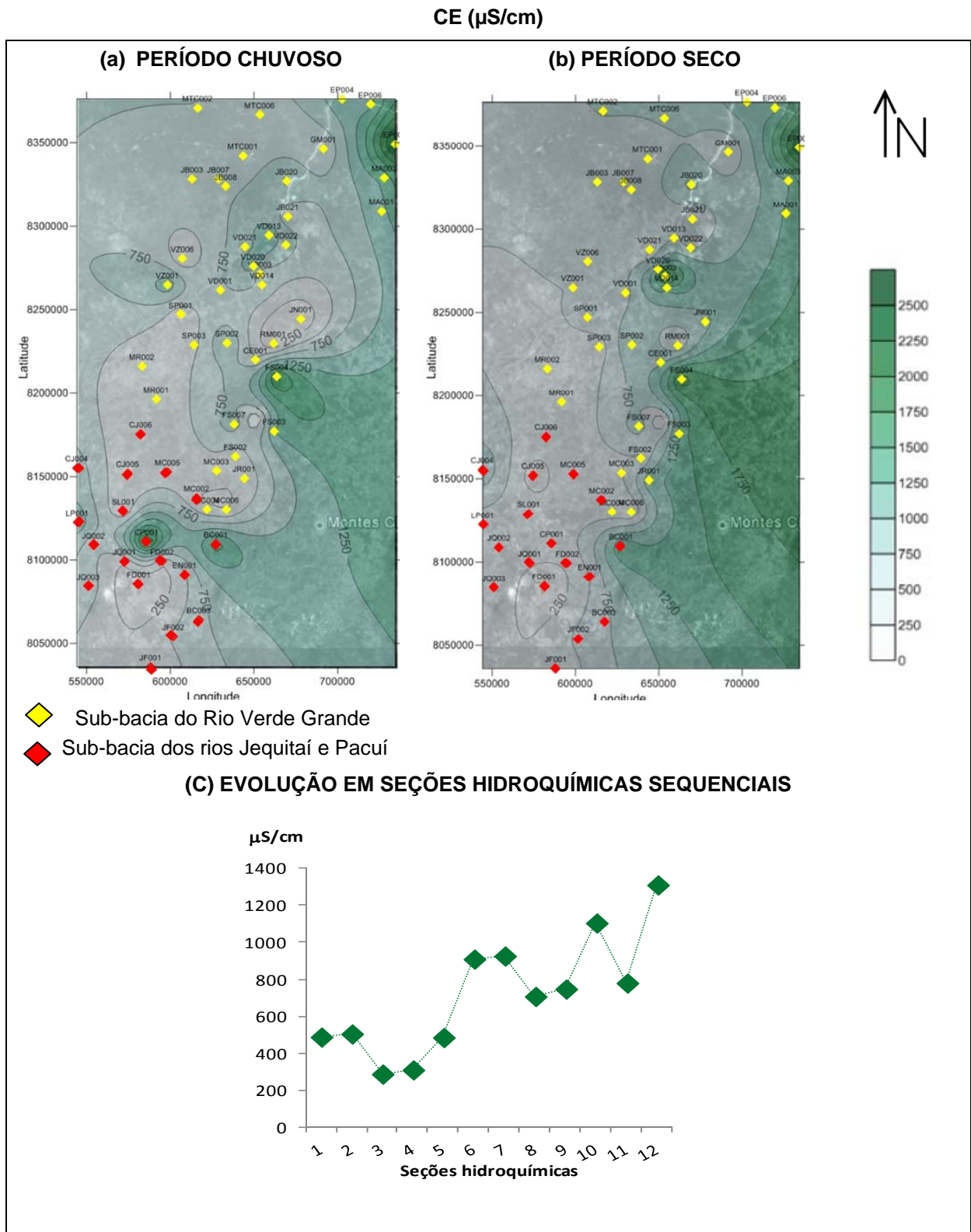


FIGURA C.2: Plumas de isotores dos sólidos totais dissolvidos – STD (mg/L): (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos; e (c) evolução dos resultados (medianas) dos parâmetros físico-químicos monitorados em seções hidroquímicas sequenciais ao longo do fluxo predominante das águas subterrâneas na área de estudo.

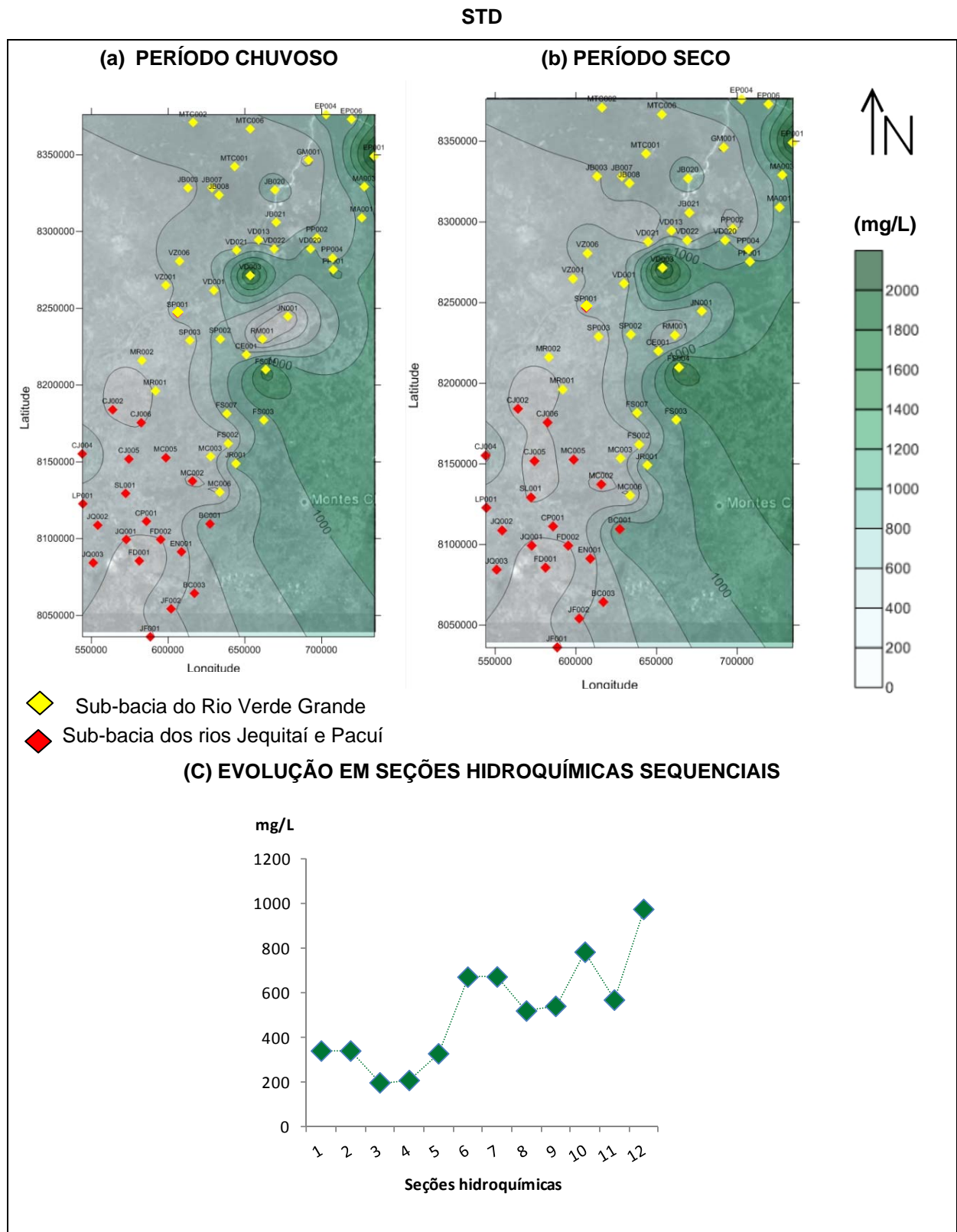


FIGURA C.3: Plumagens de isotores da dureza total (mg/L): (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos; e (c) evolução dos resultados (mediana) dos parâmetros físico-químicos monitorados em seções hidroquímicas sequenciais ao longo do fluxo predominante das águas subterrâneas na área de estudo.

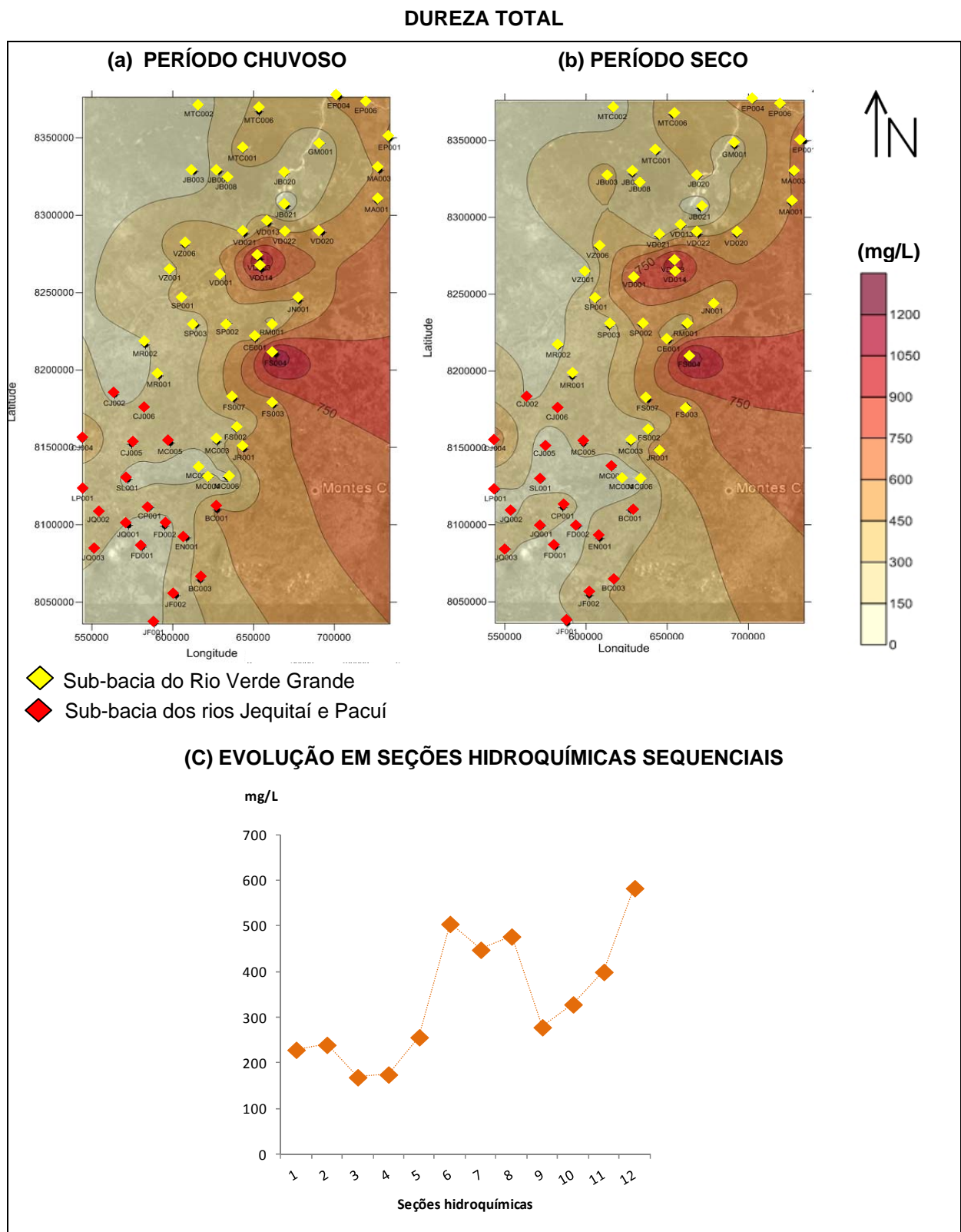


FIGURA C.4: Plumas de isotores do manganês total: (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos (mg/L); e (c) evolução dos resultados (medianas) dos parâmetros físico-químicos monitorados em seções hidroquímicas sequenciais ao longo do fluxo predominante das águas subterrâneas na área de estudo (mmol/L).

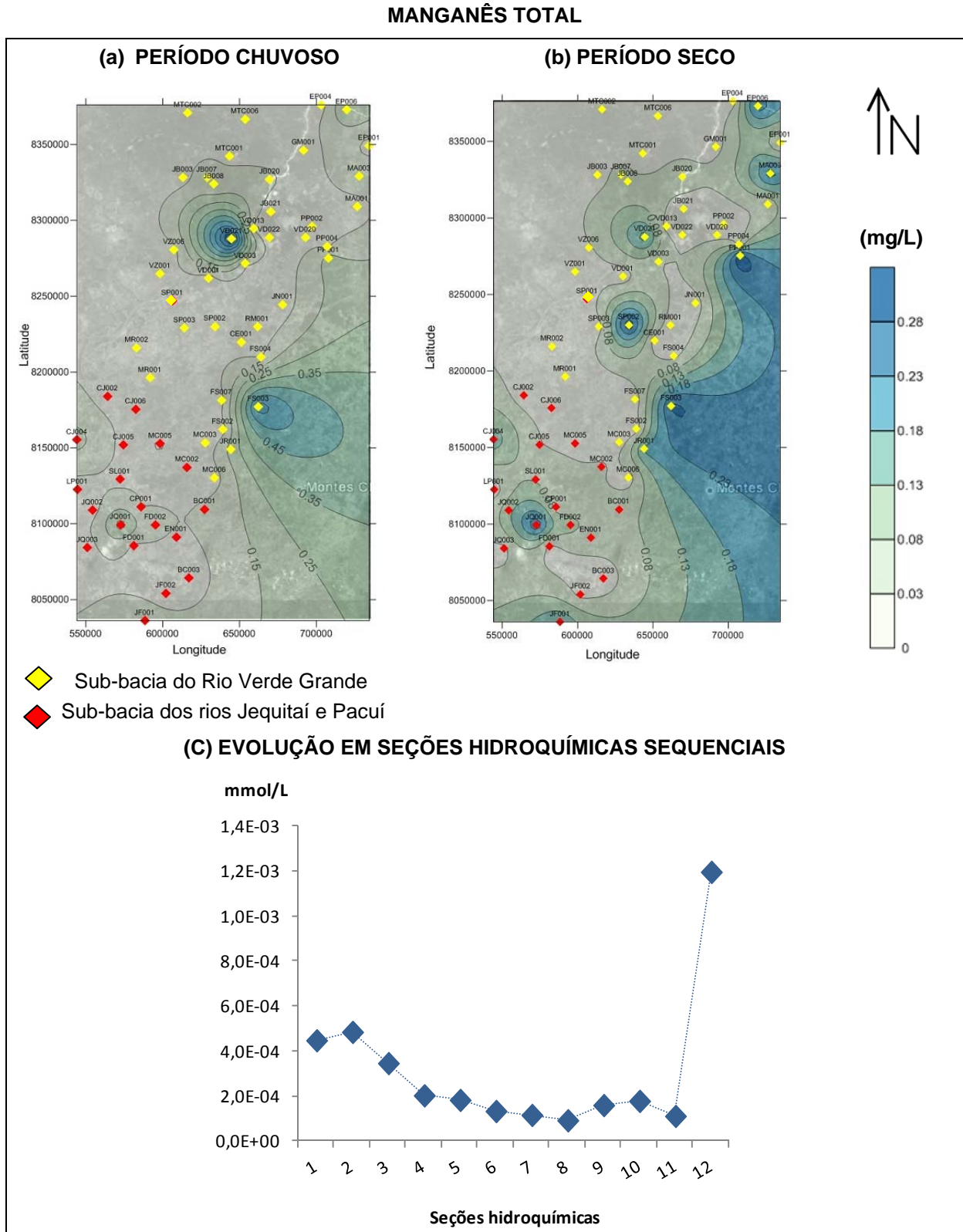


FIGURA C.5: Plumagens de isóteores do pH: (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos; e (c) evolução dos resultados (mediana) dos parâmetros físico-químicos monitorados em seções hidroquímicas sequenciais ao longo do fluxo predominante das águas subterrâneas na área de estudo.

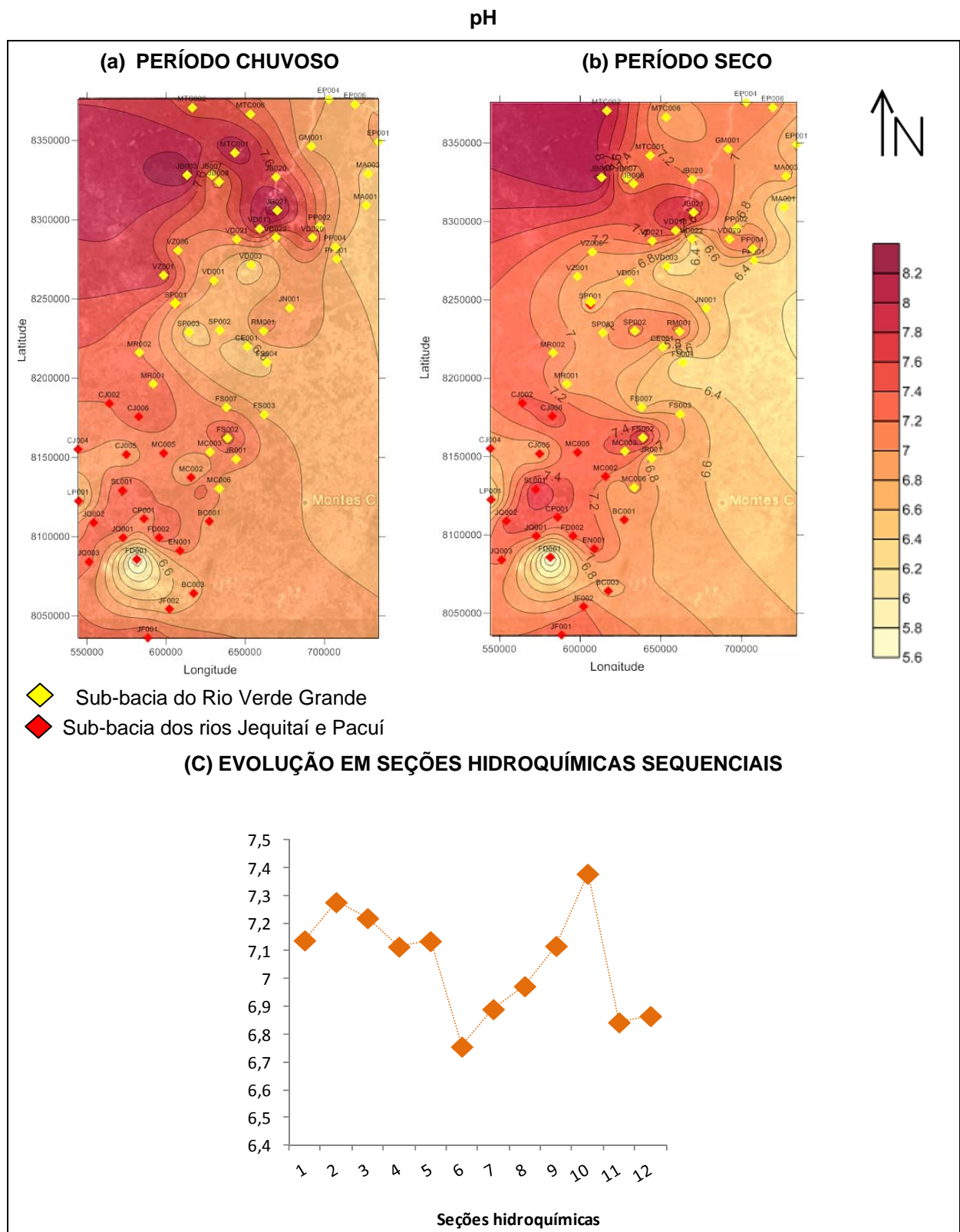


FIGURA C.6: Plumas de isoteores do fluoreto: (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos (mg/L); e (c) evolução dos resultados (medianas) dos parâmetros físico-químicos monitorados em seções hidroquímicas sequenciais ao longo do fluxo predominante das águas subterrâneas na área de estudo (mmol/L).

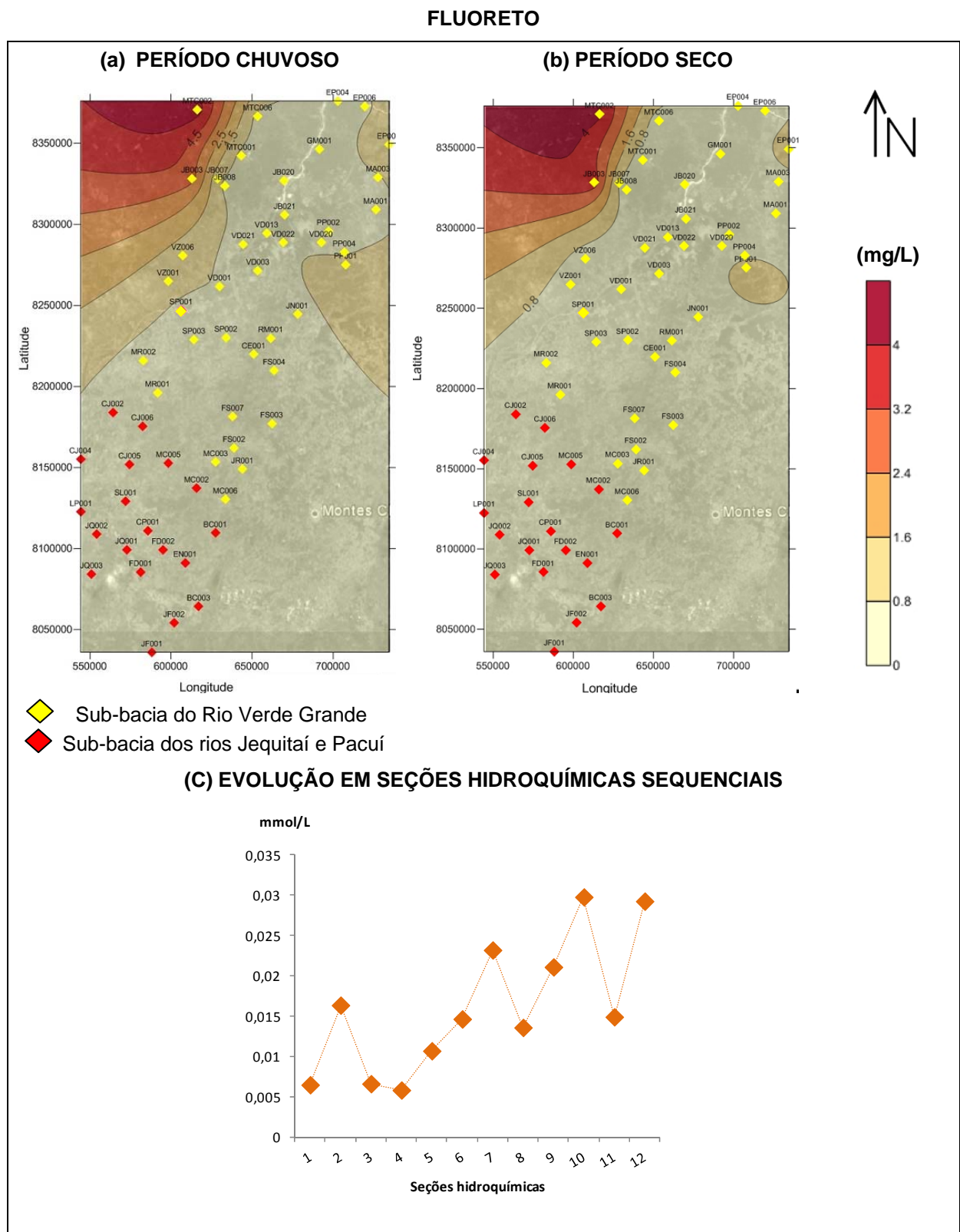


FIGURA C.7: Plumas de isotores do bário total: (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos (mg/L); e (c) evolução dos resultados (medianas) dos parâmetros físico-químicos monitorados em seções hidroquímicas sequenciais ao longo do fluxo predominante das águas subterrâneas na área de estudo (mmol/L).

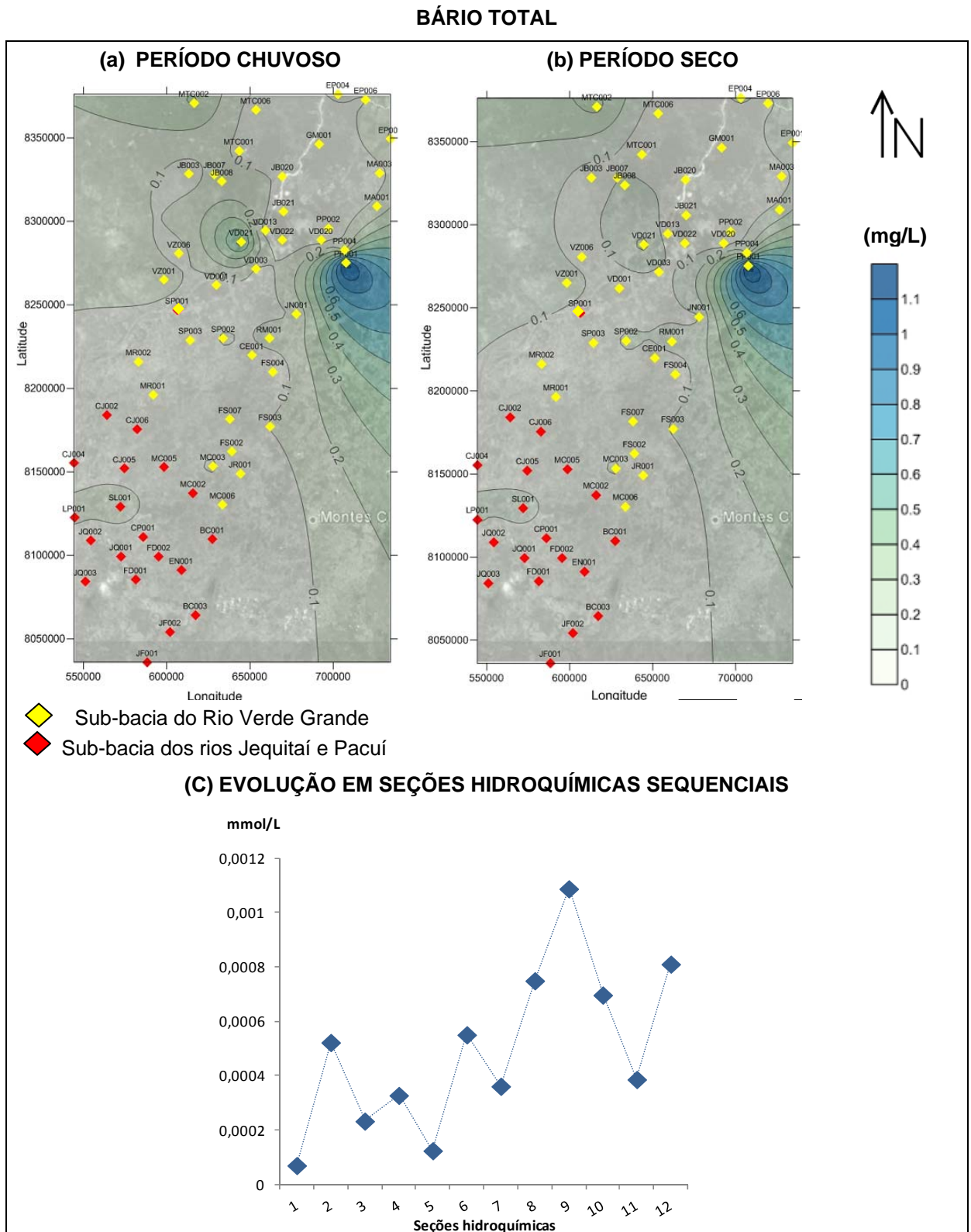


FIGURA C.8: Plumas de isotores do nitrato: (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos (mg/L); e (c) evolução dos resultados (medianas) dos parâmetros físico-químicos monitorados em seções hidroquímicas sequenciais ao longo do fluxo predominante das águas subterrâneas na área de estudo (mmol/L).

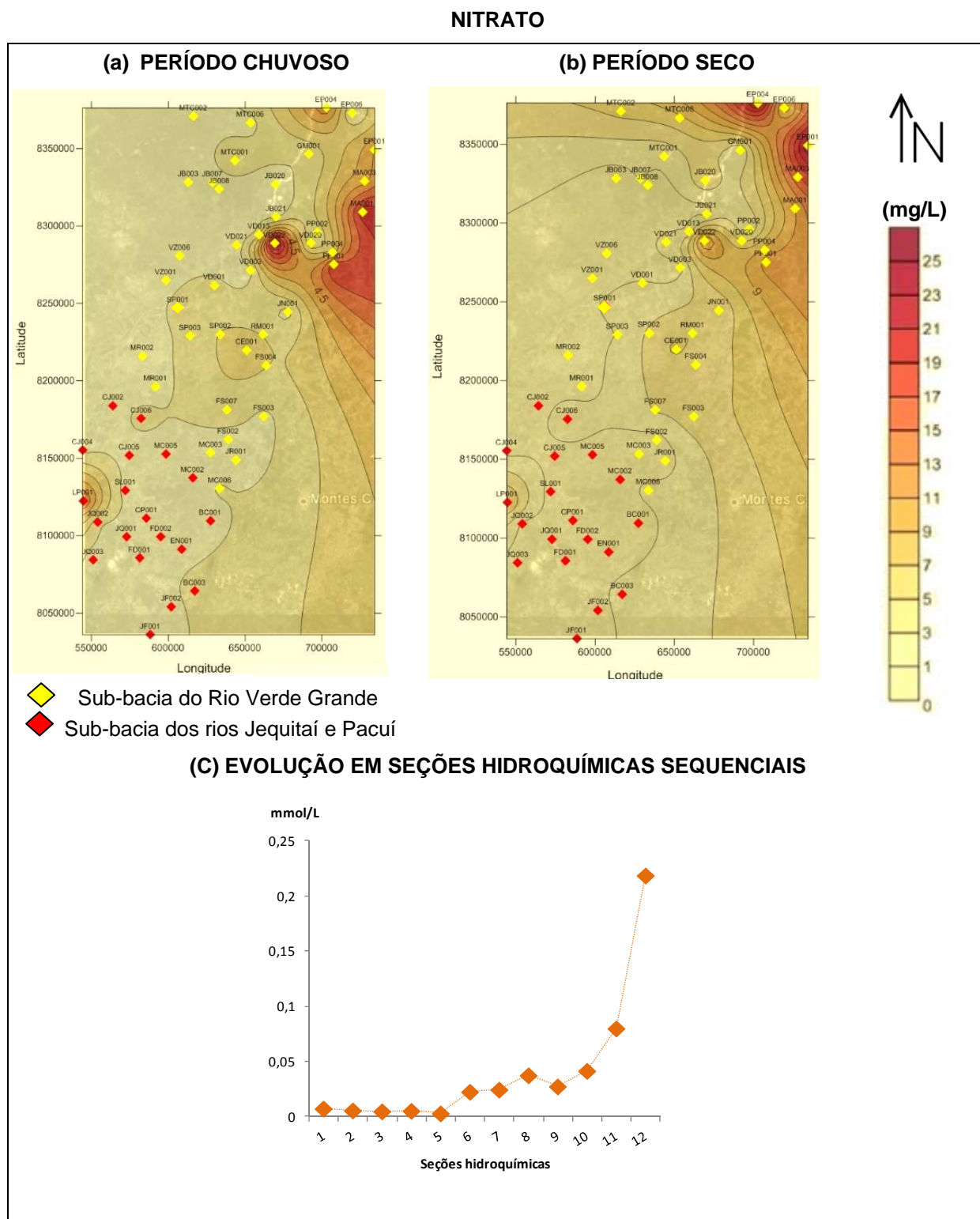


FIGURA C.9: Plumagens de isóteores do potássio dissolvido: (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos (mg/L); e (c) evolução dos resultados (mediana) dos parâmetros físico-químicos monitorados em seções hidroquímicas sequenciais ao longo do fluxo predominante das águas subterrâneas na área de estudo (mmol/L).

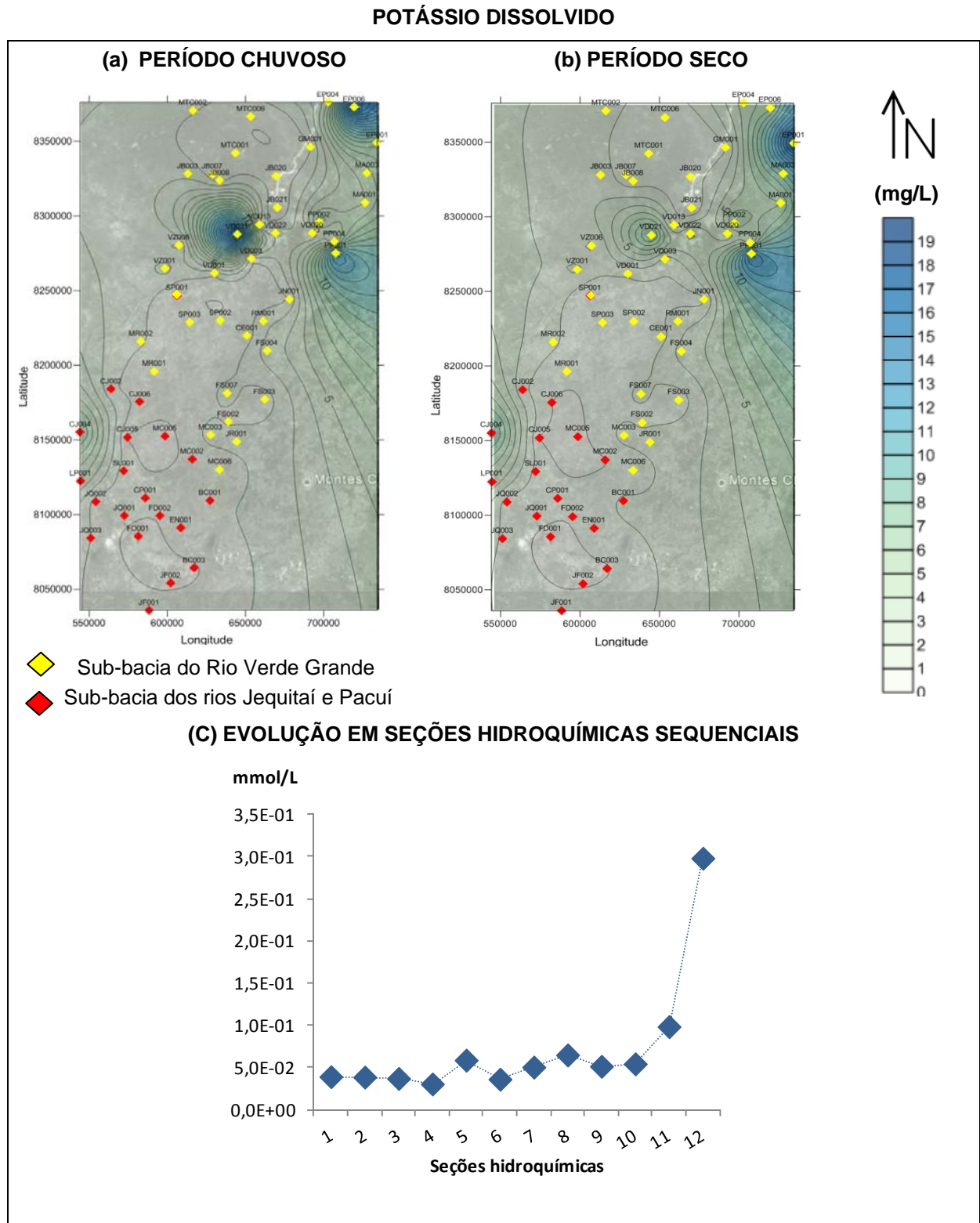


FIGURA C.10: Plumas de isoteores do ferro total: (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos (mg/L); e (c) evolução dos resultados (medianas) dos parâmetros físico-químicos monitorados em seções hidroquímicas sequenciais ao longo do fluxo predominante das águas subterrâneas na área de estudo (mmol/L).

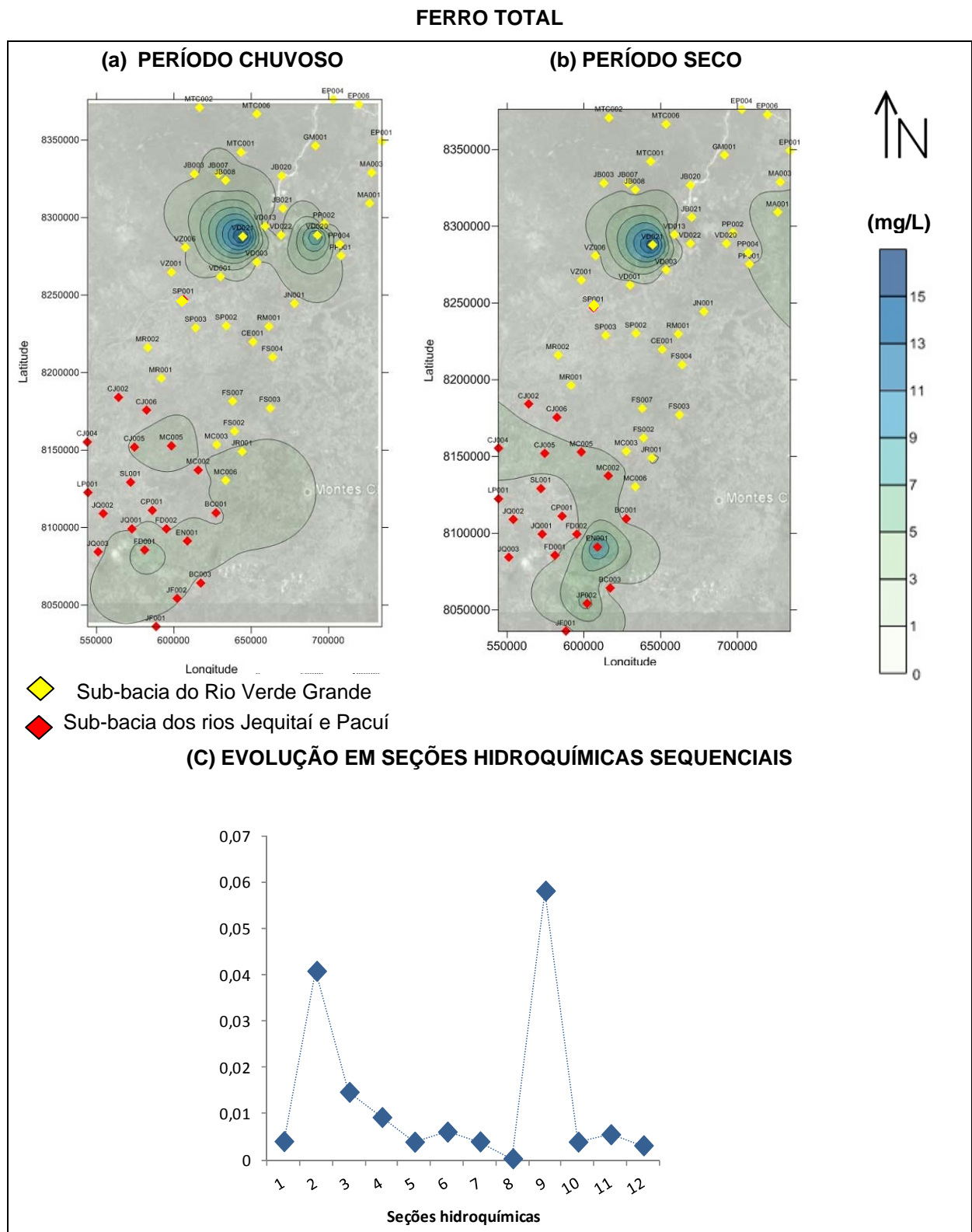


FIGURA C.11: Plumas de isotores do fósforo total: (a) períodos chuvosos e (b) períodos secos (mg/L); e (c) evolução dos resultados (medianas) dos parâmetros físico-químicos monitorados em seções hidroquímicas sequenciais ao longo do fluxo predominante das águas subterrâneas na área de estudo (mmol/L).

FÓSFORO TOTAL

