

# MONITORAMENTO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DE MINAS GERAIS



*GUARANI*

*2009 - 2011*

*BAMBUÍ*

*2005 - 2011*

GOVERNO DO ESTADO DE MINAS GERAIS

SISTEMA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS

## **REALIZAÇÃO:**

### **IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas**

**Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Monitoramento das Águas**  
Jeane Dantas de Carvalho

**Gerência de Monitoramento Hidrometeorológico**  
Wanderlene Ferreira Nacif, Química

**Coordenação do Monitoramento das Águas Subterrâneas**  
Maricene Menezes Oliveira M. Paixão

### **Equipe Técnica**

Geraldo João Araújo, Técnico Ambiental  
Maria Goretti Hausmann, Geóloga  
Maria do Carmo Fonte Boa Souza, Engenheira Química  
Maricene Paixão, Geóloga  
Matheus Duarte Santos, Geógrafo  
Nádia Antônia Pinheiro dos Santos, Geógrafa

Estagiários

Maria Eduarda Alves Ferreira Ramos, estudante de Geologia.

## **APOIO:**

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

APOIO:



EXECUÇÃO:



## **SEMAD - Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável**

Secretário

Adriano Magalhães

## **IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas**

Diretoria Geral

Marília Carvalho de Melo

Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Monitoramento das Águas

Jeane Dantas de Carvalho

Gerência de Monitoramento Hidrometeorológico

Wanderlene Ferreira Nacif, Química

Coordenação do Projeto Águas de Minas

Katiane Cristina de Brito Almeida, Bióloga

Coordenação do Monitoramento das Águas Subterrâneas

Maricene Menezes Oliveira M. Paixão

Ficha catalográfica elaborada pelo Núcleo de Documentação Ambiental

I59m Instituto Mineiro de Gestão das Águas.  
Monitoramento da qualidade das águas subterrâneas de Minas Gerais: Guarani e Bambuí / Instituto Mineiro de Gestão das Águas. --- Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2013.

155p. : mapas.

Relatório: Guarani 2009 - 2011

Bambuí 2005 - 2011

1. Monitoramento. 2. Qualidade da água. 3. Águas subterrâneas.  
I. Título.

CDU: 556.18:556.08



# **INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS**

Governo do Estado de Minas Gerais  
Sistema Estadual de Meio Ambiente  
Instituto Mineiro de Gestão das Águas

Monitoramento da Qualidade das Águas  
Subterrâneas de Minas Gerais:  
Guarani e Bambuí

**RELATÓRIO**

Guarani 2009 - 2011  
Bambuí 2005 - 2011

Belo Horizonte

Julho/2013

## Lista de Figuras

Figura 1: Ciclo de programa de monitoramento de águas subterrâneas. ....	3
Figura 2: Comparativo dos usos cadastrados e das outorgas de águas subterrâneas em MG: (a) distribuição espacial em MG extraída do cadastro de poços de produção - abastecimento público e doméstico do SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas do CPRM), até o ano de 2012; (b) distribuição espacial em MG dos poços com outorgas para uso de águas subterrâneas concedidas pelo IGAM até agosto de 2012. ....	7
Figura 3: Localização, em Minas Gerais, das UPGRH com águas subterrâneas monitoradas: sub-bacias do rio Verde Grande – SF10 (em rosa), do rio Pandeiros – SF9 (em alaranjado), sub-bacia dos rios Jequitai e Pacuí – SF6 (em amarelo), sub-bacia do baixo rio Paranaíba – PN3 (em verde) e sub-bacia do baixo rio Grande – GD8 (em azul). ....	9
Figura 4: Mapa com os poços de monitoramento de águas subterrâneas da rede mineira sobre os domínios hidrogeológicos aflorantes do Estado. ....	12
Figura 5: Parâmetros selecionados para as águas subterrâneas monitoradas no Estado. ...	18
Figura 6: Percentual da população urbana nos municípios de Minas Gerais, com destaque para os municípios que compõem as UPGRHs SF6, SF9 e SF10. ....	25
Figura 7: Mapa dos municípios da UPGRH SF6 (com destaque – em amarelo – para municípios em que há poços da rede de monitoramento do IGAM). Tabela com a população, território, densidade populacional e número de poços cadastrados no Siagas (até abril/2013), por município da UPGRH SF6. ....	27
Figura 8: Mapa dos municípios da UPGRH SF9 (com destaque – em amarelo – para municípios em que há poços da rede de monitoramento do IGAM). Tabela com a população, território, densidade populacional e número de poços cadastrados no Siagas (até abril/2013), por município da UPGRH SF9. ....	28
Figura 9: Mapa dos municípios da UPGRH SF10 (com destaque – em amarelo – para municípios em que há poços da rede de monitoramento do IGAM). Tabela com a população, território, densidade populacional e número de poços cadastrados no Siagas (até abril/2013), por município da UPGRH SF10. ....	29
Figura 10: Uso e ocupação do solo na região norte ilustrada a partir de estudo no alto Riachão em 2008 - proporção por categoria. ....	31
Figura 11: Normais climatológicas em Minas Gerais, com destaque para a região monitorada (período de 1961 a 1990). ....	33
Figura 12: Gráfico de pizza mostrando a distribuição percentual por área das classes (a) hipsométricas e (b) clinográficas da bacia do rio São Francisco. ....	34
Figura 13: Mapa do IBGE com destaque para as principais unidades morfoestruturais do relevo das sub-bacias do rio Jequitai e do rio Verde Grande. ....	35
Figura 14: Gráfico de barras mostrando a distribuição percentual, por área, das classes de solo, segundo classificação SiBCS (1999), no cerrado mineiro da bacia do rio São Francisco – área total de 208.146,7 km <sup>2</sup> . ....	36
Figura 15: Mapa de solos da região norte e nordeste de Minas Gerais, com destaque para a região de estudo. ....	37
Figura 16: Mapa de formações vegetais e biomas do estado de Minas Gerais, com destaque para a área monitorada. ....	39
Figura 17: Mapa simplificado do Cráton de São Francisco. ....	40

Figura 18: Mapa geológico simplificado de parte da região Norte de Minas.....	41
Figura 19: Coluna estratigráfica do Grupo Bambuí, incluindo Formação Carrancas. ....	42
Figura 20: Mapa de localização com as principais sedes municipais e cursos de água da SF6 – sub-bacia dos rios Jequitaí e Pacuí.....	48
Figura 21: Mapa de localização com as principais sedes municipais e cursos de água da SF9 – sub-bacia do rio Verde Grande.....	49
Figura 22: Mapa de localização com as principais sedes municipais e cursos de água da SF10 – sub-bacia do rio Verde Grande.....	50
Figura 23: Balanço hídrico Normal Mensal – estação de Jaíba – período de 1996 a 2006 – ETP – evapotranspiração potencial e ETR – evapotranspiração real.....	52
Figura 24: Mapa das cotas dos níveis estáticos em 33 poços medidos em períodos chuvosos (campanhas de 2010 a 2012) – por interpolação simples esférica – as setas sobre o mapa indicam os prováveis fluxos regionais em função de gradientes hidráulicos localizados.....	54
Figura 25: 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 monitorada.....	55
Figura 26: Percentuais relativos das vazões outorgadas até o ano de 2012 para uso de águas subterrâneas nas UPGRH SF6, SF9 e SF10, no norte de Minas – vazões outorgadas para uso consuntivo.....	56
Figura 27: Percentuais das águas classificadas de acordo com o grau relativo de dureza. .	60
Figura 28: Diagrama trilinear de Piper para as medianas das concentrações iônicas nos poços monitorados nas sub-bacias SF6, SF9 e SF10, no período de 2005 a 2011. ....	61
Figura 29: Percentuais de violação em relação ao total de medições realizadas, para cada poço, frente aos parâmetros da água para consumo humano: (a) padrões associados a risco à saúde e (b) padrões organolépticos (que alteram sabor ou odor da água). ....	63
Figura 30: Percentuais de violação em relação ao total de medições realizadas, para cada poço, frente aos parâmetros da água para: (a) dessedentação humana; (b) irrigação; (c) recreação.....	64
Figura 31: Gráficos de série temporal mostrando os resultados obtidos em cada poço de monitoramento em que houve violação a limite legal de consumo humano para o nitrato – período 2005-2011. ....	66
Figura 32: Gráficos de série temporal mostrando os resultados obtidos em cada poço de monitoramento em que houve violação a limite legal de consumo humano para os fenóis – período 2005-2011. ....	68
Figura 33: Gráficos de série temporal mostrando os resultados obtidos em cada poço de monitoramento em que houve violação a limite legal de consumo humano para fluoreto – período 2005-2011 – sobre mapa de domínios hidrogeológicos. ....	70
Figura 34: Gráficos de série temporal mostrando os resultados obtidos em cada poço de monitoramento em que houve violação a limite legal de consumo humano para bário, arsênio, selênio e zinco – período 2005-2011 – sobre mapa de domínios hidrogeológicos. ....	72
Figura 35: Gráficos de série temporal para os valores medidos de concentração de chumbo – mg/L – nas águas de alguns poços monitorados: (a) de 2005 a 2006 e de 2010 a 2011, e (b) de 2007 a 2011. ....	77
Figura 36: Gráfico de barras mostrando a frequência de violações, por parâmetro monitorado e que apresentou violação, nas sub-bacias SF6, SF9 e SF10, no Norte de Minas para o período 2010-2011.....	79

Figura 37: Rede de monitoramento nas sub-bacias SF6, SF9 e SF10 (no Norte de Minas); seus principais sistemas aquíferos aflorantes; e a respectiva ocorrência de violação de padrões legais relacionados a consumo humano e associados a risco à saúde, segundo a Portaria de Potabilidade (Nº 2914-2011 do Ministério da Saúde), por poço da atual configuração da rede de monitoramento (60 poços), no período 2005-2011. ....	80
Figura 38: 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. ....	83
Figura 39: Abrangência do sistema aquífero Guarani. ....	86
Figura 40: Números da economia do Triângulo Mineiro: (a) Percentual de geração de renda por setor econômico na região e (b) Percentual de contribuição da região para o agregado do Estado. ....	87
Figura 41: Mapa climático da Mesorregião Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, modelo de Köppen. ....	88
Figura 42: Evolução tectônica da província sedimentar meridional, incluindo a bacia do Paraná, associada aos tipos básicos de tectônica formadora da bacia.....	90
Figura 43: Recorte do mapa geológico de Minas Gerais.....	91
Figura 44: Mapa esquemático do sistema aquífero Guarani, mostrando áreas de afloramento, descarga e recarga, e com destaque para a região de ocorrência deste sistema em Minas Gerais.....	94
Figura 45: Percentual de vazões outorgadas para as águas subterrâneas na região do Triângulo mineiro, excluídos os usos não consuntivos.....	95
Figura 46: Mapa de localização dos municípios integrantes do monitoramento do aquífero Guarani, no Triângulo Mineiro.....	96
Figura 47: Fotografia ilustrando a amostragem em um dos poços profundos no aquífero Guarani, e detalhe da sonda multiparamétrica empregada nas medições em campo.....	97
Figura 48: Mapa hidrogeoquímico do sistema aquífero Guarani, modificado de Organização dos Estados Americanos, Aquífero Guarani: Programa Estratégico de Ações – PEA.....	98
Figura 49: Rede de monitoramento no aquífero Guarani no Triângulo Mineiro; principais aquíferos aflorantes na área; e a respectiva ocorrência de violação a padrões legais relacionados a consumo humano e associados a risco à saúde, segundo a Portaria de Potabilidade (nº 2914-2011) do Ministério da Saúde, por poço.....	102
Figura 50: Corte mostrando três aquíferos sobrepostos – livre e confinados e detalhe mostrando zonas insaturada e saturada e a distribuição vertical da água.....	126
Figura 51: Representação das configurações predominantes rochas-grãos e os interstícios ocupados pelas águas subterrâneas para os diferentes tipos de aquíferos. ....	127
Figura 52: Distribuição percentual da água doce, bem como das águas subterrâneas e superficiais, mundialmente. Não estão incluídos: umidade e vapor d água, nem a água retida pelos organismos vivos.....	127
Figura 53: Corte mostrando: dois aquíferos sobrepostos – livre e sua superfície freática e confinado e sua superfície potenciométrica; além de exemplos de poços raso, profundo e jorrante (este último, cuja característica é apresentar o topo em nível inferior à superfície potenciométrica). ....	128
Figura 54: Principais tipos de reações que ocorrem naturalmente nas águas subterrâneas pela interação com o ar, o solo, e as rochas.....	129
Figura 55: Exemplo de reações ácido base: esquema ilustrativo do equilíbrio químico do sistema carbonato. ....	130

Figura 56: Exemplo de variações hidrogeoquímicas em um aquífero: o pH aumenta com a profundidade e a composição da água varia – <i>diagramas de Piper</i> . .....	131
Figura 57: Diagramas esquemáticos de Alcalinidade Total (T) e à Fenolftaleína (F) – (a); e das situações de alcalinidade possíveis – (b). .....	136
Figura 58: Um diagrama simplificado pE X pH para Ferro na água (concentração total máxima de ferro solúvel de $1,0 \times 10^{-5}$ M). .....	139
Figura 59: Diagrama de Wilcox. ....	146
Figura 60: Diagrama de <i>Piper</i> ou trilinear aplicado para comparar e para classificar diferentes grupos de águas naturais. ....	148
Figura 61: Desenho esquemático com as principais fontes de poluição antrópica das águas subterrâneas. ....	150

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Principais características do monitoramento – região Norte (onde predomina o aquífero Bambuí) e aquífero Guarani, no Estado de Minas Gerais. ....	11
Tabela 2: Principais características dos poços da atual configuração da rede de monitoramento – região Norte (onde predomina o aquífero Bambuí), no Estado de Minas Gerais. ....	13
Tabela 3: Principais características dos poços da atual configuração da rede de monitoramento – região do Triângulo Mineiro - Aquífero Guarani, no Estado de Minas Gerais. ....	17
Tabela 4: Método analítico – nome do método e respectiva norma de referência – e os limites de quantificação aplicados no decorrer do monitoramento, para cada parâmetro monitorado nas águas subterrâneas de MG. ....	21
Tabela 5: Resumo das características dos sistemas aquíferos nas UPGRHs SF-6, SF9 e SF-10, conforme “Caracterização Hidrogeológica da Porção Mineira da Bacia do São Francisco” (Adaptado de PINTO, C.P. & MARTINS-NETO, 2001). ....	45
Tabela 6: Município, UPGRH correspondente, código do poço, nível estático (em m) medido em relação ao nível do mar e coordenadas geográficas correspondentes. ....	53
Tabela 7 – Síntese dos resultados de qualidade das águas subterrâneas – estatística descritiva – para os Aquíferos das UPGRH SF6, SF9 e SF10 – região Norte de Minas no período de 2005 a 2011. ....	59
Tabela 8: Resultados do 3º quartil para as águas subterrâneas nas UPGRH SF6, SF9 e SF10 – para os parâmetros selecionados: no período 2005-2011 (todo o monitoramento abordado) e para cada uma das fases com mesma configuração da rede de monitoramento: 2005-2006, 2007-2009 e 2010-2011. ....	85
Tabela 9: Unidades estratigráficas do Triângulo Mineiro e sistemas aquíferos. ....	92
Tabela 10: Poços de monitoramento do sistema aquífero Guarani – SAG, com respectivos códigos, identificações do tipo de poço, municípios, localidades e usos. ....	97
Tabela 11: Divisão hidroquímica do aquífero Guarani - analogia com as estações monitoradas no estudo do Programa Estratégico de Ação – PEA. ....	100
Tabela 12: Classes de áreas de proteção de aquíferos ....	117
Tabela 13: Obrigações estabelecidas para usuários de águas subterrâneas e poluidores, segundo as Leis Federais nº 13.771/2000 e nº 15.056/2004. ....	118
Tabela 14: Vedações e infrações relacionadas às águas subterrâneas, segundo a Lei nº 13.771/2000. ....	119
Tabela 15: Principais aspectos das Resoluções CNRH acerca do monitoramento das águas subterrâneas. ....	121
Tabela 16: Graus de dureza da água por faixa de concentração de Cálcio e de Magnésio expressos em mg/L de CaCO <sub>3</sub> . ....	134
Tabela 17: Cálculo dos componentes da alcalinidade. ....	136
Tabela 18: Doenças associadas à qualidade da água. ....	149

## Sumário

INTRODUÇÃO .....	1
CAPÍTULO I – REDES DE MONITORAMENTO NO ESTADO, PARÂMETROS, ANÁLISES E TRATAMENTO DOS DADOS .....	10
REDES DE MONITORAMENTO .....	10
PARÂMETROS MONITORADOS .....	18
ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS.....	20
TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS RESULTADOS.....	24
CAPÍTULO II – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO NORTE DE MINAS - SUB-BACIAS SF6, SF9 E SF10 ....	25
MUNICÍPIOS, POPULAÇÃO E OCUPAÇÃO.....	25
PERCENTUAL DE OCUPAÇÃO .....	30
ASPECTOS FISIAGRÁFICOS .....	31
CLIMA .....	31
RELEVO .....	34
PEDOLOGIA.....	35
BIOMAS .....	38
GEOLOGIA/HIDROGEOLOGIA .....	40
ASPECTOS HIDROLÓGICOS E HIDROGRÁFICOS .....	46
USOS DA ÁGUA.....	55
CAPÍTULO III – QUALIDADE DO AQUIFERO NAS SUB-BACIAS SF6, SF9 E SF10 NO NORTE DE MINAS ..	57
ATENDIMENTO A LIMITES LEGAIS PARA DIFERENTES USOS DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NAS UPGRH SF6, SF9 E SF10 .....	62
RESUMO DOS PARÂMETROS QUE VIOLARAM PADRÕES DE POTABILIDADE NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NAS UPGRH SF6, SF9 E SF10 .....	78
EVOLUÇÃO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO NORTE DE MINAS - UPGRH SF6, SF9 E SF10 – PERÍODO 2005-2011 .....	84
CAPÍTULO IV – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE OCORRÊNCIA DO AQUIFERO GUARANI EM MG – TRIÂNGULO MINEIRO .....	86
ASPECTOS SÓCIO-ECONÔMICOS.....	87
CLIMA .....	88
ASPECTOS GEOLÓGICOS E HIDROGEOLÓGICOS.....	89
USOS DA ÁGUA SUBTERRÂNEA.....	94
CAPÍTULO V – MONITORAMENTO DO AQUIFERO GUARANI EM MINAS GERAIS.....	96
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	103

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	105
APÊNDICE I - ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: ASPECTOS LEGAIS .....	114
LEGISLAÇÃO FEDERAL .....	114
LEGISLAÇÃO ESTADUAL.....	116
LEI Nº 13.771 DE 11 DE DEZEMBRO DE 2000.....	116
APÊNDICE II - ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: ASPECTOS TEÓRICOS .....	126
QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA .....	129
PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	132
Constituintes Iônicos.....	140
Classificação das Águas .....	148
Água e Saúde .....	149
IMPACTOS ANTRÓPICOS .....	149

## INTRODUÇÃO

No Estado de Minas Gerais, a gestão das águas subterrâneas, visando à manutenção da sua qualidade, perpassa por diversas ações desenvolvidas pelo Sistema Estadual do Meio Ambiente (Sisema), as quais são de responsabilidade do IGAM e dos demais órgãos que compõem o Sistema, e que incluem:

- Licenciamento ambiental.
- Fiscalização de fontes potenciais de poluição.
- Monitoramento da qualidade das águas superficiais e subterrâneas.
- Planos de recursos hídricos.
- Outorga de uso de recursos hídricos.
- Cobrança pelo uso da água.
- Zoneamento ecológico-econômico.
- Projetos de caracterização de aquíferos.

A rede mineira de monitoramento das águas subterrâneas tem como objetivo principal a análise qualitativa dos recursos hídricos subterrâneos em seus aspectos de variação espacial e temporal. O monitoramento permite a caracterização e a avaliação das condições de qualidade, de forma a assegurar o uso adequado dessas águas e também fornece subsídios para ações de prevenção e controle da poluição, assim como permitirá a implementação de outros instrumentos de gestão de recursos hídricos, tal como o estabelecimento de *background* (valores de fundo naturais) e o enquadramento para as águas subterrâneas.

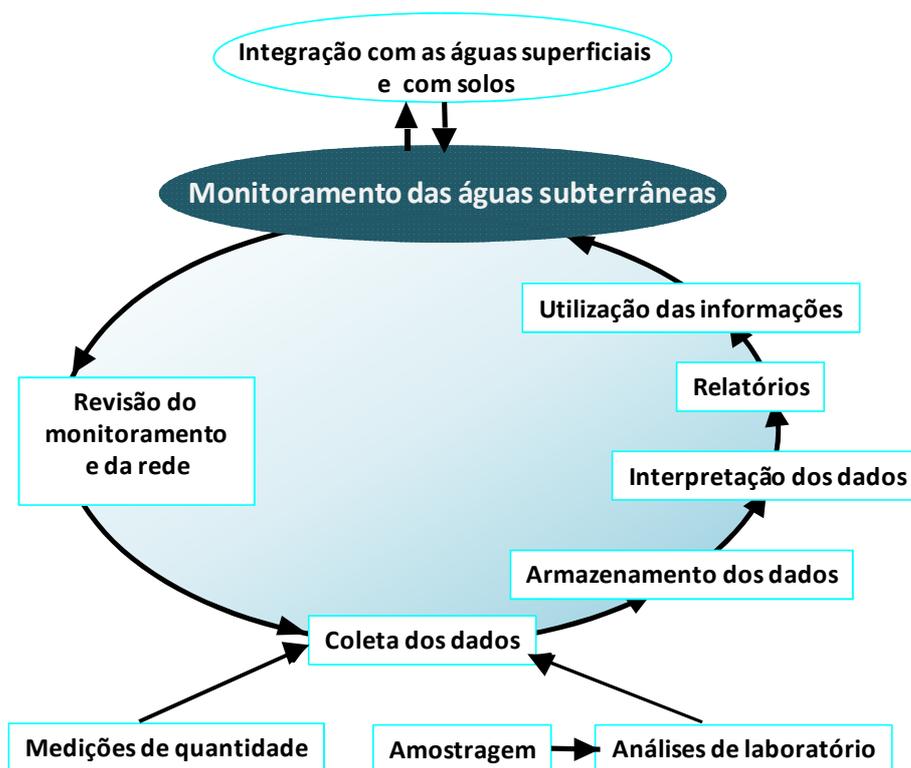
O IGAM executa este monitoramento por meio da Rede Estadual de Monitoramento de Qualidade de Águas Subterrâneas. Dentre os objetivos do monitoramento, estão:

- Obter dados sobre as águas subterrâneas com abrangência e duração adequadas ao acompanhamento de possíveis alterações espaciais e temporais na qualidade e quantidade destas águas, apontando inclusive possíveis tendências de aumento na concentração de poluentes em determinadas áreas.
- Ampliar a base de conhecimento hidrogeológico dos aquíferos, visando inclusive à classificação, determinação de valores orientadores ou de *background* e enquadramento das águas.
- Gerar série histórica de informações essenciais ao estabelecimento de políticas de exploração.
- Subsidiar a gestão integrada de recursos hídricos, bem como as estratégias, as ações preventivas e políticas de uso, proteção e conservação destes recursos.
- Assegurar a continuidade do abastecimento em quantidade e qualidade adequadas.
- 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.
- Acompanhar a eficácia das medidas de proteção da qualidade da água.

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.

A seguir, um esquema do ciclo de um programa de monitoramento de águas do subsolo (Figura 1):

**Figura 1:** Ciclo de programa de monitoramento de águas subterrâneas.



Fonte: Adaptado de European Communities, 2007.

De acordo com Vrba (2006), uma rede de monitoramento eficiente é desenvolvida com aporte de diversas informações, dentre elas:

- Especificação da área a ser monitorada para a definição da escala de trabalho.
- Identificação e realização do inventário das fontes potenciais de contaminação.
- Densidade das estações de monitoramento (poços e fontes) e desenho da rede de monitoramento.
- Modelo conceitual do sistema hidrogeológico (geologia e estrutura hidrogeológica, propriedades físicas e químicas das águas subterrâneas, fluxo das águas e condições de contorno).
- Determinação de um Programa de Qualidade.

- Elaboração e gerenciamento do banco de dados.
- Avaliação dos dados para otimização do sistema de monitoramento.

Há uma preocupação crescente com a proteção dos aquíferos, em função do papel desempenhado pelos mesmos que, além de importantes fontes de abastecimento, são responsáveis pela manutenção do fluxo, da qualidade e da ecologia das águas de superfície e vice-versa. Daí a necessidade de monitorar as águas subterrâneas, acompanhando sua evolução temporal e espacial, o que permite seu gerenciamento eficaz.

As redes de monitoramento são classificadas da seguinte forma:

- Primárias: têm escala nacional e as amostragens e análises dos dados objetivam fornecer valores de referência e de *background* para os demais tipos de monitoramento. Os pontos de monitoramento são selecionados de forma a representar as condições naturais das águas subterrâneas, sem interferência de possíveis flutuações de curto prazo causadas pela atividade humana. Este nível de monitoramento visa medir a resposta natural dos aquíferos às condições de longo prazo para ser usado no planejamento de recursos e para fins de gestão.
- Secundárias: de caráter regional ou para avaliar o comportamento geral da água subterrânea em condições de impactos ambientais, ou seja, avaliar as tendências resultantes de modificações no uso do solo, variações climáticas, processos de recarga, fluxos e contaminação difusa. O objetivo do monitoramento a partir de redes secundárias é de fornecer subsídios à gestão e ao controle dos usos do recurso, incluindo cuidados com recursos estratégicos – mananciais de abastecimento público – e diretrizes para fiscalizações. Neste caso, deve ser feito o monitoramento de quantidade e de qualidade;
- Terciárias: As redes terciárias têm o caráter local e relaciona-se ao monitoramento de águas subterrâneas potencial ou efetivamente sujeitas a impactos causados por fontes de poluição pontuais. Também pode ser utilizada quando, em função de componentes tais como local de recarga ou interfluxo com águas superficiais, deseja-se obter conhecimentos específicos.

Em nível nacional, o monitoramento das águas subterrâneas viabilizou-se através do Programa Nacional de Águas Subterrâneas (PNAS) que integra o Plano Nacional de Recursos Hídricos – PNRH (2006), o qual também contempla o subprograma de *Ampliação do Conhecimento Hidrogeológico Básico*, bem como a linha de ação do *Monitoramento Quali-quantitativo das Águas Subterrâneas*. O objetivo principal do desenvolvimento da rede nacional de monitoramento é ampliar e consolidar os conhecimentos hidrogeológicos básicos, desenvolver ferramentas de gestão das águas subterrâneas no país, bem como formular políticas públicas de águas subterrâneas, compatibilizadas com as políticas de recursos hídricos nacional, estaduais, e setoriais com a participação dos municípios e da sociedade.

A rede de Minas Gerais tem os mesmos objetivos da rede nacional, porém no âmbito do Estado, e foi concebida para ser rede secundária com alguns pontos com características de classe primária. Busca-se, inclusive, a avaliação da qualidade da água bruta utilizada para abastecimento público, e também para outros usos. Atualmente a rede estadual tem duas vertentes:

- O monitoramento das águas subterrâneas no Norte de Minas Gerais – região do semiárido que abrange três sub-bacias hidrográficas da bacia do rio São Francisco – a sub-bacia do rio Verde Grande (UPGRH\* SF10), a sub-bacia dos rios Jequitaí e Pacuí (UPGRH SF6) e a sub-bacia do rio Pandeiros (UPGRH SF9). Nesta região de monitoramento, há predomínio do aquífero Bambuí, do tipo cárstico, cárstico-fissurado e fissurado, com prevalência duas primeiras feições hidrogeológicas. Na UPGRH SF9, o monitoramento é, atualmente, de pequena extensão, estando concentrado na porção leste, com apenas dois pontos na margem direita do rio São Francisco.
- O monitoramento das águas subterrâneas dos aquíferos Bauru e Guarani no Triângulo Mineiro – bacias hidrográficas dos rios Paranaíba e Grande.

\* UPGRH – Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos

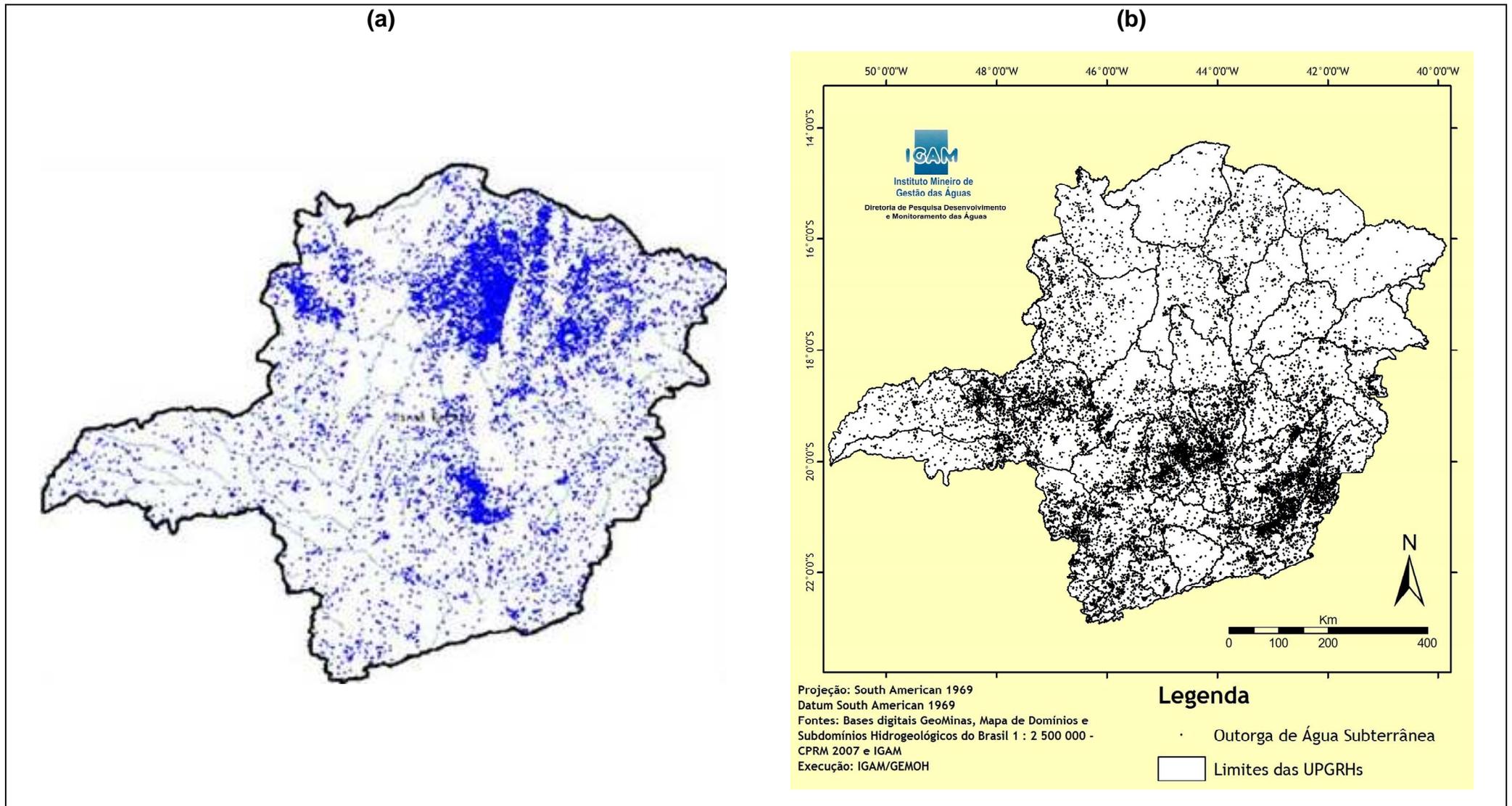
O monitoramento da qualidade das águas subterrâneas vem sendo executado pelo IGAM desde 2005, o qual se iniciou no norte do Estado (bacia do rio São Francisco), no âmbito das seguintes sub-bacias: SF6 – rios Jequitai e Pacuí, SF9 - rio Pandeiros e SF10 – rio Verde Grande. Este monitoramento viabilizou-se por meio de um convênio firmado com a Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba – CODEVASF, e é operada pelo IGAM. O monitoramento das águas subterrâneas no Norte de Minas foi priorizado, historicamente, em função de:

- Relativa fragilidade ambiental motivada pela baixa disponibilidade hídrica superficial, associada a intenso uso das águas subterrâneas em atividades como a irrigação (com elevada taxa de exploração e potencial risco de contaminação dos recursos hídricos por agrotóxicos).
- Vulnerabilidade natural dos sistemas aquíferos cársticos.
- Falta de esgotamento sanitário apropriado nas áreas urbanizadas.
- Conflitos de uso das águas, que já se configuram nesta região em função dos aspectos mencionados anteriormente, bem como algumas restrições a determinados usos impostos pelo Poder Público – sub-bacia do rio Riachão na UPGRH SF6.

O uso mais intenso do recurso hídrico subterrâneo nesta região é ilustrado na Figura 2. A referida figura apresenta dois mapas: um de 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 – Figura 2 (a); e outro de outorgas de uso de águas subterrâneas concedidas pelo IGAM até agosto de 2012 – Figura 2 (b). A partir da figura citada é possível comparar uso e outorga para as águas subterrâneas no Estado, ainda que com algumas defasagens, já que o número de poços cadastrados e também os outorgados, provavelmente, não corresponde ao número total de poços existentes e em operação.

No caso da região norte do Estado, a CPRM desenvolveu um trabalho de levantamento de poços para o cadastro, em campo, de forma detalhada, o que explica, em parte, as diferenças observadas entre os mapas dos cadastros de poços e de outorgas, nesta região. Portanto, para as UPGRH em questão – SF6, SF9 e SF10, o cadastro de poços é mais representativo da realidade, ou seja, contempla muito mais poços, em relação ao número de poços atualmente outorgados.

**Figura 2:** Comparativo dos usos cadastrados e das outorgas de águas subterrâneas em MG: (a) distribuição espacial em MG extraída do cadastro de poços de produção - abastecimento público e doméstico do SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas do CPRM), até o ano de 2012; (b) distribuição espacial em MG dos poços com outorgas para uso de águas subterrâneas concedidas pelo IGAM até agosto de 2012.



Fonte: SIAGAS, 2012; SIAM, 2012.

A partir de 2009, o IGAM implantou pontos de monitoramento na área confinada do aquífero Guarani em Minas Gerais, adotando, assim, ações do PEA – Programa Estratégico de Ações produzido pelo Projeto Aquífero Guarani. São quatro poços profundos empregados no monitoramento, no âmbito do Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani (Projeto Aquífero Guarani ou Projeto SAG), operados pelo IGAM.

Em 2011, também no Triângulo Mineiro, iniciou-se, em oito poços, o monitoramento das águas do aquífero Bauru. Hoje, a rede foi ampliada para 16 poços profundos operados, conjuntamente, pela CPRM e pelo IGAM.

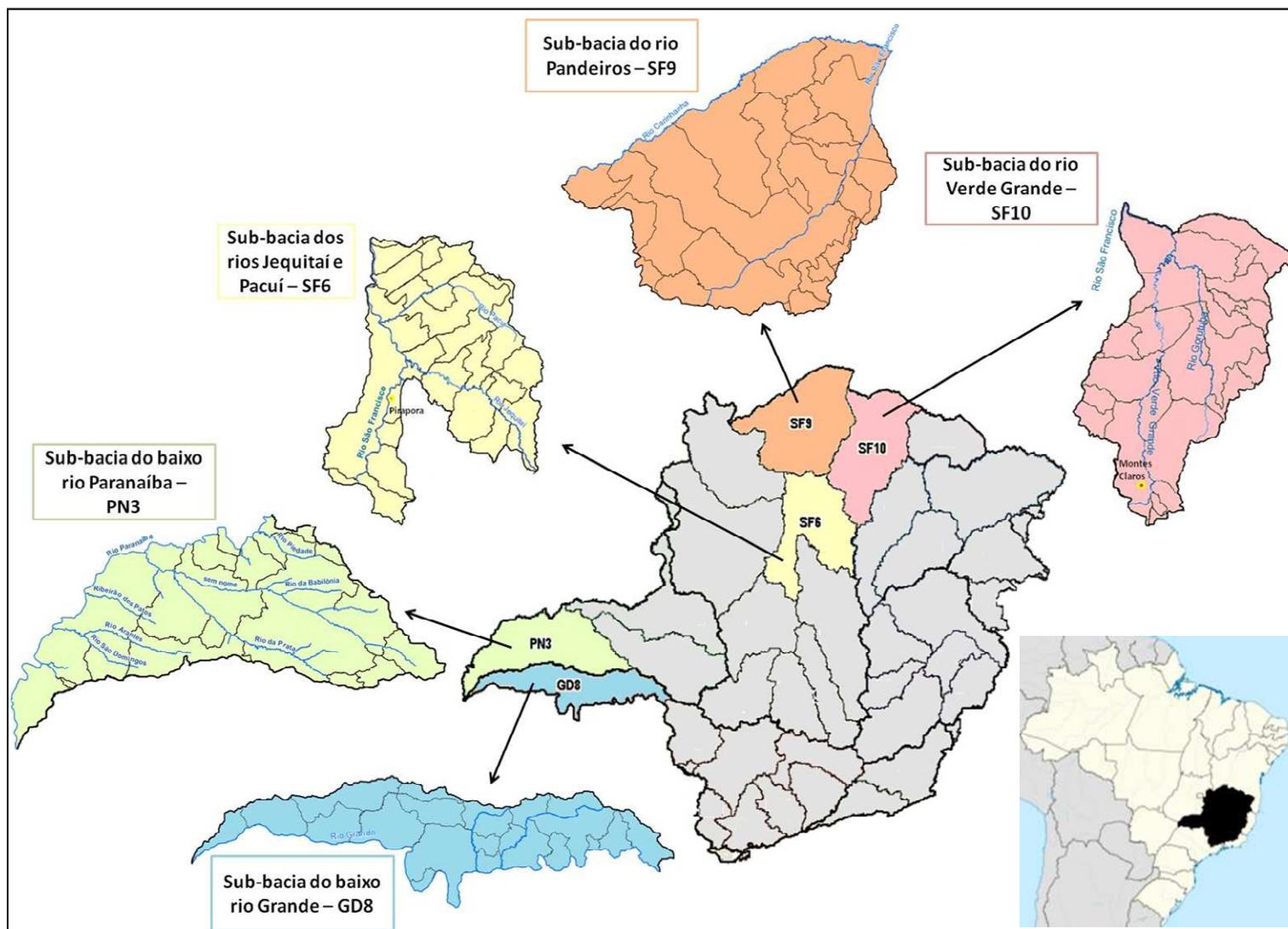
O IGAM vem buscando ampliar a rede de monitoramento das águas subterrâneas por meio de parcerias e convênios, inclusive com instituições públicas federais, vislumbrando, no futuro, cobrir todo o Estado, em face da importância de se conhecer para gerir este relevante recurso hídrico. Neste sentido, vem inserindo novos pontos de monitoramento – caso da bacia do rio das Velhas, em fase de delineamento da rede. Todavia, ainda não se dispõe de resultados de medições nestas novas frentes.

Na Figura 3, são mostradas as localizações das sub-bacias ou UPGRH monitoradas, no Estado, atualmente.

O presente relatório aborda, de forma mais detalhada, os resultados do monitoramento das águas subterrâneas no Norte de Minas, em função da existência de maior número de dados, já que os aquíferos no Triângulo Mineiro ainda não possuem uma série histórica representativa e adequada para uma análise mais aprofundada dos dados de monitoramento das águas subterrâneas.

Assim, o monitoramento no aquífero Guarani foi abordado em um dos capítulos, no que diz respeito a: identificação dos poços e respectivos usos da água, identificação das fácies e zona hidroquímica do aquífero em Minas Gerais, comparação da hidroquímica dos poços monitorados com levantamento do Projeto SAG, e verificação da violação dos resultados obtidos em relação a padrões estabelecidos para o consumo humano.

**Figura 3:** Localização, em Minas Gerais, das UPGRH com águas subterrâneas monitoradas: sub-bacias do rio Verde Grande – SF10 (em rosa), do rio Pandeiros – SF9 (em alaranjado), sub-bacia dos rios Jequitai e Pacuí – SF6 (em amarelo), sub-bacia do baixo rio Paranaíba – PN3 (em verde) e sub-bacia do baixo rio Grande – GD8 (em azul).



Fonte: adaptado de IGAM, 2013.

# **CAPÍTULO I – REDES DE MONITORAMENTO NO ESTADO, PARÂMETROS, ANÁLISES E TRATAMENTO DOS DADOS**

## **REDES DE MONITORAMENTO**

A primeira rede de monitoramento de qualidade das águas subterrâneas é operada desde 2005 na mesorregião do Norte de Minas, em que há predominância do aquífero Bambuí. Esta rede foi priorizada, em um primeiro momento, dentre outros aspectos, em função do uso mais intenso dos recursos hídricos subterrâneos na região. A partir de 2009, o IGAM implantou quatro pontos de monitoramento na área confinada do aquífero Guarani em Minas Gerais, adotando, assim, ações do PEA – Programa Estratégico de Ações produzido pelo Projeto Aquífero Guarani. Mais recentemente, foram implantados 16 poços de monitoramento no aquífero Bauru, cujos resultados serão abordados futuramente, tendo em vista a necessidade de maior número de dados para a análise adequada dos resultados.

A rede no Norte de Minas iniciou-se com 39 poços tubulares, nas sub-bacias dos rios Verdes Grande, Riachão e Jequitai e na sub-bacia do rio Pandeiros (porção leste). Em 2007, objetivando aperfeiçoar a rede piloto e promover o monitoramento da água subterrânea em região com grande ocorrência de flúor, a rede passou por reformulação e passou a abranger os municípios de Jaíba, Varzelândia e Verdelândia. A partir deste monitoramento, foi desenvolvido o projeto de mapeamento da vulnerabilidade do aquífero na área. Em 2010, foi possível ampliar novamente a rede para as seguintes sub-bacias: SF10 (sub-bacia do rio Verde Grande), SF9 (sub-bacia do rio Pandeiros) e SF6 (sub-bacia dos rios Riachão e Jequitai). A rede foi novamente reformulada e passou a contar com 60 poços de monitoramento. Foram feitas adaptações nos poços da rede para o monitoramento dos níveis estáticos.

As redes foram implantadas a partir da seleção dos pontos de monitoramento, a qual foi executada com base em bancos de dados existentes e em levantamentos de campo. Os principais bancos de dados utilizados foram: outorgas do SIAM – Sistema de informações ambientais do estado de Minas Gerais – e cadastros de poços do SIAGAS – Sistema de informações de águas subterrâneas da CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil. A definição da configuração das redes de monitoramento considerou a adequação de cada poço no que se refere às informações construtivas e às condições de amostragem, bem como sua representação espacial. O IGAM opera a rede de monitoramento com equipe própria para a execução das coletas. As

análises são realizadas por laboratório terceirizado. Um breve resumo do monitoramento, no Estado, é apresentado na Tabela 1.

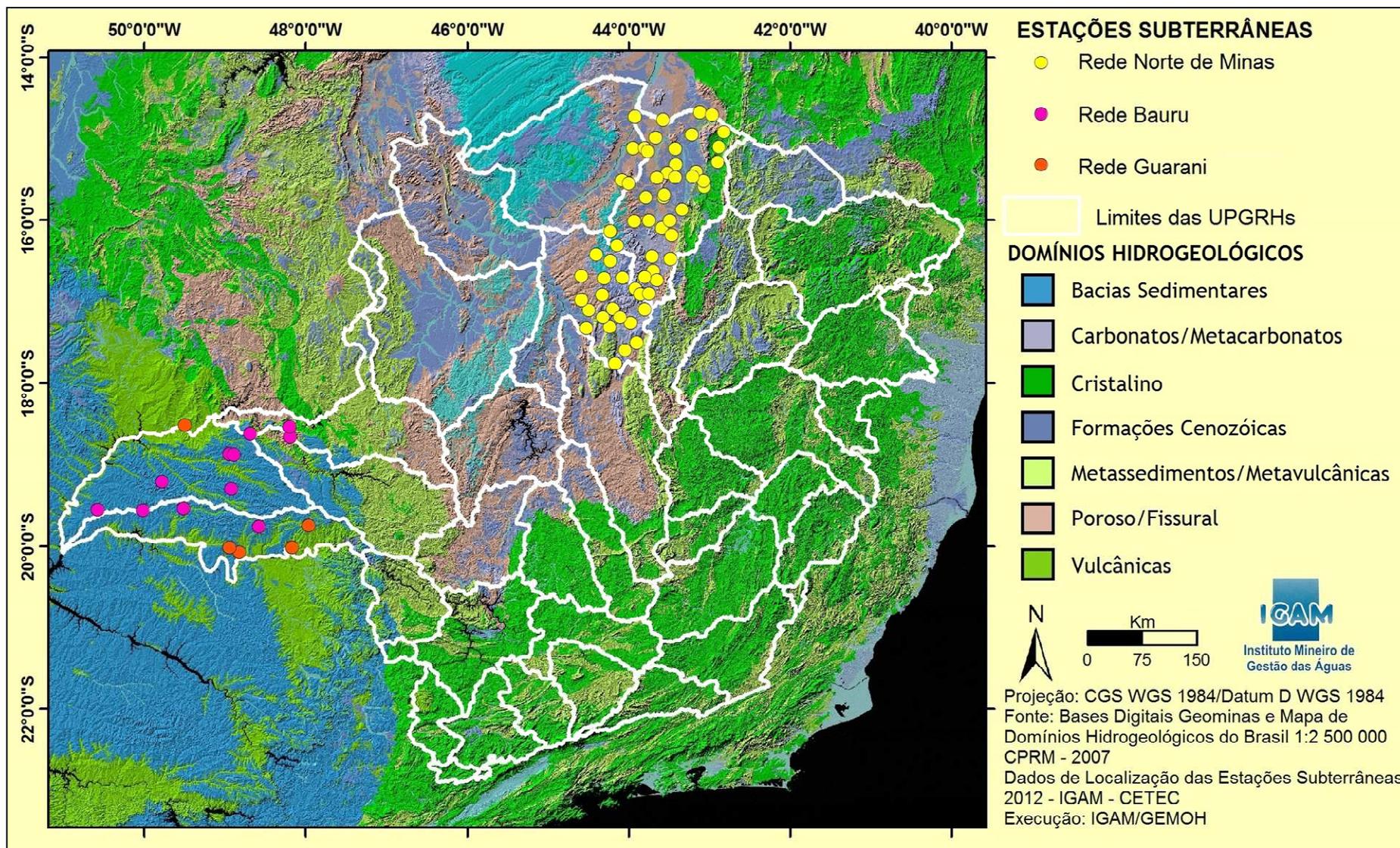
**Tabela 1:** Principais características do monitoramento – região Norte (onde predomina o aquífero Bambuí) e aquífero Guarani, no Estado de Minas Gerais.

	<b>SF6, SF9 e SF10</b>	<b>Aquífero Guarani</b>
Início do período do monitoramento	2005	2009
Nº de pontos	60	4
Nº de parâmetros analisados	74	60
Nº de resultados válidos	33.925	224
Periodicidade de coleta	Semestral	Anual

Os poços de monitoramento de águas subterrâneas no Estado estão distribuídos geograficamente, conforme mostrado na Figura 4.

Na Tabela 2, constam algumas características dos poços de monitoramento das redes do Norte de Minas e na Tabela 3, os mesmos dados são apresentados para os poços de monitoramento no aquífero Guarani.

Figura 4: Mapa com os poços de monitoramento de águas subterrâneas da rede mineira sobre os domínios hidrogeológicos aflorantes do Estado.



**Tabela 2:** Principais características dos poços da atual configuração da rede de monitoramento – região Norte (onde predomina o aquífero Bambuí), no Estado de Minas Gerais.

**Aquífero no Norte de Minas – SF6, SF9 e SF10**

<b>Ordenamento</b>	<b>Ponto</b>	<b>Município</b>	<b>Localidade</b>	<b>Bacia hidrográfica</b>	<b>Aquífero (principal)</b>	<b>Profundidade do poço (m)</b>	<b>Usos da água do poço</b>
1	BC001	Bocaiúva	RIMA	Jequitaiá-Pacuí	Bambuí	96	Industrial
2	BC003	Bocaiúva	Fazenda Santa Helena	Jequitaiá-Pacuí	Bambuí	41	Dessedentação animal e consumo humano
3	CE001	Capitão Enéias	Virgilândia	Rio Verde Grande	Bambuí	80	Dessedentação animal
4	CP001	Claro dos Poções	COPASA	Jequitaiá-Pacuí	Bambuí	90	Abastecimento público
5	CJ002	Coração de Jesus	Comunidade Pequeno	Jequitaiá-Pacuí	Bambuí	72	Consumo humano
6	CJ004	Coração de Jesus	Comunidade São Geraldo	Jequitaiá-Pacuí	Bambuí	120	Abastecimento público
7	CJ005	Coração de Jesus	Comunidade Retiro	Jequitaiá-Pacuí	Bambuí	93	Consumo humano
8	CJ006	Coração de Jesus	Comunidade Mato Verde	Jequitaiá-Pacuí	Bambuí	57	Consumo humano
9	EN001	Engenheiro Navarro	Comunidade mandacaru	Jequitaiá-Pacuí	Bambuí	66	Abastecimento público
10	EP001	Espinosa	Duarte Balieiro Confeccões Ltda	Verde Grande	Bambuí	57	Consumo industrial
11	EP004	Espinosa	Comunidade Juremil	Verde Grande	Bambuí	84	Consumo humano
12	EP006	Espinosa	COPASA	Verde Grande	Bambuí	80	Consumo humano
13	FD001	Francisco Dumont	Bairro Esplanada - COPASA	Jequitaiá-Pacuí	Bambuí	74	Consumo humano
14	FD002	Francisco Dumont	Comunidade Santo Antônio	Jequitaiá-Pacuí	Bambuí	90	Consumo humano
15	FS002	Francisco Sá	Fazenda Cascabulho	Verde Grande	Bambuí	100	Irrigação, consumo humano e dessedentação de animais
16	FS003	Francisco Sá	Sítio Corgão	Verde Grande	Bambuí	DI	Dessedentação de animais e consumo humano
17	FS004	Francisco Sá	Fazenda Santa Maria	Verde Grande	Bambuí	82	Dessedentação de animais e consumo humano
18	FS007	Francisco Sá	Fazenda São Paulo	Verde Grande	Bambuí	DI	Dessedentação de animais e consumo humano

(continua)

**Tabela 2:** Principais características dos poços da atual configuração da rede de monitoramento – região Norte (onde predomina o aquífero Bambuí), no Estado de Minas Gerais. (continuação)

Aquífero no Norte de Minas – SF6, SF9 e SF10							
Ordenamento	Ponto	Município	Localidade	Bacia hidrográfica	Aquífero (principal)	Profundidade do poço (m)	Usos da água do poço
19	GM001	Gameleiras	Com. Jacú das Piranhas	Verde Grande	Bambuí	68	Abastecimento público
20	JB003	Jaíba	Projeto Jaíba NH1	Pandeiros	Bambuí - Cárstico-fissurado	DI	Abastecimento público
21	JB007	Jaíba	Fazenda Lagoa do Meio	Verde Grande	Bambuí - Cárstico-fissurado	80	Dessedentação de animais e consumo humano
22	JB008	Jaíba	Fazenda Pioneira	Verde Grande	Bambuí - Cárstico	80	Dessedentação de animais e consumo humano
23	JB020	Jaíba	Fazenda Terra Boa	Verde Grande	Bambuí	90	Consumo humano
24	JB021	Jaíba	Fazenda Terra Morena	Verde Grande	Bambuí	DI	Irrigação
25	JN001	Janaúba	Fazenda Baixa da Colônia	Verde Grande	Bambuí	DI	Irrigação
26	JQ001	Jequitaiá	Barroco	Jequitaiá-Pacuí	Bambuí	90	Abastecimento público
27	JQ002	Jequitaiá	Fazenda Chapada	Jequitaiá-Pacuí	Bambuí	80	Dessedentação de animais
28	JQ003	Jequitaiá	Fazenda Porco Morto	Jequitaiá-Pacuí	Bambuí	74	Abastecimento público
29	JF001	Joaquim Felício	COPASA	Jequitaiá-Pacuí	Bambuí	89	Abastecimento público
30	JF002	Joaquim Felício	Curtume Catoni	Jequitaiá-Pacuí	Bambuí	43	Abastecimento público
31	JR001	Juramento	Comunidade Tira Chapéu	Verde Grande	Bambuí	47	Dessedentação animal
32	LP001	Lagoa dos Patos	COPASA	Jequitaiá-Pacuí	Bambuí	190	Abastecimento público
33	MTC001	Matias Cardoso	Fazenda Brasão	Verde Grande	Bambuí	97	Consumo humano e dessedentação de animais
34	MTC002	Matias Cardoso	Fazenda Vila Bela	Verde Grande	Bambuí	120	Consumo humano
35	MTC006	Matias Cardoso	Fazenda Betânia	Verde Grande	Bambuí	81	Consumo humano e dessedentação de animais
36	MR001	Mirabela	Posto da Polícia Rodoviária Estadual	Verde Grande	Bambuí	DI	Consumo humano

(continua)

**Tabela 2:** Principais características dos poços da atual configuração da rede de monitoramento – região Norte (onde predomina o aquífero Bambuí), no Estado de Minas Gerais. (continuação)

Aquífero no Norte de Minas – SF6, SF9 e SF10							
Ordenamento	Ponto	Município	Localidade	Bacia hidrográfica	Aquífero (principal)	Profundidade do poço (m)	Usos da água do poço
37	MR002	Mirabela	Comunidade São Bento	Verde Grande	Bambuí	84	Consumo humano
38	MA001	Monte Azul	Comunidade Siplal	Verde Grande	Bambuí	DI	Abastecimento público
39	MA003	Monte Azul	Comunidade Marinho (Tamboril)	Verde Grande	Bambuí	DI	Abastecimento público
40	MC002	Montes Claros	Sítio Pradinho	Jequitaiá-Pacuí	Bambuí	80	Dessedentação de animais e consumo humano
41	MC003	Montes Claros	Posto Novo Rio	Verde Grande	Bambuí	66	Consumo humano
42	MC004	Montes Claros	Barroão - Água Santa	Verde Grande	Bambuí	84	Consumo humano
43	MC005	Montes Claros	Fazenda Buritis	Jequitaiá-Pacuí	Bambuí	82	Consumo humano
44	MC006	Montes Claros	Rio do Sítio	Verde Grande	Bambuí	DI	Dessedentação de animais e consumo humano
45	PP001	Pai Pedro	Comunidade Mirante	Verde Grande	Aquífero fissurado	DI	Consumo humano
46	PP002	Pai Pedro	Fazenda Angicos	Verde Grande	Aquífero fissurado	80	Consumo humano
47	PP004	Pai Pedro	COPASA	Verde Grande	Aquífero fissurado	DI	Abastecimento público
48	RM001	Riacho dos Machados	COPASA	Verde Grande	Bambuí	DI	Abastecimento público
49	SL001	São João da Lagoa	Riacho de Areia	Jequitaiá-Pacuí	Bambuí	66	Dessedentação animal
50	SP001	São João da Ponte	Brejo Grande	Verde Grande	Bambuí	60	Dessedentação animal, urbano
51	SP002	São João da Ponte	Fazenda Santa Mônica	Verde Grande	Bambuí	DI	Dessedentação animal e consumo humano
52	SP003	São João da Ponte	Fazenda Sementes Tolentino	Verde Grande	Bambuí	64	Abastecimento humano e lavagem de veículos
53	VZ001	Varzelândia	Comunidade Bebedouro	Pandeiros	Bambuí - Cárstico	100	Abastecimento público
54	VZ006	Varzelândia	Brejo do Mutambal	Verde Grande	Bambuí	84	Abastecimento humano

(continua)

**Tabela 2:** Principais características dos poços da atual configuração da rede de monitoramento – região Norte (onde predomina o aquífero Bambuí), no Estado de Minas Gerais. (continuação)

Aquífero no Norte de Minas – SF6, SF9 e SF10							
Ordenamento	Ponto	Município	Localidade	Bacia hidrográfica	Aquífero (principal)	Profundidade do poço (m)	Usos da água do poço
55	VD001	Verdelândia	Comunidade Sebo	Verde Grande	Bambuí - Cárstico-fissurado	52	Abastecimento humano
56	VD003	Verdelândia	Fazenda Sapé	Verde Grande	Bambuí - Cárstico	60	Dessedentação animal e, eventualmente, consumo humano
57	VD013	Verdelândia	Fazenda Colonial	Verde Grande	Bambuí - Cárstico-fissurado	140	Dessedentação de animais
58	VD014	Verdelândia	Fazenda Oriente	Rio Verde Grande	Bambuí - Cárstico	34	Irrigação
59	VD020	Verdelândia	Fazenda Serra da Colonial	Verde Grande	Bambuí	114	Consumo humano e dessedentação animal
60	VD021	Verdelândia	Amargoso	Verde Grande	Bambuí	DI	-
61	VD022	Verdelândia	Fazenda Santo Antônio do Bom Jardim	Verde Grande	Bambuí	100	Dessedentação animal

Obs: O poço VD021 encontra-se desativado a partir de 2012.  
 Todos os poços são de extração ou de produção e todos são do tipo tubular profundo.  
 DI – Dados Indisponíveis

**Tabela 3:** Principais características dos poços da atual configuração da rede de monitoramento – região do Triângulo Mineiro - Aquífero Guarani, no Estado de Minas Gerais.

**Aquífero Guarani**

<b>Ordena mento</b>	<b>Ponto</b>	<b>Município</b>	<b>Localidade</b>	<b>Bacia hidrográfica</b>	<b>Profundidade do poço (m)</b>	<b>Usos da água do poço</b>
1	CAL1	Conceição das Alagoas	Estância Recanto das Águas	Bacia do Rio Grande	341,40	Balneabilidade
2	FRT1	Frutal	Fazenda São Bento da Ressaca Usina Frutal Açúcar e Álcool	Bacia do Rio Grande	1156,50	Industrial
3	FRT2	Frutal	Frutal COPASA	Bacia do Rio Grande	1163,43	Abastecimento humano (poço inativo não amostrado em 2010 e 2011)
4	CD3	Cachoeira Dourada	Yquara Termas	Bacia do Rio Paranaíba	470,00	Balneabilidade
5	UBR1	Uberaba	Área urbana de Uberaba - CODAU	Bacia do Rio Grande	578,45	Abastecimento humano

Obs: Todos os poços são de extração ou de produção e todos são do tipo tubular profundo.

## PARÂMETROS MONITORADOS

O IGAM monitora 74 parâmetros físico-químicos e biológicos nas águas subterrâneas. Para o tratamento dos dados obtidos, é feita uma seleção com base no seguinte: parâmetros usados para comparações com padrões legais (incluindo os diferentes tipos de uso – consumo humano, dessedentação animal, irrigação e recreação), parâmetros utilizados no balanço iônico e, por fim, os parâmetros utilizados no tratamento estatístico dos resultados. Na Figura 5, são mostrados os parâmetros selecionados para análise.

**Figura 5:** Parâmetros selecionados para as águas subterrâneas monitoradas no Estado.



Os parâmetros pH, CE e STD, além da temperatura e do OD, devem ser, preferencialmente, determinados em campo imediatamente após a amostragem, em vista de sua alteração durante armazenamento.

Para o tratamento estatístico dos resultados, os critérios de seleção de parâmetros utilizados foram:

- Importância do parâmetro para a avaliação da qualidade geral da água subterrânea (considerando que o monitoramento é, predominantemente, 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 –  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ .
- Retirada de parâmetro com percentual elevado de dados faltantes ( $\geq 60\%$ ).
- 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 ( $\leq 0,5\%$ ). 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 por matriz de correlação de Spearman aplicadas aos respectivos resultados. Exceção para a CE – condutividade elétrica – e os STD – sólidos totais dissolvidos, para os quais se buscou verificar, por meio dos resultados, comportamentos similares.
- 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 quantificação do método (LQ) utilizado para cada parâmetro.

No caso das águas subterrâneas no Norte de Minas (aquífero Bambuí), o monitoramento tem incluído os parâmetros biológicos – coliformes totais e termotolerantes, além de agrotóxicos (estes últimos medidos em duas campanhas no ano de 2010). Os parâmetros biológicos foram excluídos da análise do presente relatório, não somente por não terem atendido ao critério de dados faltantes (o nº de faltantes excedeu 60% dos dados), 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 provável contaminação durante a amostragem. Em vista disso, o IGAM pretende substituir, futuramente, estes parâmetros por outro(s), também biológico(s), que possa(m) ser mais representativo(s) das características dos aquíferos monitorados.

Em relação aos agrotóxicos, o IGAM monitorou em 2010, no norte de Minas: 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 e Trifluoralina. Todos os agrotóxicos medidos apresentaram concentrações iguais ou menores do que o limite de quantificação e, portanto, nenhum deles violou limites da legislação Resolução Conama nº 396/2008 e Portaria do Ministério da Saúde nº 2914/2011. Em função disso e considerando os níveis relativamente elevados de aplicação de agrotóxicos nos solos da região, pela atividade agrícola, o IGAM pretende investigar as possíveis razões da não detecção de agrotóxicos nas águas subterrâneas nesta região, especialmente nas águas menos profundas. É preciso avaliar provável degradação destes compostos em compostos mais simples ou metabólitos, determinar os mais prováveis e conservativos, indicadores de contaminação, e investigá-los, sem, contudo, descartar outras causas possíveis.

No aquífero Guarani, em função de suas características, especialmente da profundidade, não foram feitas análises de parâmetros biológicos, nem de agrotóxicos. O IGAM seguiu o protocolo de monitoramento estabelecido pelo PEA-Guarani.

Além do monitoramento qualitativo, o IGAM tem buscado determinar, sempre que possível, os níveis estáticos d'água nos poços, *in loco*, para caracterização dos fluxos subterrâneos regionais e identificação de zonas de recarga e descarga nos aquíferos.

## **ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS**

As análises físico-químicas são divididas em dois grupos: aquelas determinadas em campo, no momento da amostragem (pelo IGAM): pH, CE e STD, além da temperatura e do OD e as demais que são executadas por laboratório terceirizado (Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC). Os métodos de análise e limites de quantificação estão descritos na Tabela 4, de acordo com o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, com exceção de cloretos totais, sólidos totais dissolvidos – STD, sólidos dissolvidos a 180 °C, fenóis, nitrogênio amoniacal total, e DQO.

**Tabela 4:** Método analítico – nome do método e respectiva norma de referência – e os limites de quantificação aplicados no decorrer do monitoramento, para cada parâmetro monitorado nas águas subterrâneas de MG.

PARÂMETRO	MÉTODO ANALÍTICO		LIMITE DE QUANTIFICAÇÃO		
	IDENTIFICAÇÃO	REFERÊNCIA	CAMPANHAS ANTERIORES	ATUAL	UNIDADE DE MEDIDA
Temperatura da água (campo)	Termometria	SM 2550 B	NA	NA	°C
pH (campo)	Potenciometria	SM 5520 B	NA	NA	adimensional
Condutividade elétrica (campo)	Condutimetria	SM 2510 B	NA	NA	2005 e 2006: µmho/cm a partir de 2007: µS/cm
STD (campo)	Gravimetria	ABNT NBR 10664/1989	1	1	mg/L
Eh (campo)	Potenciometria	#	0,1	0,1	mV
Coliformes totais	Tubos Múltiplos	SM 9221 B	<2	<2	NMP/100 mL
			>160.000	>160.000	NMP/100 mL
Coliformes termotolerantes	Tubos Múltiplos	SM 9221 E	<2	<2	NMP/100 mL
			>160.000	>160.000	NMP/100 mL
Alcalinidade bicarbonato	Potenciometria	SM 2320 B	1,0	1,0	mg/L
Alcalinidade carbonato	Potenciometria	SM 2320 B	1,0	1,0	mg/L
Cloreto total	Espectrofotometria	USGS –I–1187 85	até 2010: 0,3	a partir de 2011: 0,50	mg/L
Condutividade elétrica - laboratório	Condutimetria	SM 2510 B	NA	NA	2005 e 2006: µmho/cm, e a partir de 2007: µS/cm
Cor verdadeira	Colorimetria	SM 2120 B	até 2010: 5	a partir de 2011: 10	Upt
Dureza total	Titulometria	SM 2340 C	1,0	1,0	mg/L
Dureza Ca	Titulometria	SM 3500-Ca B	1,0	1,0	mg/L
Dureza Mg	Titulometria	SM 3500-Mg B	1,0	1,0	mg/L
Fenóis totais	Espectrofotometria	ABNT NBR 10740/1989	até 2010: 0,001	a partir de 2011: 0,002	mg/L
Fluoreto ionizado	Eletrometria – Eletrodo seletivo	SM 4500-F C	até 2006: 0,25	a partir de 2007: 0,10	mg/L
Fósforo total	Espectrofotometria	SM 4500-P B e E	até 2010: 0,01	a partir de 2011: 0,02	mg/L
Magnésio dissolvido	Espectrometria de emissão atômica por plasma	SM 3120 B	0,002	0,002	mg/L
Magnésio total	Espectrometria de emissão atômica por plasma	SM 3120 B	0,002	0,002	mg/L
Nitrato	Eletrometria – Eletrodo seletivo	SM 4500-NO3- D	até 2010: 0,01	a partir de 2011: 0,10	mg/L

(continua)

**Tabela 4:** Método analítico – nome do método e respectiva norma de referência – e os limites de quantificação aplicados no decorrer do monitoramento, para cada parâmetro monitorado nas águas subterrâneas de MG (*continuação*).

PARÂMETRO	MÉTODO ANALÍTICO		LIMITE DE QUANTIFICAÇÃO		
	IDENTIFICAÇÃO	REFERÊNCIA	CAMPANHAS ANTERIORES	ATUAL	UNIDADE DE MEDIDA
Nitrito	Espectrofotometria	SM 4500-NO2- B	0,001	0,001	mg/L
Nitrogênio amoniacal total		ABNT NBR 10560/1988	0,10	0,10	mg/L
Nitrogênio orgânico		SM 4500-Norg B	0,10	0,10	mg/L
Óleos e graxas	Gravimetria	SM 5520 B	15	15	mg/L
pH laboratório	Potenciometria	SM 4500 H+ B	NA	NA	adimensional
Sólidos dissolvidos a 180°C	Gravimetria	ABNT NBR 10664/1989	2	2	mg/L
Sulfato total	Turbidimetria	SM 4500-SO42- E	até 2010: 1,0	a partir de 2011: 5,0	mg/L
Sulfeto	Titulometria	SM 4500-S2- F	até 2006: 0,002	a partir de 2007: 0,5	mg/L
Demanda Bioquímica de Oxigênio	Eletrométrico	SM 5210 B	2	2	mg/L
Demanda Química de Oxigênio	Titulometria	ABNT NBR 10357/1988	5	5	mg/L
Turbidez	Turbidimetria	SM 2130 B	até 2009: 0,1	a partir de 2010: 0,5	NTU
Alumínio dissolvido	Espectrometria de emissão atômica por plasma	SM 3120 B	0,10	0,10	mg/L
Alumínio total		SM 3120 B	0,10	0,10	mg/L
Arsênio total	Espectrometria de absorção atômica com gerador de hidretos	SM 3114 B	0,0003	0,0003	mg/L
Bário total	Espectrometria de emissão atômica por plasma	SM 3120 B	0,005	0,005	mg/L
Boro total		SM 3120 B	0,07	0,07	mg/L
Cádmio total		SM 3125 B	0,0005	0,0005	mg/L
Cálcio dissolvido		SM 3120 B	0,03	0,03	mg/L
Cálcio total		SM 3120 B	0,03	0,03	mg/L

(*continua*)

**Tabela 4:** Método analítico – nome do método e respectiva norma de referência – e os limites de quantificação aplicados no decorrer do monitoramento, para cada parâmetro monitorado nas águas subterrâneas de MG (*continuação*).

PARÂMETRO	MÉTODO ANALÍTICO		LIMITE DE QUANTIFICAÇÃO		
	IDENTIFICAÇÃO	REFERÊNCIA	CAMPANHAS ANTERIORES	ATUAL	UNIDADE DE MEDIDA
Chumbo total	Espectrometria de emissão atômica por plasma	SM 3125 B	0,005	0,005	mg/L
Cobre dissolvido		SM 3120 B	0,004	0,004	mg/L
Cobre total		SM 3120 B	0,004	0,004	mg/L
Cromo total		SM 3120 B	0,04	0,04	mg/L
Estrôncio		SM 3120 B	0,005	0,005	mg/L
Ferro dissolvido		SM 3120 B	0,03	0,03	mg/L
Ferro total		SM 3120 B	0,03	0,03	mg/L
Lítio		SM 3120 B	0,005	0,005	mg/L
Manganês dissolvido		SM 3120 B	0,003	0,003	mg/L
Manganês total		SM 3120 B	0,003	0,003	mg/L
Mercúrio total		SM 3112 B	0,0002	0,0002	mg/L
Níquel total		SM 3125 B	0,004	0,004	mg/L
Potássio dissolvido		SM 3120 B	0,09	0,09	mg/L
Potássio Total		SM 3120 B	0,09	0,09	mg/L
Selênio total		Espectrometria de absorção atômica com gerador de hidretos	SM 3114 B	0,0005	0,0005
Silício dissolvido	Espectrometria de emissão atômica por plasma	SM 3120 B	0,05	0,05	mg/L
Sódio dissolvido		SM 3120 B	0,50	0,50	mg/L
Sódio total		SM 3120 B	0,50	0,50	mg/L
Zinco total		SM 3120 B	0,02	0,02	mg/L
Agrotóxicos: Aldrin + Dieldrin, Atrazina, Clordano(cis + trans), DDT, Endossulfan(alfa + beta), Endrin, Heptacloro + heptacloroepóxido, Hexaclorobenzeno, Lindano, Metoxicloro, Molinato, Pentaclorofenol, Permetrina(cis + trans), Simazina, 2,4,6 triclorofenol, Trifluoralina	Cromatografia a gás	SM 6410	0,01	0,01	µg/L

## TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos por meio das campanhas de amostragem semestrais constituem o banco de dados do monitoramento das águas subterrâneas do IGAM, cujos dados são tratados estatisticamente a cada biênio. Mesmo o monitoramento na região norte, que apresenta maior número de dados, apresenta relativamente poucos dados em função de reconfigurações na rede, os quais variam entre dois e nove resultados analíticos, por parâmetro e por poço. A análise estatística descritiva foi feita, para os dados do Norte de Minas, considerando mediana, percentis 10, 25, 75 e 90, mínimos e máximos, média aritmética, desvio padrão e percentual de outliers, além dos dados faltantes e censurados.

Optou-se por adotar o 3º quartil (75%), como o parâmetro estatístico representativo do conjunto de dados, para cada parâmetro físico-químico analisado. Portanto, o percentil 75% de cada parâmetro constitui a referência para comparação da qualidade das águas entre diferentes períodos do monitoramento.

Considerando o número ainda relativamente pequeno dos resultados obtidos, foram aplicados testes não paramétricos de Kruskal-Wallis para os 22 parâmetros selecionados, ao nível de significância ( $\alpha$ ) de 5%, cujos resultados foram discutidos. 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.

Todas as análises estatísticas foram feitas utilizando o software Statistica 8.0. Foram elaborados também os histogramas para cada um dos parâmetros selecionados, e o diagrama de Piper, para avaliação dos íons maiores e classificação hidrogeoquímica das águas.

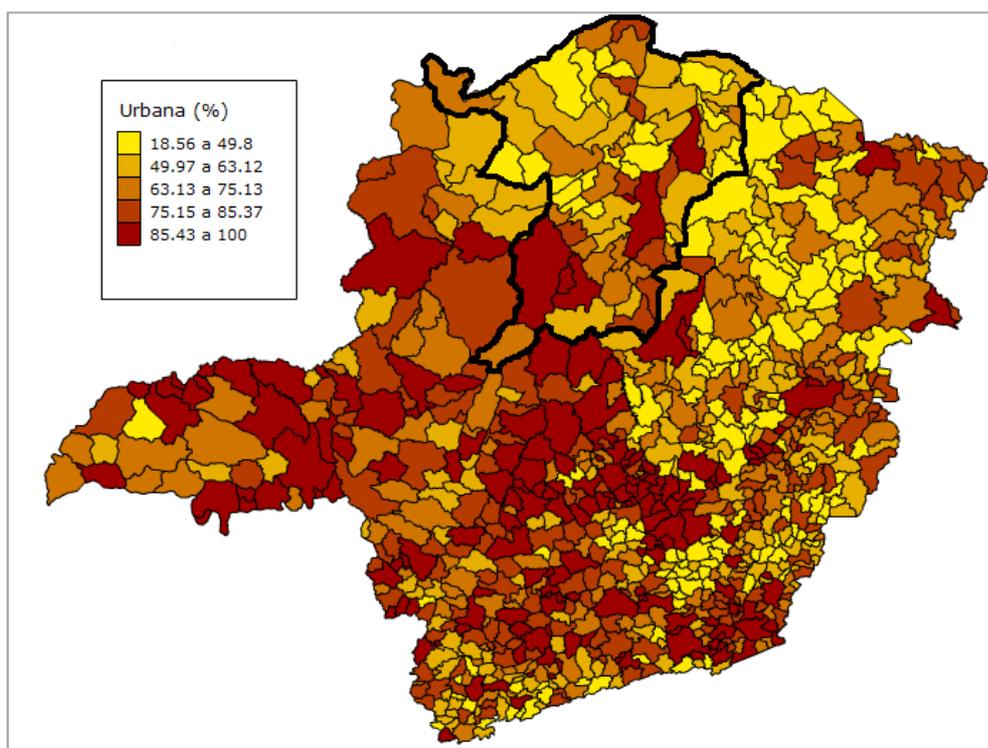
## CAPÍTULO II – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO NORTE DE MINAS - SUB-BACIAS SF6, SF9 E SF10

### MUNICÍPIOS, POPULAÇÃO E OCUPAÇÃO

As UPGRH em que é feito o monitoramento das águas subterrâneas, no Norte de Minas Gerais, correspondem a 83.433 km<sup>2</sup>, dos quais: 27.219 km<sup>2</sup> de área de drenagem da porção mineira da SF10 – sub-bacia do rio Verde Grande, 31.258 km<sup>2</sup> da porção mineira da SF9 – sub-bacia do rio Pandeiros e 24.956 km<sup>2</sup> da SF6 – sub-bacia dos rios Jequitai e Pacuí, esta última integralmente em Minas Gerais (IGAM, 2012 – a e b).

Com exceção de cinco municípios (Montes Claros, Janaúba, Pirapora, Buritizeiro e Várzea da Palma), na área monitorada, assim como no restante do Norte de Minas, prevalecem municípios com maior percentual de população rural em relação à urbana (Figura 6). Comparativamente com as demais regiões do Estado, somente perde, em termos de quantidade da população rural, para a mesorregião do Jequitinhonha.

**Figura 6:** Percentual da população urbana nos municípios de Minas Gerais, com destaque para os municípios que compõem as UPGRHs SF6, SF9 e SF10.



Fonte: Adaptado de IBGE, 2012(a).

As Figuras 7, 8 e 9 mostram os municípios que compõem as UPGRH SF6, SF9 e SF10, respectivamente, ou seja, municípios cujos territórios pertençam, integral ou parcialmente, a estas sub-bacias, bem como suas populações, densidades populacionais, números de

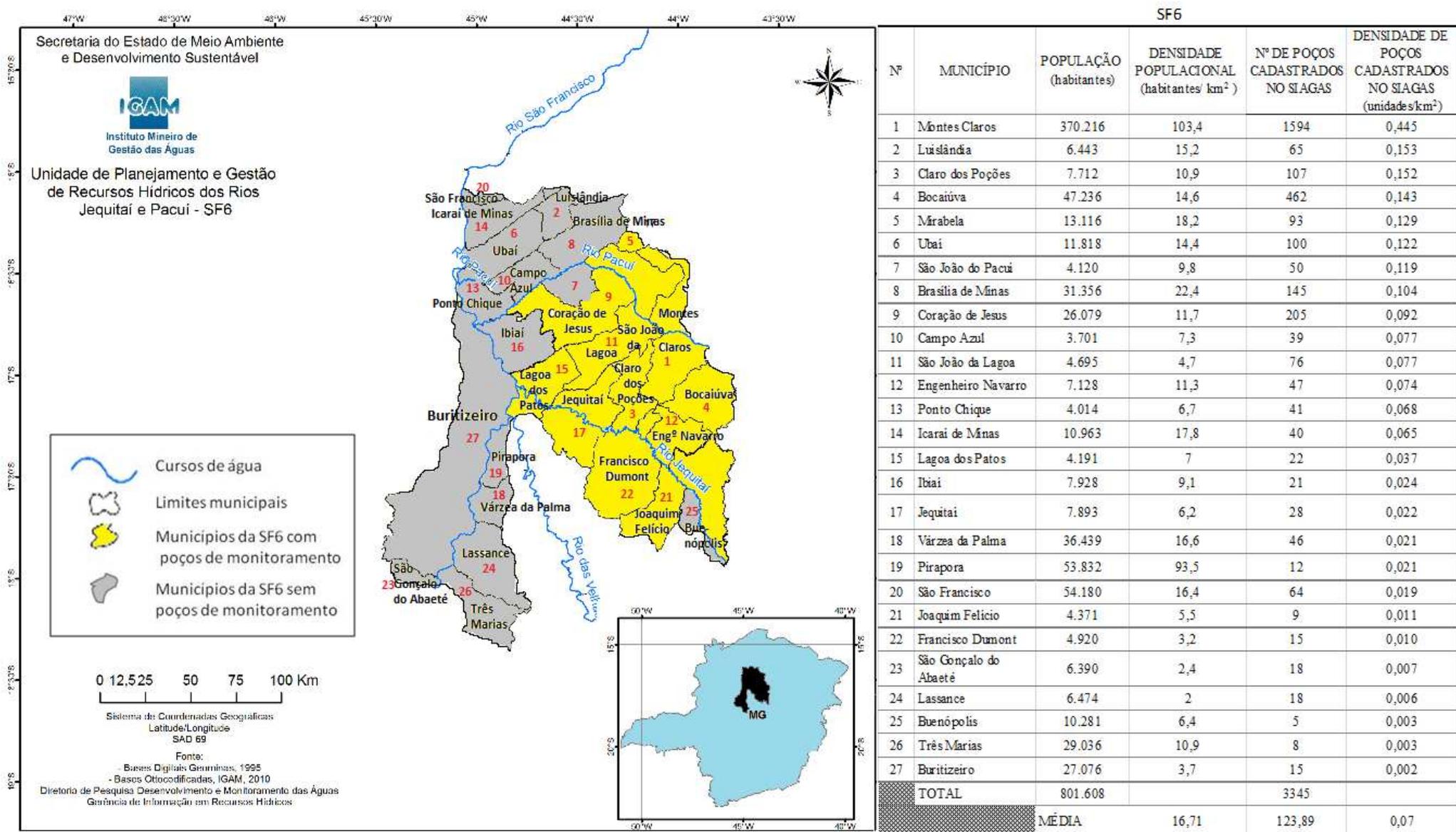
poços cadastrados no Siagas para o respectivo município até abril/2013 e densidade dos poços cadastrados no Siagas. Os municípios que detém poços de monitoramento da rede do IGAM foram destacados nos mapas (em amarelo).

Optou-se por utilizar os dados de números de poços disponíveis no Siagas, em função dos levantamentos de campo detalhados que foram executados pela CPRM nesta região, especificamente, o que torna estes resultados mais representativos da realidade, em comparação com os dados de outorga.

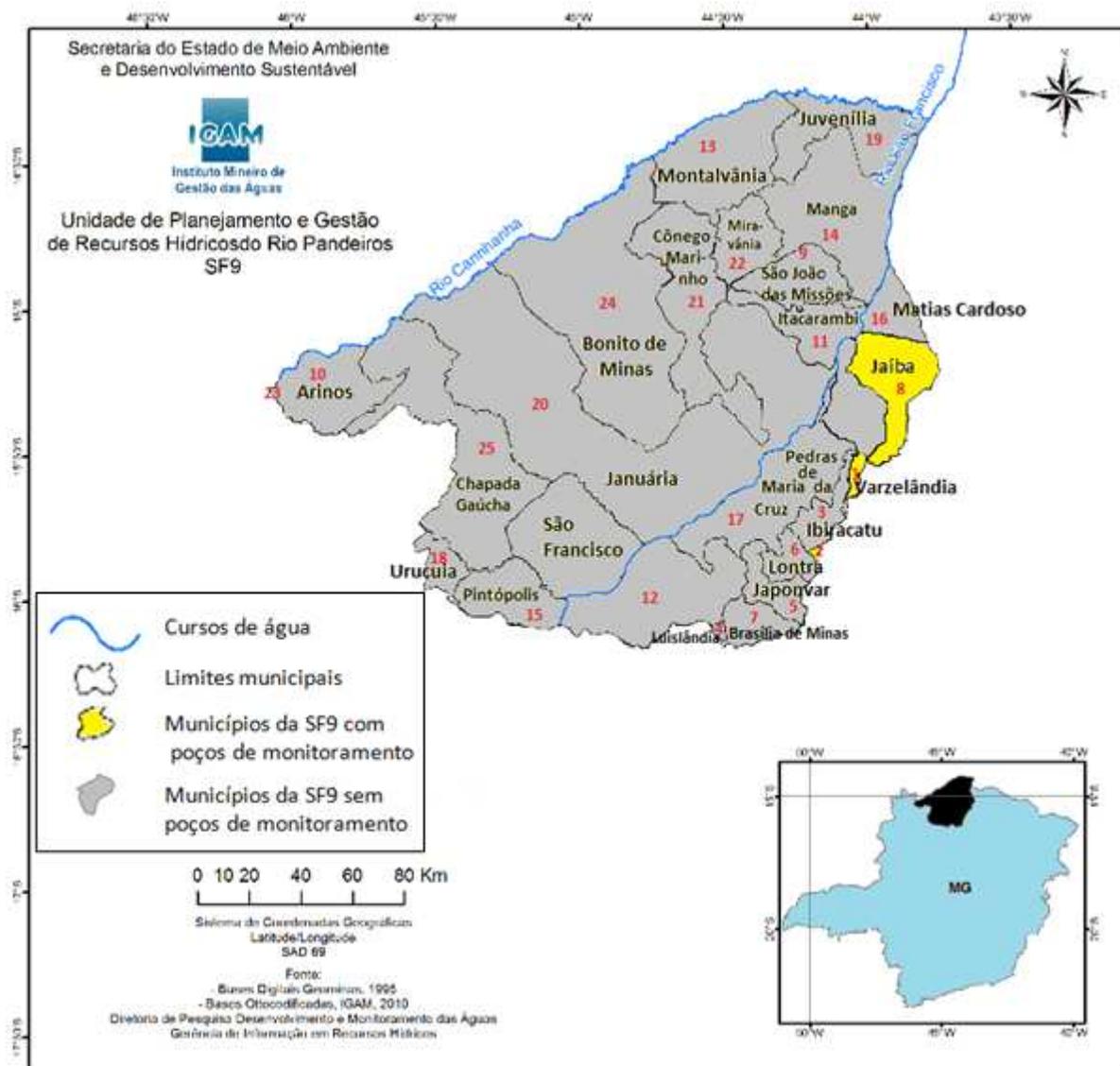
Os municípios foram ordenados, em ordem decrescente, pela densidade dos poços de extração cadastrados, buscando identificar aqueles com maior consumo de águas subterrâneas. Ressalta-se que, embora os níveis de consumo das águas constituam apenas um dentre diversos outros critérios a serem utilizados no planejamento das redes de monitoramento, ele constitui um bom indicativo.

A rede de monitoramento atual apresenta relativa representatividade da região. No entanto, a mesma poderá ser aprimorada, o que se evidencia, a partir das figuras mencionadas, que mostram que alguns municípios, com consumo relativamente elevado, ainda não são objeto de monitoramento. É desejável, portanto, ampliação futura da rede existente. Exemplos são os seguintes municípios: Luislândia, São João do Pacuí e Campo Azul na SF6, Ibiracatu, Japonvar, Lontra e Brasília de Minas na SF9 e Glaucilândia, Mato Verde, Patis e Guaraciama na SF10. Conforme mostrado na Figura 8, na SF9, o monitoramento é ainda restrito, com extensão bem pequena, à porção leste da UPGRH, que também tem elevados níveis de consumo do recurso hídrico subterrâneo, o que justificaria a expansão, neste caso, a toda a sub-bacia, especialmente na margem esquerda do rio São Francisco.

**Figura 7:** Mapa dos municípios da UPGRH SF6 (com destaque – em amarelo – para municípios em que há poços da rede de monitoramento do IGAM). Tabela com a população, território, densidade populacional e número de poços cadastrados no Siagas (até abril/2013), por município da UPGRH SF6.

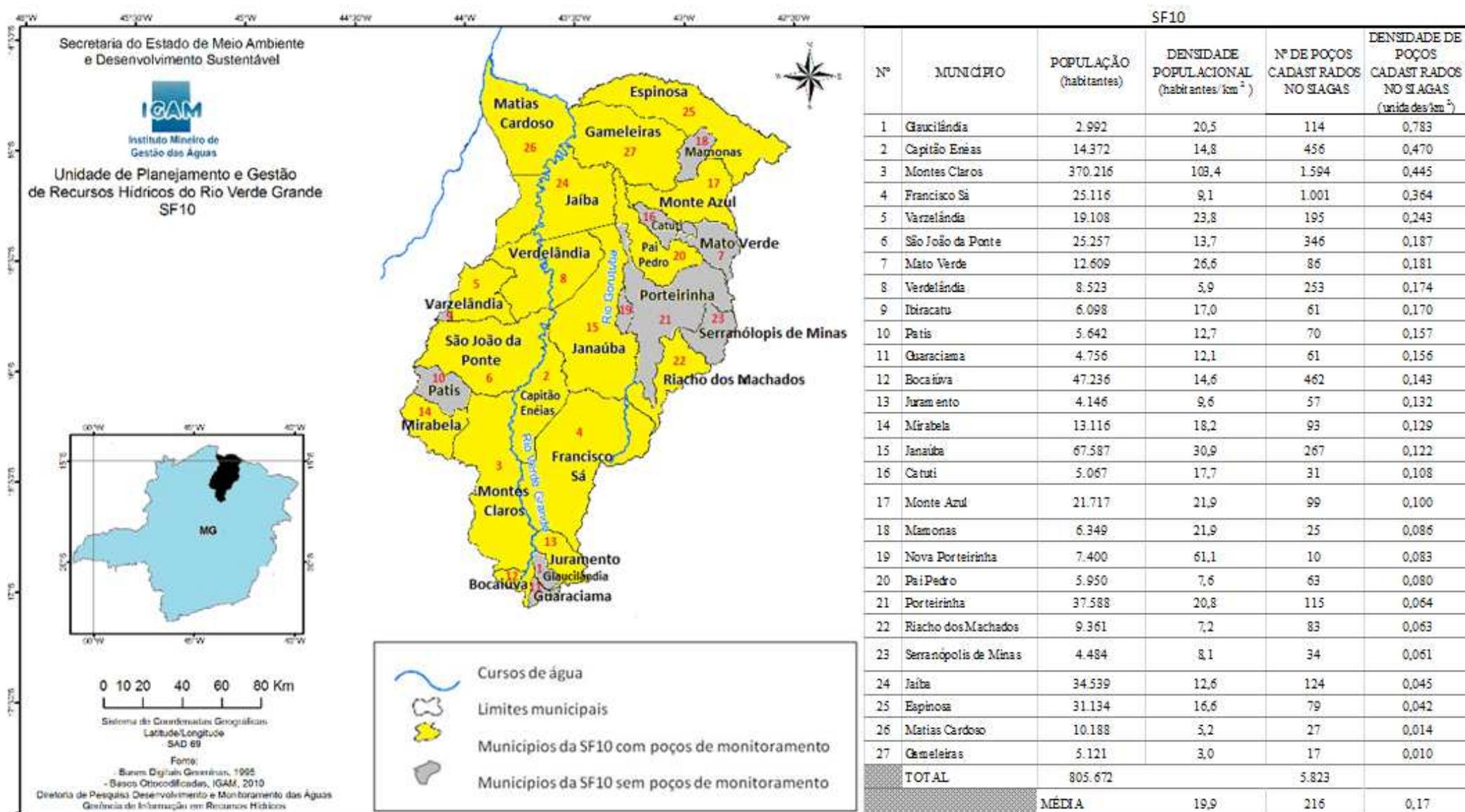


**Figura 8:** Mapa dos municípios da UPRGH SF9 (com destaque – em amarelo – para municípios em que há poços da rede de monitoramento do IGAM). Tabela com a população, território, densidade populacional e número de poços cadastrados no Siagas (até abril/2013), por município da UPRGH SF9.



SF9					
Nº	MUNICÍPIO	POPULAÇÃO (habitantes)	DENSIDADE POPULACIONAL (habitantes/ km <sup>2</sup> )	Nº DE POÇOS CADASTRADOS NO SIAGAS	DENSIDADE DE POÇOS CADASTRADOS NO SIAGAS (unidade/s/km <sup>2</sup> )
1	Varzelândia	19.108	23,4	195,0	0,239
2	São João da Ponte	25.257	13,6	346,0	0,187
3	Ibiracatu	6.098	17,3	61,0	0,173
4	Lúislândia	6.443	15,6	66,0	0,160
5	Japonvar	8.331	22,2	58,0	0,155
6	Lontra	8.506	32,9	35,0	0,135
7	Brasília de Minas	31.356	22,4	145,0	0,104
8	Jaíba	34.539	13,2	124,0	0,047
9	São João das Missões	11.940	17,6	21,0	0,031
10	Arinos	17.669	3,3	149,0	0,028
11	Itacarambi	17.761	14,5	34,0	0,028
12	São Francisco	54.180	16,4	64,0	0,019
13	Montalvânia	15.631	10,4	29,0	0,019
14	Manga	19.489	10,0	36,0	0,018
15	Pintópolis	7.251	5,9	22,0	0,018
16	Matias Cardoso	10.188	5,2	27,0	0,014
17	Pedras de Maria da Cruz	10.534	6,9	21,0	0,014
18	Uruçua	14.207	6,8	26,0	0,013
19	Juvenília	5.697	5,4	12,0	0,011
20	Januária	65.744	9,9	74,0	0,011
21	Cônego Marinho	7.196	4,4	18,0	0,011
22	Miravânia	4.604	7,6	5,0	0,008
23	Formoso	8.427	2,3	20,0	0,005
24	Bonito de Minas	9.947	2,5	12,0	0,003
25	Chapada Gaúcha	11.339	3,5	10,0	0,003
<b>TOTAL</b>		<b>431.442</b>		<b>1.610,0</b>	
<b>MÉDIA</b>			<b>11,7</b>	<b>64,4</b>	<b>0,058</b>

**Figura 9:** Mapa dos municípios da UPGRH SF10 (com destaque – em amarelo – para municípios em que há poços da rede de monitoramento do IGAM). Tabela com a população, território, densidade populacional e número de poços cadastrados no Siagas (até abril/2013), por município da UPGRH SF10.



## PERCENTUAL DE OCUPAÇÃO

A partir de iniciativas governamentais, foram introduzidas culturas comerciais como o reflorestamento e a cafeicultura, na década de 70, na região do Norte de Minas, o que reverteu o predomínio da agricultura de subsistência. Todavia, a estrutura produtiva permaneceu, em grande parte, inalterada e o quadro de desigualdade social e de pobreza na região permanece até hoje (SCHVARTZMAN, 2007).

As atividades econômicas prevalentes no Norte de Minas Gerais são a silvicultura (incluindo o florestamento com espécies exóticas), as atividades pecuárias e agrícolas (incluindo as extensivas) e as carvoarias. Elas são as principais responsáveis pelo desmatamento na região, somadas às queimadas e outras técnicas incorretas de manejo de terras para a prática da agricultura, contribuindo para o assoreamento de rios e córregos, perdas de produtividade do solo, alterações no ciclo hidrológico natural, dentre outros impactos ambientais negativos. A retirada da vegetação natural deixa o solo empobrecido e vulnerável às ações do escoamento superficial das águas que, por sua vez e de forma progressiva, agravam o quadro de erosão.

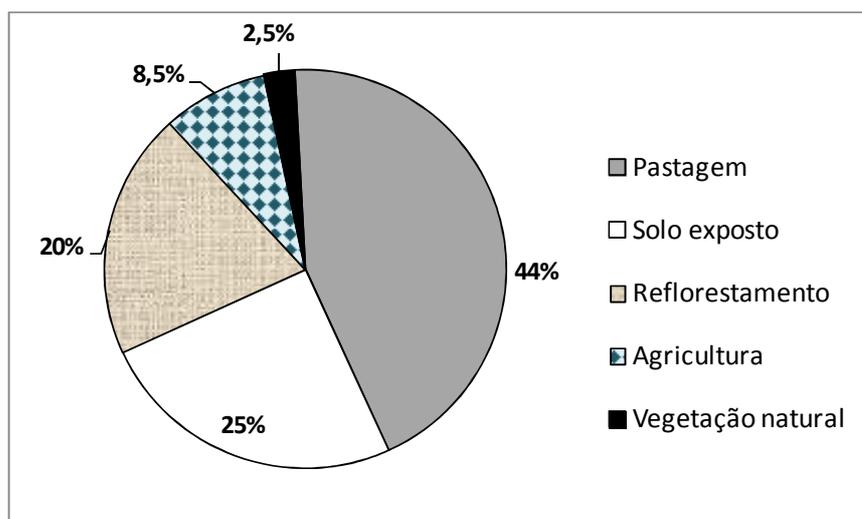
De acordo com o levantamento da Codevasf executado em 2010, na região norte, a ocupação do solo corresponde aos seguintes percentuais, por atividade:

- Pastagens - 16,6%.
- Agricultura - 7%.
- Reflorestamento - 0,9%.

Os demais usos correspondem a apenas 0,3% da área total. Os refúgios ecológicos e as áreas de conservação/preservação perfaziam 1% de toda a área considerada (Codevasf, 2010).

Outro levantamento detalhado e conduzido por Leite e colaboradores (2010) na região do alto Riachão mostra a distribuição no uso e ocupação do solo apresentada na Figura 10. Atribui-se o percentual do solo exposto (25%) aos processos erosivos advindos do desgaste do solo em áreas de pastagem altamente degradadas; à existência de terras em fase de preparação para o cultivo de eucalipto e da agricultura; e ao desmatamento.

**Figura 10:** Uso e ocupação do solo na região norte ilustrada a partir de estudo no alto Riachão em 2008 - proporção por categoria.



Fonte: adaptado de Leite *et al.*, 2010.

## ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

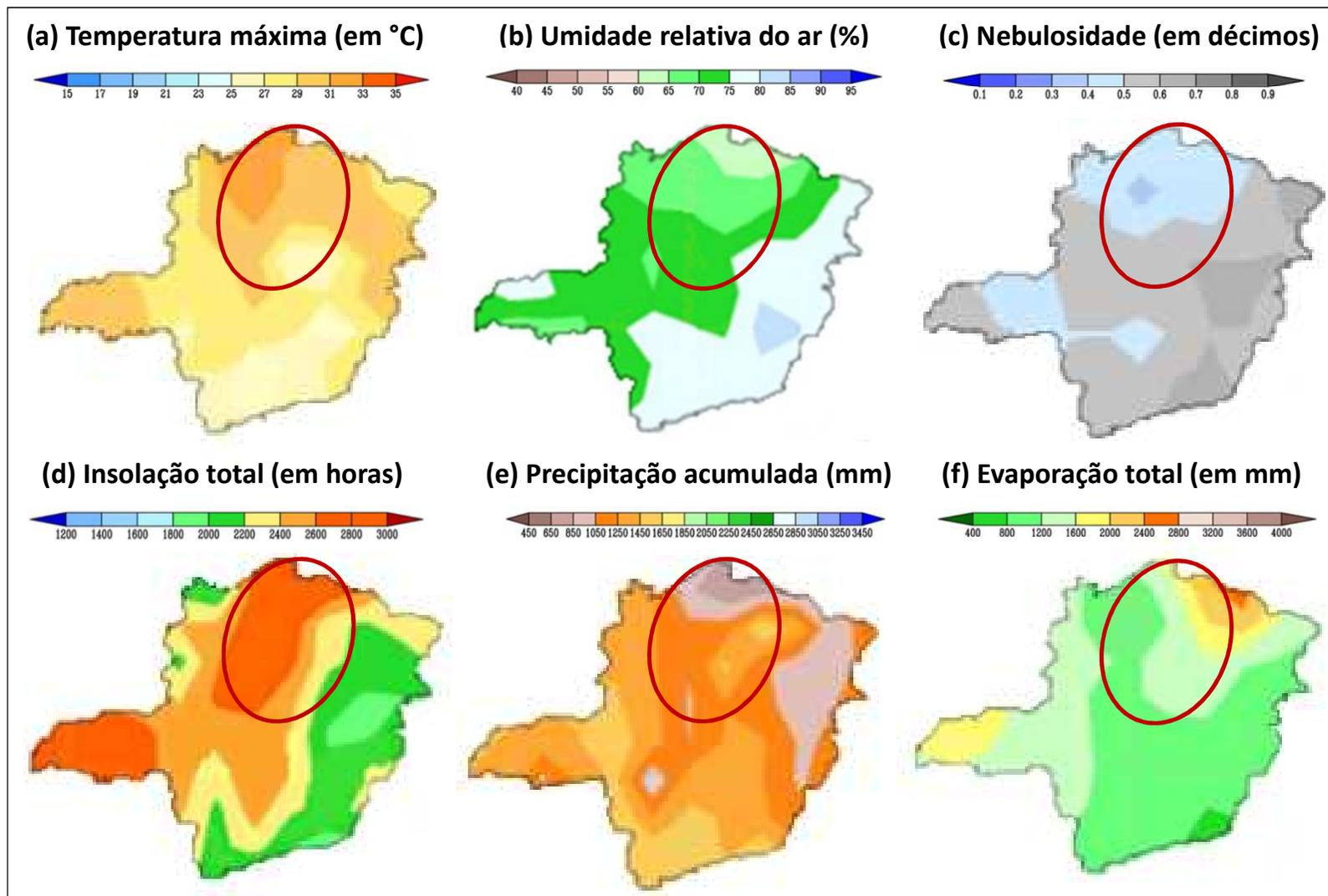
### CLIMA

A mesorregião do Norte de Minas tem clima semiárido, sendo suscetível à seca com quase 10% do território pertencente ao polígono das secas com chuvas escassas. As características que predominam na maior parte da região de monitoramento são: precipitação baixa (acumulada < 900 mm/ano e média anual entre 600 e 1.400 mm), temperaturas altas (média anual de 24°C, média máxima de 32°C e média mínima de 18°C), e índice de nebulosidade baixo, com grande incidência de radiação solar e evaporação estimada de 2.900 mm anuais. A elevada evaporação, em função das altas temperaturas e dos elevados níveis de insolação, juntamente com a baixa precipitação resulta no denominado déficit hídrico, ou seja, taxas de evapotranspiração superam as taxas de precipitação, na maior parte do ano. As regiões com déficit hídrico, caso dos ambientes semiáridos, apresentam maior susceptibilidade à salinização do solo e dos aquíferos.

Observam-se duas estações claramente 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. Portanto, além do déficit hídrico, a irregularidade pluviométrica é acentuada e concentrada no período chuvoso (classificação climática de Köppen = Aw, tropical quente, com subtipo predominante = semiárido).

Na Figura 11, são ilustradas as principais características que determinam o clima da região, permitindo uma comparação visual com o restante do Estado. Estão representadas as normais climatológicas de Minas Gerais em um período de 30 anos, mais especificamente das médias de dados anuais no período de 1961 a 1990, cujos dados – temperatura máxima (em °C), umidade relativa do ar (%), nebulosidade (em décimos), insolação total (em horas), precipitação acumulada (mm) e evaporação total (em mm) – são apresentados em escala crescente de valores.

**Figura 11:** Normais climatológicas em Minas Gerais, com destaque para a região monitorada (período de 1961 a 1990).



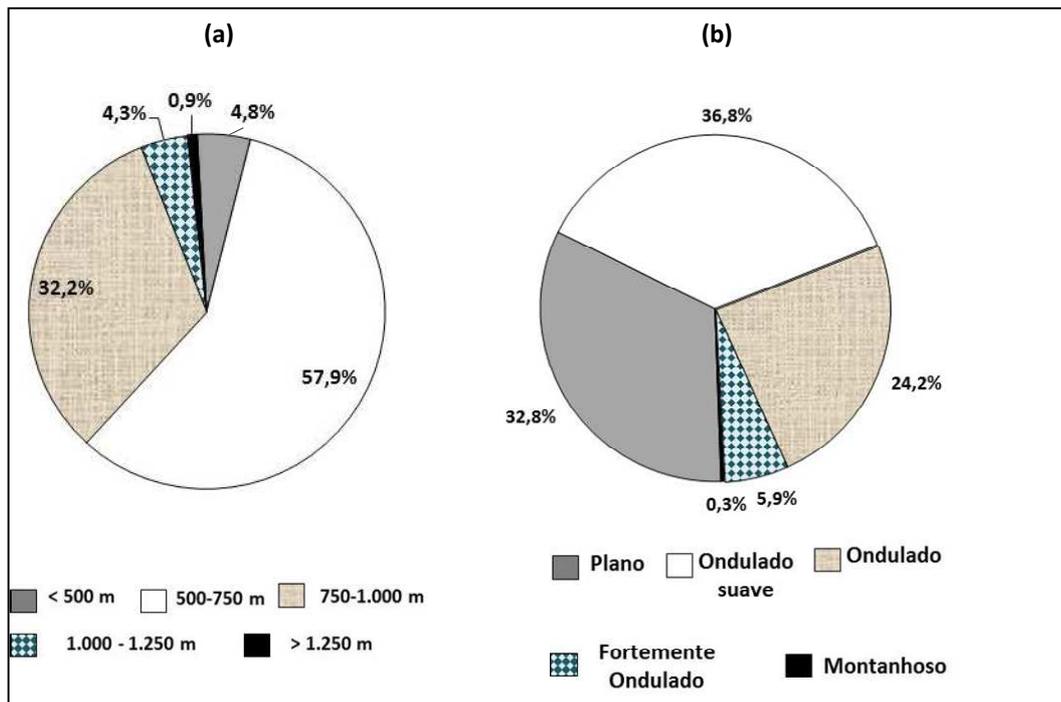
Fonte: adaptado de INMET (2011).

## RELEVO

Na região Norte de Minas, ocorrem extensas áreas aplainadas e dissecadas, superfícies onduladas, colinas e as áreas de relevo cárstico peculiar, como dolinas e uvalas, resultantes de processos morfoclimáticos. Há ainda os planaltos ou relevos tabulares predominantemente areníticos entrecortados por cabeceiras de drenagem pouco aprofundados, regionalmente denominados de chapadas.

Na Figura 12, é mostrada a distribuição percentual das classes hipsométricas e clinográficas da bacia do rio São Francisco, no cerrado mineiro, que indica a prevalência de altitudes na faixa entre 500 e 750 m e de relevos ondulado suave, plano e ondulado, nesta ordem.

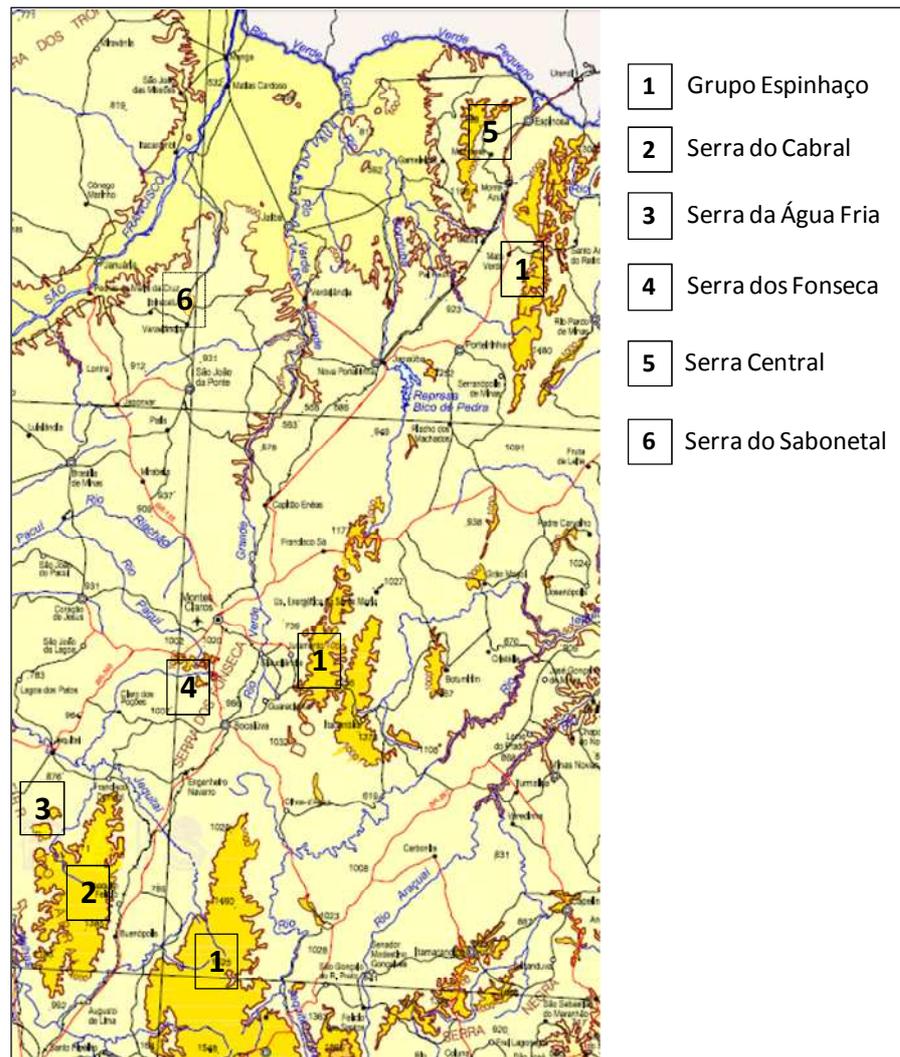
**Figura 12:** Gráfico de pizza mostrando a distribuição percentual por área das classes (a) hipsométricas e (b) clinográficas da bacia do rio São Francisco.



Fonte: extraído de SILVA & ROSA, 2009.

As principais unidades do relevo da região de estudo são mostradas na Figura 13.

**Figura 13:** Mapa do IBGE com destaque para as principais unidades morfoestruturais do relevo das sub-bacias do rio Jequiitá e do rio Verde Grande.



Fonte: extraído e adaptado de IBGE, 2012-a e de Chemale *et al.*, 2011.

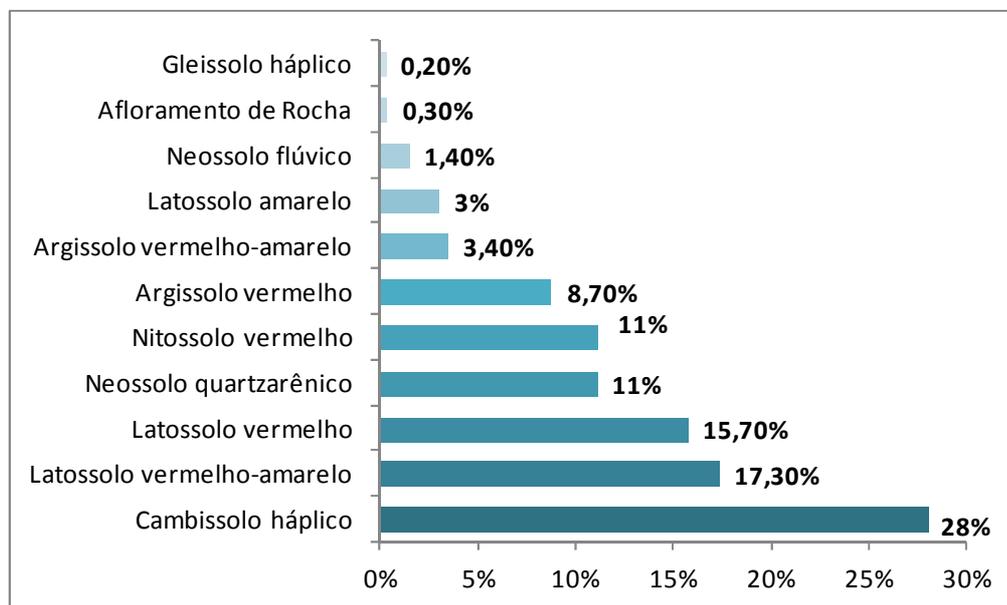
A partir da figura anterior, observa-se que as elevações da serra do Cabral constituem um importante divisor de águas entre a sub-bacia do rio das Velhas e a sub-bacia do rio Jequiitá. Também se observa outro divisor de águas entre a SF6 e a SF10 que é a serra dos Fonseca. Na sub-bacia do rio Verde Grande, 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.

## PEDOLOGIA

De modo geral, os solos predominantes na área da bacia do rio São Francisco compreendem os Latossolos amarelos, Latossolos vermelhos e Latossolos vermelho-amarelos, os quais abrangem, conjuntamente, 36% da área da bacia. Em seguida, destaca-se a classe de Cambissolo háplico com 28% da mesma área. Na Figura 14 estão resumidos

os tipos de solos encontrados na área do Cerrado mineiro da bacia do rio São Francisco e os respectivos percentuais.

**Figura 14:** Gráfico de barras mostrando a distribuição percentual, por área, das classes de solo, segundo classificação SiBCS (1999), no cerrado mineiro da bacia do rio São Francisco – área total de 208.146,7 km<sup>2</sup>.



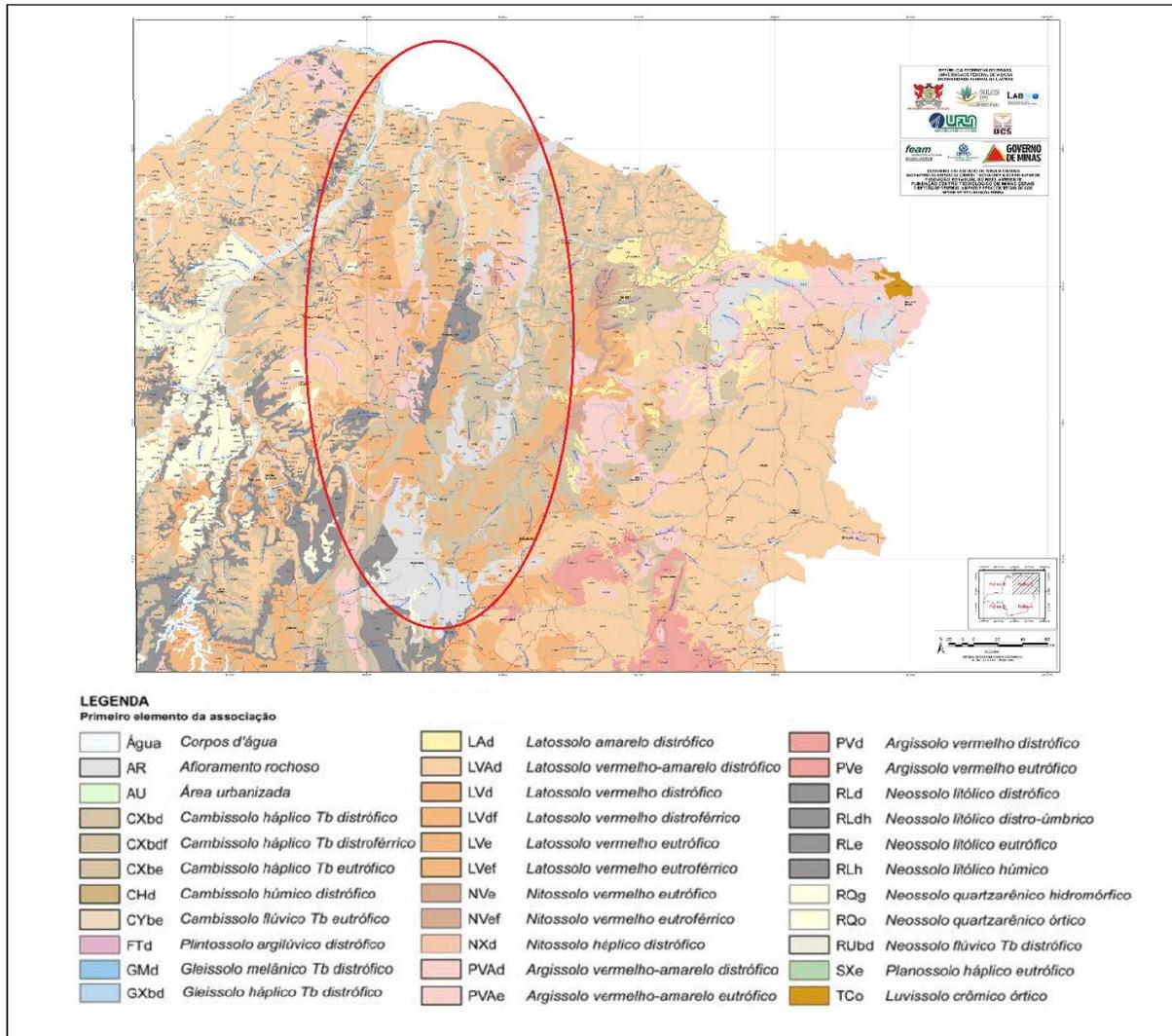
Fonte: extraído de SILVA & ROSA, 2009.

Os latossolos vermelhos são ricos em óxidos de ferro e os latossolos amarelos ricos em alumínio; ambos são, geralmente, pouco hidromórficos. Os solos de textura média (30- 35% de argila), caso dos latossolos, possibilitam drenagem adequada, apresentam boa capacidade de retenção de água e nutrientes disponíveis para as plantas. Os argissolos de textura média a argilosa são geralmente férteis e são indicados para as atividades agropastoris. Entretanto, ocorrem em menor extensão. Os cambissolos são solos de menor profundidade que se situam nos mais variados tipos de relevo, desde o suave até o montanhoso. Sua fertilidade natural é muito variada, sendo utilizados para o plantio de diversas culturas agrícolas, de pastagens e de reflorestamento. Solos arenosos (teor de argila inferior a 15%) devem ser evitados para certos cultivos, devido à sua baixa capacidade de retenção de água e nutrientes (KER, 1997; SILVA et al., 2012).

Os solos do cerrado podem ser originados de vários tipos de rochas, como o granito, o arenito, a ardósia, o quartzito e o xisto. Algumas rochas básicas como o basalto e o calcário também podem originar solos de cerrado, devido à lixiviação sofrida ao longo de milhões de ano e resultando no empobrecimento do solo em nutrientes. Na caatinga, predominam os solos rasos, com exposições rochosas ou com abundância de cascalhos (MARTÍNEZ, 2007; SILVA & ROSA, 2009).

Na Figura 15, é mostrado o mapa dos solos da região norte de Minas Gerais, a extensão e distribuição das diferentes classes de solo, e onde se evidencia o predomínio dos latossolos vermelhos, com ocorrências dos demais tipos de solo tratados na referida figura.

**Figura 15:** Mapa de solos da região norte e nordeste de Minas Gerais, com destaque para a região de estudo.



Fonte: adaptado de UFV-CETEC-UFLA- FEAM, 2010.

Conforme mostrado na Figura 15, nas margens do rio Pacuí encontra-se o solo na forma de podzólico vermelho-amarelo. Na porção norte da sub-bacia encontram-se solos do tipo argiloso vermelho eutrófico especialmente nas áreas banhadas pelo rio Paracatu e riachos Angico e Tiririca. Na porção central da sub-bacia há maior presença de latossolos vermelho-amarelos distrófico, argilosos vermelhos eutróficos e neossolos distrófico. Na porção sudoeste e nas margens do rio São Francisco, prevalecem latossolos vermelho-amarelo distrófico; na porção oriental são predominantes os latossolos vermelho-amarelo distrófico; e na porção ocidental (margem esquerda do rio São Francisco) predominam Latossolos Vermelho-Amarelo, Cambissolos, Gleissolos e Neossolos Litólicos (CBH JEQUITAÍ E PACUÍ, 2010).

As características dos solos, no que se refere à composição granulométrica (proporção de argila, silte e areia) estão intimamente relacionadas com a estrutura, à consistência, à permeabilidade e à capacidade de retenção de água. Estas características associadas aos fatores climáticos (precipitação, temperatura média, etc.) determinam o potencial de ocupação dos mesmos com culturas apropriadas.

## BIOMAS

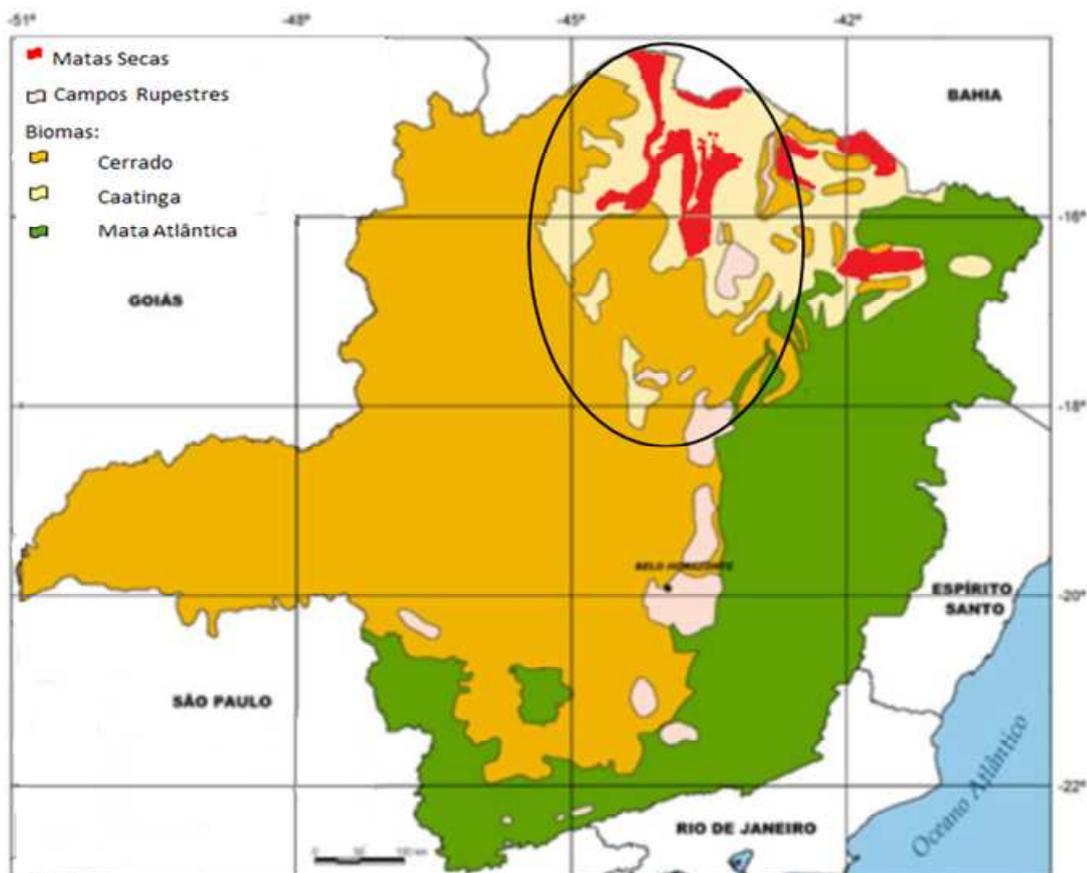
Clima, topografia e solo condicionam a vegetação natural, uma vez que determinam os nutrientes, composição orgânica e o volume de água retido no solo e disponível para as plantas. Em função disso predominam, na área monitorada, dois tipos principais de vegetação, a saber:

- 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. Dentre as espécies vegetais que podem ser encontradas neste ambiente estão: o barbatimão (*Stryphnodendron*), Caviuna (*Dalbergia miscolobium*), Murici (*Byrsonima collolobifolia*), a gabioba (*Campomanesia pubescens*), o pequiheiro (*Caryocar brasiliense*), o araçá (*Psidium araca*), a sucupira (*Bowdichia nitida*), dentre outras. A distribuição do Cerrado, por sua vez, não se apresenta homogênea ao longo de sua extensão. Dependendo de sua concentração e das condições de vida do lugar, o Cerrado pode apresentar tipologias fisionômicas diferenciadas denominadas: Cerradão, Cerrado típico, Campo Sujo, Campo Limpo, Campo Cerrado, Campo Rupestre, Mata Seca ou Mata Mesofítica, Mata de Galeria e Vereda.
- 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 que predomina na região de estudo com ocorrência de cactáceas e bromeliáceas, especialmente em solos rasos, com exposições rochosas ou com abundância de cascalhos. As espécies arbóreas são caducifólias - perdem as folhas no período crítico da estiagem, assemelhando-se à vegetação morta e proporcionando um aspecto esbranquiçado à paisagem. Contudo, com as primeiras chuvas da estação úmida, as pequenas folhas de árvores e arbustos (seu tamanho reduzido visa à economia de água) retornam com grande rapidez, recuperando o

viço. As plantas xerófitas, típicas dos ambientes secos, podem apresentar caules ou raízes, que armazenam água, folhas pequenas com uma cobertura de cera ou reduzidas a espinhos (cactos) para diminuir a evaporação, e ainda, raízes que se aprofundam bastante no solo para buscar lençóis freáticos. Essas são adaptações morfológicas dessas plantas para o clima árido. As espécies mais comuns são macambiras (*Bromelia laciniosa*), umbuzeiros (*Acrocomia aculeata*), palmas (*Gladiolus hortulanus*), xique-xiques (*Crotalaria incana*), mandacarus (*Cereus giganteus*), juazeiros (*Ceiba pentandra*), dentre outras. Algumas espécies, de caule suculento servem de reserva de água e alimento para sertanejos e suas criações.

A Figura 16 mostra as formações vegetais e os biomas no Estado, com destaque para a região monitorada, onde predominam, claramente, o Cerrado e a Caatinga, com manchas de Mata Seca e de Campos rupestres.

**Figura 16:** Mapa de formações vegetais e biomas do estado de Minas Gerais, com destaque para a área monitorada.



Fonte: Adaptado de IGA, 2010 e de Espírito Santo e colaboradores, 2008.

As Matas Secas constituem as áreas de transição entre o Cerrado e a Caatinga e os Campos de Altitude ou Rupestres, encontrados nas áreas mais elevadas (serras) caracterizam-se por uma cobertura vegetal de menor porte com uma grande variedade de

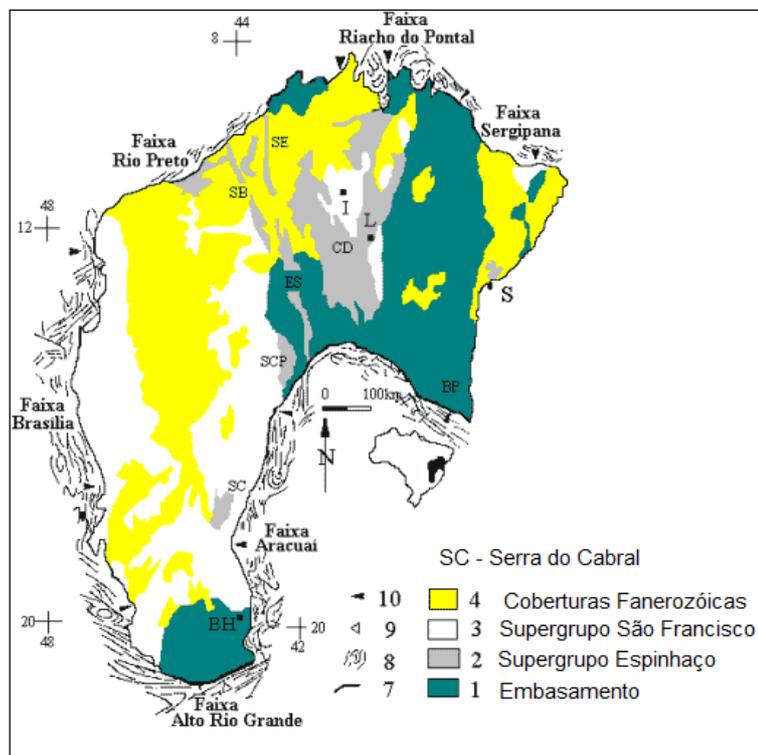
espécies, com predomínio da vegetação herbácea, na qual os arbustos são escassos e as árvores raras e isoladas. Há ainda as matas ciliares (ou matas de galerias nas margens de cursos d'água) onde a cobertura aluvio-coluvionar e o solo são mais espessos e férteis e, portanto, a vegetação arbustiva é de maior porte.

A cobertura vegetal intercepta água da chuva, proporcionando condições de infiltração e, portanto, de recarga dos aquíferos, além de reduzir o escoamento superficial. Dentre as várias funções da vegetação, pode-se citar: a) proteção do solo contra erosão; b) proteção dos aquíferos contra fontes poluidoras, por meio da filtragem e retenção de sedimentos, nutrientes, agrotóxicos e outros produtos químicos; e c) manutenção da infiltração das águas da chuva no solo, evitando inundações e contribuindo para o reabastecimento dos lençóis freáticos. As áreas antropizadas nos vales do São Francisco e do Parnaíba correspondem a 24,8% da área total, segundo a Codevasf.

### GEOLOGIA/HIDROGEOLOGIA

A área monitorada situa-se na Província do Cráton do São Francisco, extensa região do continente Sul-americano, que possui estabilidade geológica desde sua consolidação, a partir de níveis crustais no Arqueano e Paleoproterozóico. A conformação geográfica atual firma-se a partir da quebra do Continente Gondwana. Em Minas Gerais, o Cráton do São Francisco é limitado por cinturões orogênicos do Araçuaí a leste e Faixa Brasília a oeste e sul – Figura 17.

**Figura 17:** Mapa simplificado do Cráton de São Francisco.

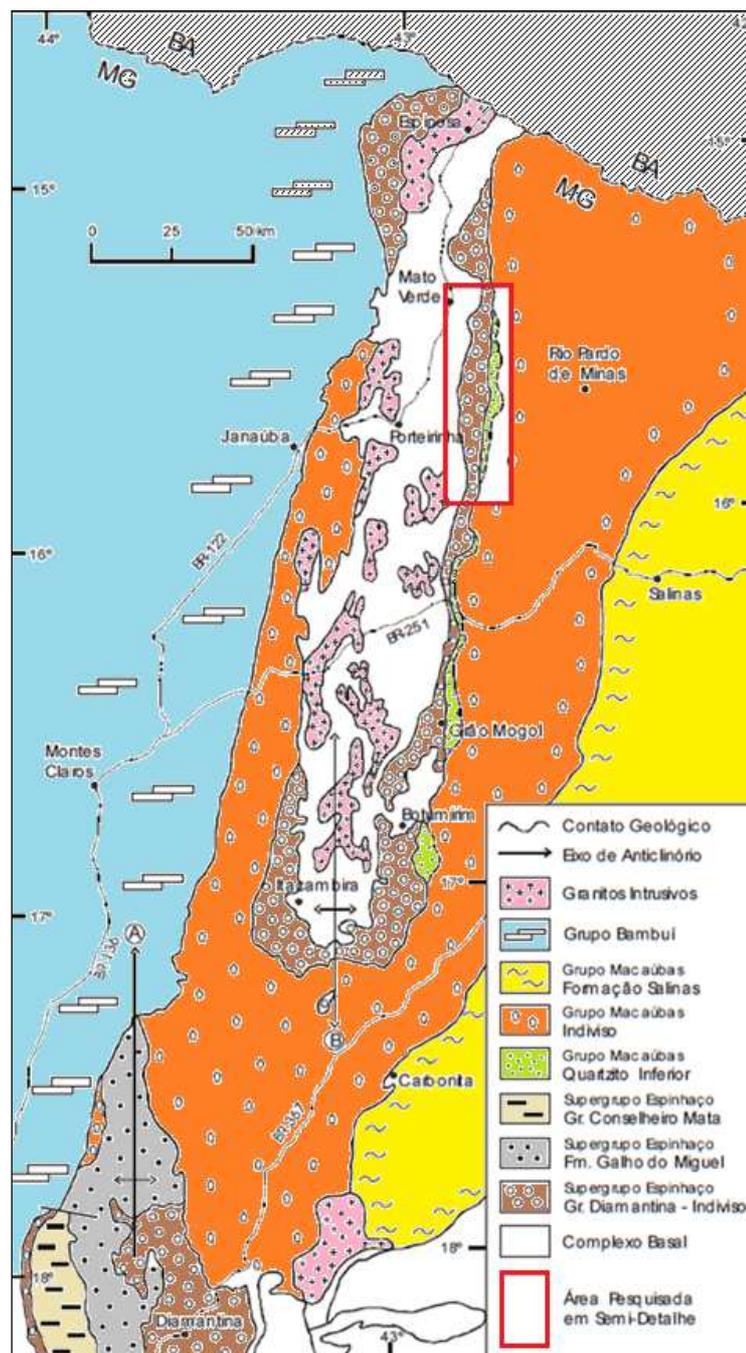


Fonte: Adaptado de Allkmim e Marshak, 1998.

A geologia da região é complexa e 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 – ver Figura 18.

As unidades do supergrupo Espinhaço, representadas por metassedimentos, ocorrem na borda leste, na serra do Espinhaço, bem como, em serras isoladas da região: serra do Cabral, serra da Água Fria e serra Central.

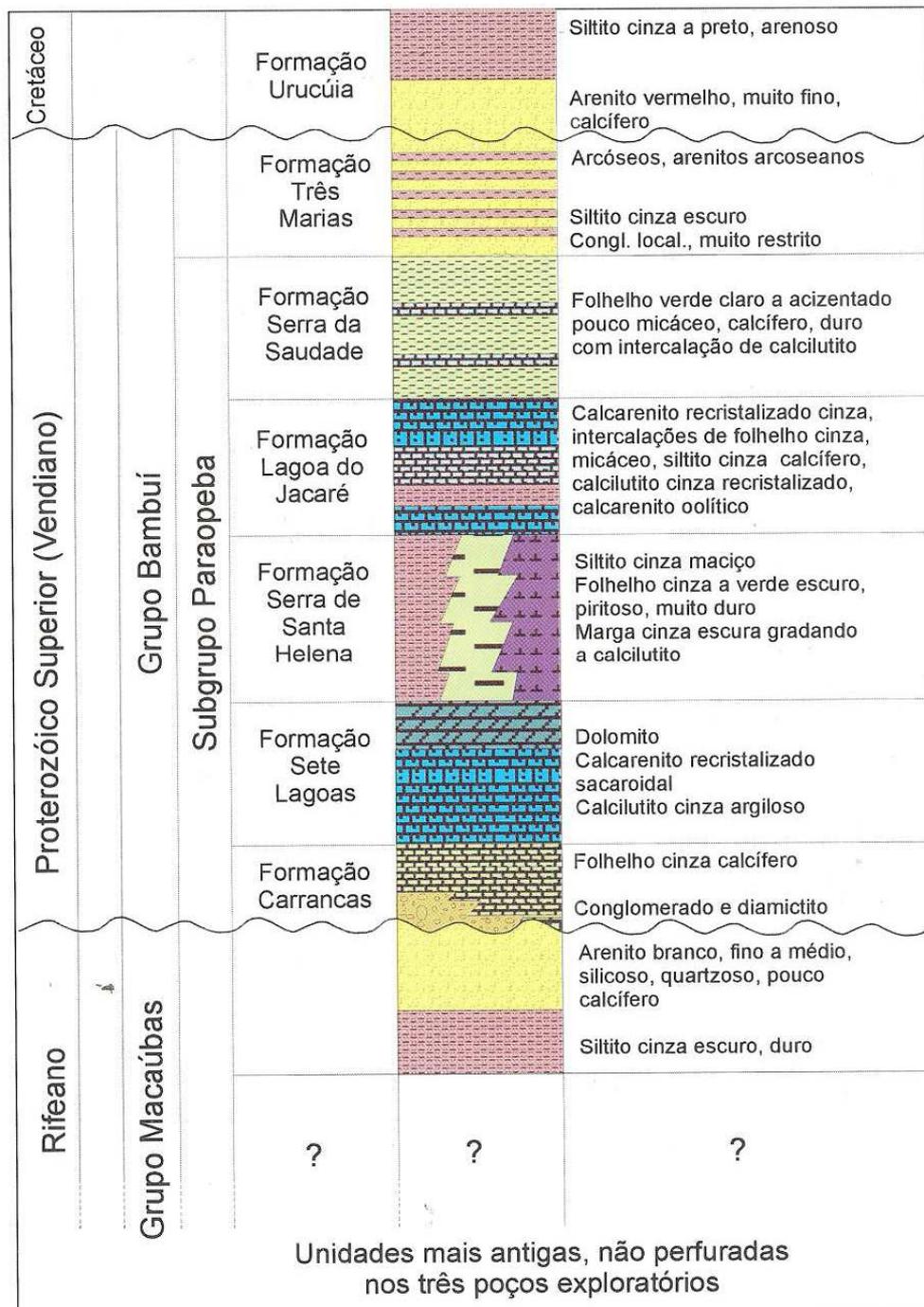
**Figura 18:** Mapa geológico simplificado de parte da região Norte de Minas.



Fonte: adaptado de EGGER, 2006.

As seqüências da plataforma carbonática do supergrupo São Francisco, representadas pelo grupo Bambuí, que se encontram sotopostas por coberturas fanerozóicas, compõem as principais unidades estratigráficas, as quais são ilustradas na Figura 19. As formações do grupo Bambuí são constituídas por sedimentos de origem carbonática, caracterizados por cálcarios e dolomitos, margas, folhelhos, siltitos e folhelhos sílticos (PINTO, C.P. & MARTINS-NETO, 2001). Nas unidades estratigráficas, está localizada a maioria dos poços tubulares da área da rede de monitoramento.

**Figura 19:** Coluna estratigráfica do Grupo Bambuí, incluindo Formação Carrancas.



Fonte: Pinto, C.P. & Martins-Neto, 2001.

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. Os estágios de sedimentação são (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.

O uso da água subterrânea é muito difundido na mesorregião Norte de Minas. Isso se deve aos fatores climáticos, alto índice de evaporação e às condições propícias à infiltração e circulação de água, principalmente nas áreas de domínio dos aquíferos cársticos e cárstico-fissurado formado por rochas do grupo Bambuí, que é também o aquífero mais explorado (PINTO, C.P. & MARTINS-NETO, 2001). Os sistemas aquíferos formados pelas rochas do grupo Bambuí são heterogêneos e anisotrópicos em função da presença de calcita e dolomita, cuja dissolução é responsável pelo desenvolvimento de condutos de fissuras e condutos de diferentes proporções, por onde a água subterrânea pode circular.

Na região de Verdelândia e Varzelândia as rochas calcáreas são mais puras e podemos observar feições típicas do relevo cárstico; a rede de drenagem superficial é menos densa, fato relacionado à maior permeabilidade dos terrenos, o que corrobora também para a existência de vários cursos d'água intermitentes.

Nas UPGRH SF6, SF9 e SF10 podem ser diferenciadas quatro tipologias de sistemas aquíferos: sistema aquífero granular, representado por sedimentos fanerozóicos; o sistema aquífero cárstico; sistema aquífero cárstico-fissurado das rochas pelítico-carbonáticas do Grupo Bambuí; e sistema aquífero fissurado formado por rochas metapelíticas e xistosas dos grupos Bambuí, Macaúbas e da Formação Jequitai. A Tabela 5 apresenta, de forma resumida, as principais características hidrodinâmicas dos sistemas aquíferos na área:

**Tabela 5:** Resumo das características dos sistemas aquíferos nas UPGRHs SF-6, SF9 e SF-10, conforme “Caracterização Hidrogeológica da Porção Mineira da Bacia do São Francisco” (Adaptado de PINTO, C.P. & MARTINS-NETO, 2001).

SISTEMA AQUÍFERO	TIPOLOGIA	LITOLOGIA	ASPECTOS HIDRODINÂMICOS
<b>Sistema Aquífero Granular</b>	Aquífero em Sedimentos Aluviais	Depósitos fluviais composto de siltes, areias, argilas e cascalhos	Aquíferos do tipo livre; espessura média saturada 5-10 m; condutividade: 0,28 a 23 m/dia em areia fina a grossa; e 0,02 a 0,11 m/dia em camadas siltosas. Capacidade específica (média de cinco poços) 1,64 m <sup>3</sup> /(h x m). Há possibilidade de conexão hidráulica com aquíferos subjacentes. Sofre influência significativa dos efeitos da evapotranspiração, devido à baixa profundidade.
	Aquíferos colúvio-eluviais	Coberturas terciário-quartenárias, que podem estar associadas a terraços aluvionares. Material composto de areias, argilas, cascalho e canga que formam o manto de alteração.	Aquíferos do tipo livre; espessura média: 10 metros (localmente 100 metros); porosidade eficaz: 10%; capacidade específica: média 1,19 m <sup>3</sup> /(h x m) e transmissividade: 33 m <sup>2</sup> /dia.
	Aquíferos areníticos	Arenitos, conglomerados e associações com vulcanitos e pelitos do Cretáceo pertencentes ao Grupos Uruçuaia, Mata da Corda e Areado.	Aquíferos livres; espessura média: 160 metros; porosidade eficaz: 10%; capacidade específica média: 2,09 m <sup>3</sup> /(h x m) e transmissividade média: 58 m <sup>2</sup> /dia.
<b>Sistema Aquífero Cárstico</b>	Aquífero de rochas carbonáticas	Rochas predominantemente de composição cálcarea, rochas carbonáticas mais puras com porosidade secundária desenvolvida. Fácies carbonáticas do Grupo Bambuí - Subgrupo Paraopeba	Aquífero do tipo livre, confinado a semi-confinado, em conformidade ao condicionamento da litologia das formações do grupo Bambuí; alta anisotropia, com reflexo na variabilidade dos valores relativos à hidrodinâmica. As feições de dissolução mais expressivas nas camadas de maior espessura. Transmissividade: 233 a 7700 m <sup>2</sup> /dia e capacidade específica: 12,74 m <sup>3</sup> /dia.
<b>Sistema Aquífero Cárstico-fissurado</b>	Aquífero de rochas pelito-carbonáticas	Rochas do Grupo Bambuí: margas, siltitos ardósias com intercalações de calcareo. Fácies pelito-carbonática	Aquífero livre, confinado a semi-confinado e de maior expressividade em extensão territorial. Transmissividade média: 2,3 a 506 m <sup>2</sup> /dia, com média de 109 m <sup>2</sup> /dia. Capacidade específica: 2,23 m <sup>3</sup> /dia.
<b>Sistema Aquífero Fissurado</b>	Aquífero de rochas metapelíticas e xistosas	Metapelitos do Grupo Bambuí. Formação Jequitaí: Tilitos e diamictitos. Metapelitos e metadiamictitos do Grupo Macaúbas.	Recarga direta (áreas de afloramento) e indireta (drenança). Metapelitos ocupam 10% da área da bacia do São Francisco. Transmissividade hidráulica: 0,17 a 864 m <sup>2</sup> /dia e capacidade específica média: 0,85 m <sup>3</sup> /(h x m).
	Aquífero de rochas quartzíticas	Quartzitos, metarenitos e metaconglomerados da Formação Três Marias (G. Bambuí)	Recarga direta (áreas de afloramento) e indireta (drenança). Espessura pode atingir 100 m. Em sua área de ocorrência, esse sistema alimenta os aquíferos subjacentes.

Fonte: PINTO, C.P. & MARTINS-NETO, 2001

## ASPECTOS HIDROLÓGICOS E HIDROGRÁFICOS

A bacia hidrográfica do rio São Francisco drena quase metade da área do Estado, cerca de 236.000 km<sup>2</sup>, incluindo as regiões central, oeste, noroeste e norte. 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 cujas águas subterrâneas vêm sendo monitoradas insere-se na região fisiográfica do médio rio São Francisco.

É consenso geral que o desenvolvimento social é dependente do acesso à água potável e ao controle do uso da água como recurso produtivo. Entretanto, o acesso à água nem sempre está diretamente associado com a sua disponibilidade e é preciso ainda progredir muito em relação ao seu uso sustentável e à minimização do desperdício do recurso. Exemplo disso é a própria bacia do rio São Francisco:

- Região do Alto São Francisco (sub-bacia do rio das Velhas): se produz pouco mais de 50% da vazão do rio, onde há geração de grande parte do PIB da bacia, é também onde ocorre desperdício considerável de água nas cidades (estima-se em torno de 40% do total consumido). Ocorre a maior parte da poluição urbana e rural.
- Médio, Sub-Médio e Baixo São Francisco: há comunidades ditas isoladas, localizadas às margens do rio ou nas proximidades que não são beneficiadas pela disponibilidade hídrica, sendo que muitas não têm ainda acesso à água potável e apresentam baixo nível de desenvolvimento econômico.

No sentido de amenizar os problemas decorrentes do acesso restrito à água, algumas medidas, que podem ser associadas entre si, são recomendadas por especialistas:

- Incentivo e viabilização do armazenamento superficial.
- Aproveitamento adequado de fontes alternativas, tais como as águas subterrâneas e as águas pluviais.
- Aperfeiçoamento das técnicas de irrigação e de drenagem.
- Incentivo e viabilização do reúso.

Um importante divisor hidrográfico é a Serra do Espinhaço, cujo encurvamento é refletido no traçado do conjunto formado pelo rio São Francisco e seus mais importantes afluentes da margem direita. A drenagem superficial é composta por duas nervuras hidrográficas que se integram totalmente durante a estação chuvosa: uma drenagem perene no fundo dos vales, e uma trama fina e mal definida de caminhos d'água intermitentes nos interflúvios largos. Em função dos fatores climáticos associados às captações subterrâneas, observam-se vales secos, sendo que os cursos de água intermitentes são mais comuns nas áreas mais planas, com baixa produtividade de águas subterrâneas.

As figuras 20, 21 e 22 mostram os principais cursos de água na região monitorada, para cada uma das UPGRH.

Figura 20: Mapa de localização com as principais sedes municipais e cursos de água da SF6 – sub-bacia dos rios Jequitai e Pacuí.

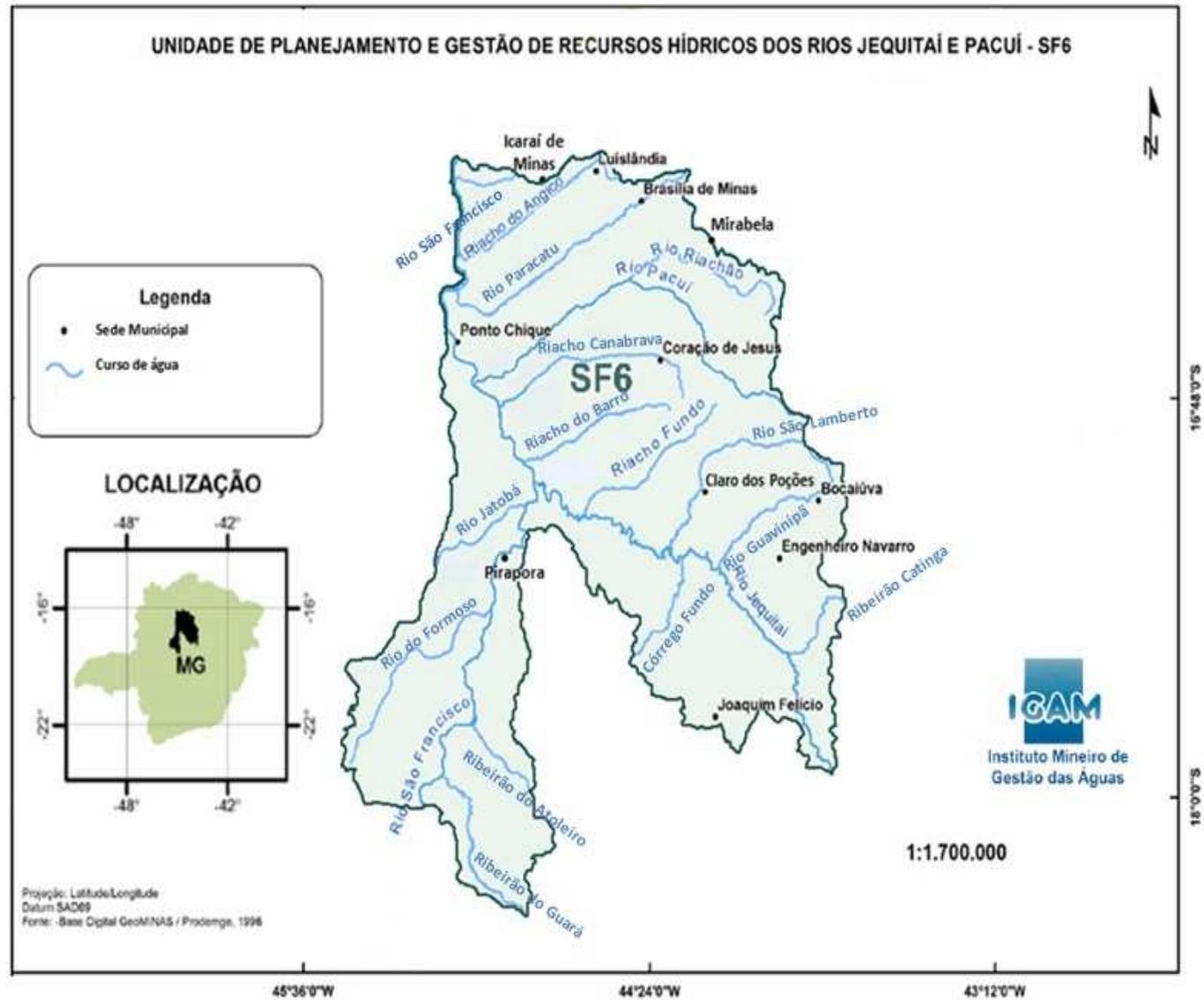


Figura 21: Mapa de localização com as principais sedes municipais e cursos de água da SF9 – sub-bacia do rio Verde Grande.

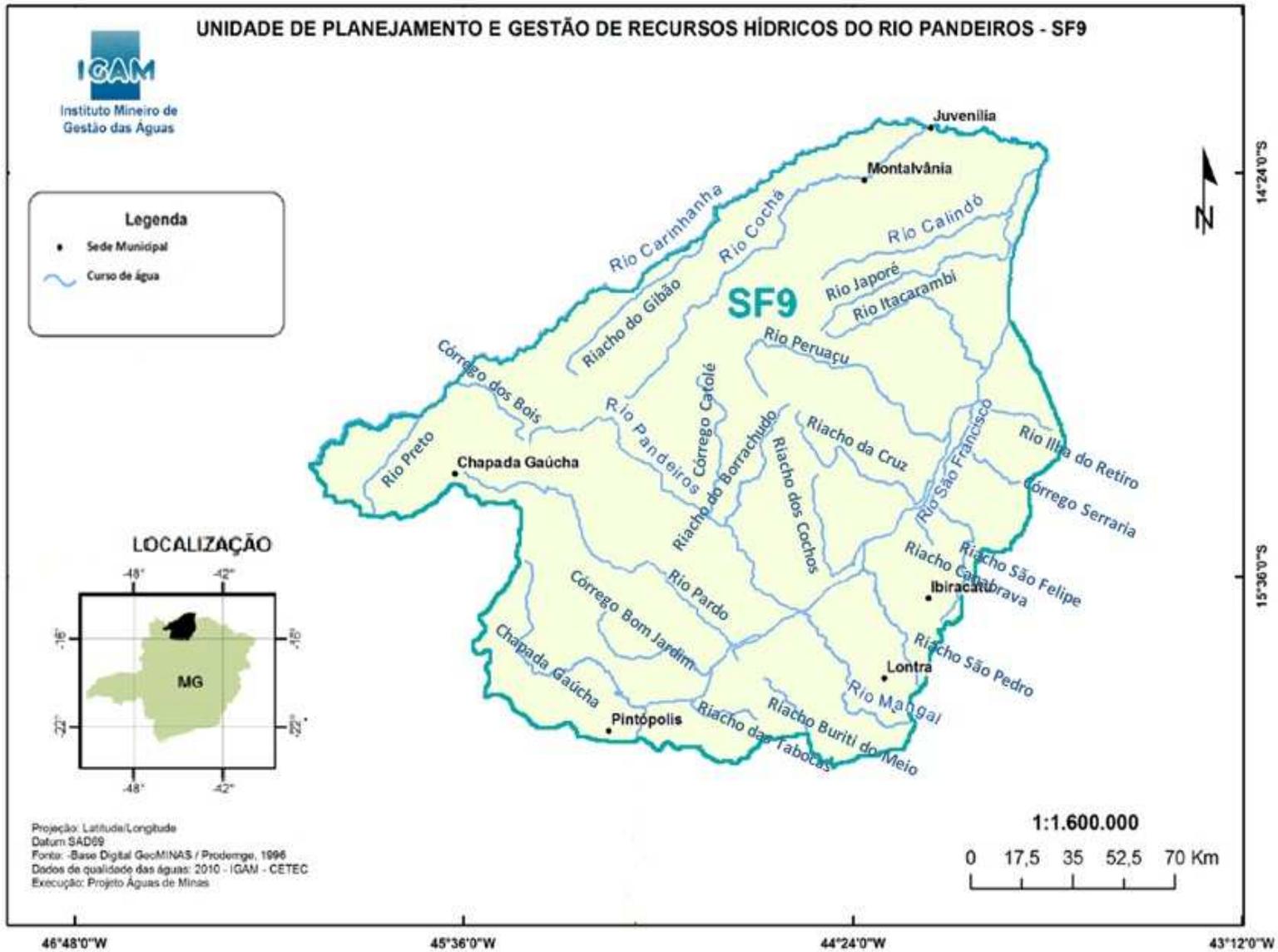
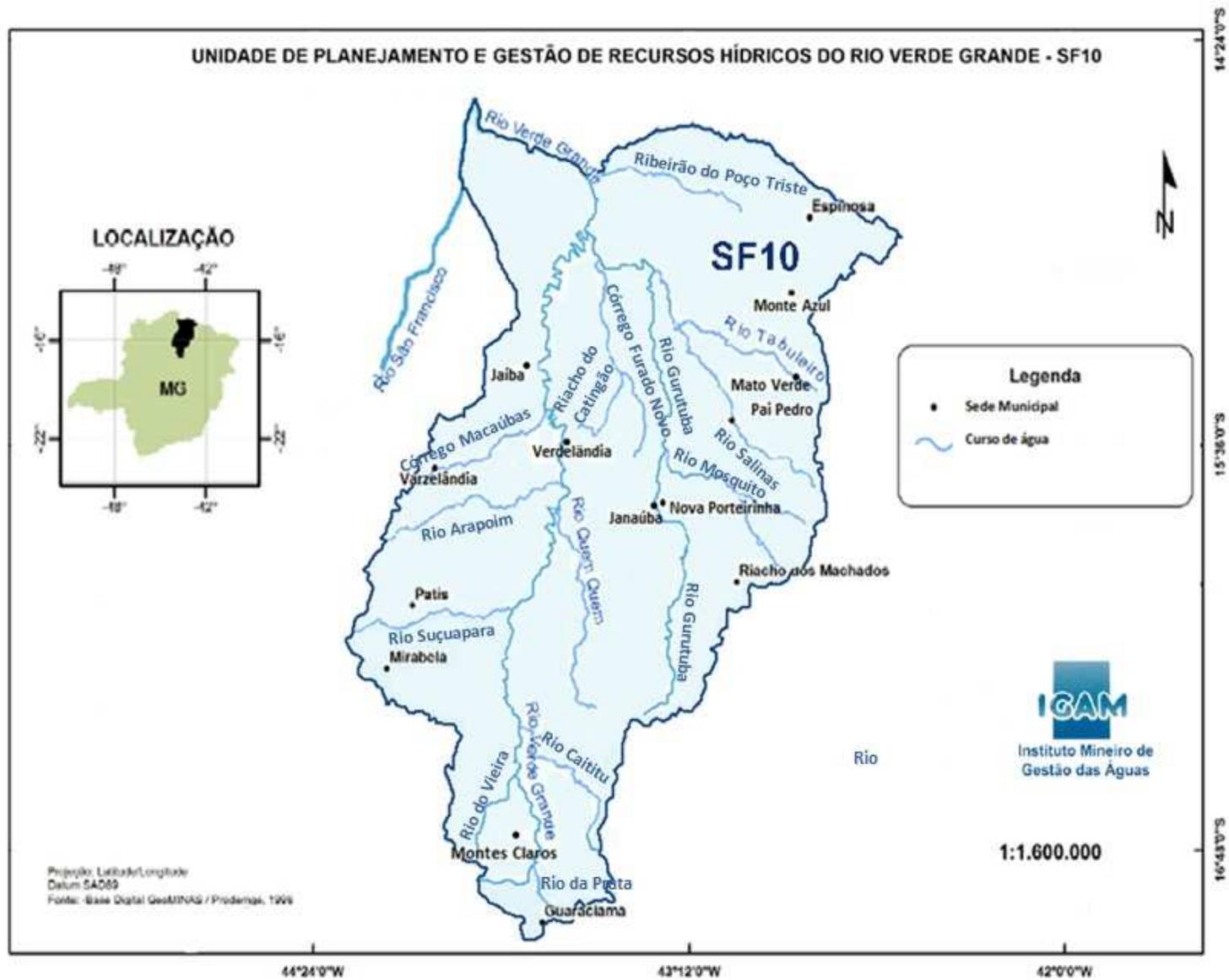


Figura 22: Mapa de localização com as principais sedes municipais e cursos de água da SF10 – sub-bacia do rio Verde Grande.

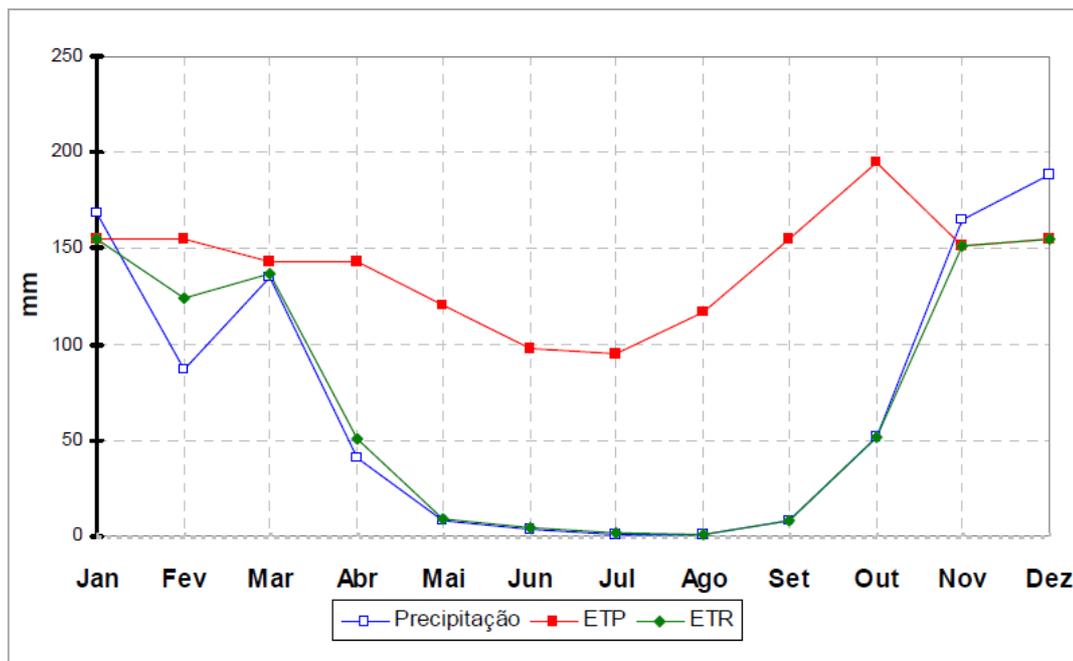


Na região do Norte de Minas, de modo geral, o grau de dissecação é acentuado e a densidade de drenagem é elevada.

Algumas sub-bacias apresentam precipitação menor do que a precipitação média na bacia correspondente. Nestes casos, podem ter contribuição potencial menor do que a área da bacia que elas representam. Este é o caso da SF10 que representa 5% da área da bacia do rio São Francisco e tem contribuição potencial de 4,8%.

Na SF10 e a partir do balanço hídrico, a precipitação corresponde a 50% da vazão total das águas, a evapotranspiração corresponde a 48%, e o escoamento superficial e subsuperficial é de 2% (UFV, 2009). Estudos mostram que há diminuição da precipitação efetiva do sul (cabeceira do rio das Velhas) para o norte (na sub-bacia do rio Verde Grande). Já a evapotranspiração real varia menos espacialmente, mas ainda assim apresenta valores menores (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. O excedente hídrico apresenta os menores valores (< 50 mm/ano) ao norte da região monitorada, sendo que, em direção às bordas leste (encostas da serra do Espinhaço) e oeste (afluentes da margem esquerda do rio São Francisco), observam-se 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. Costa (2011) apresenta um extrato do balanço hídrico mensal no período de 1996-2006 para uma estação meteorológica localizada em Mocambinho, município de Jaíba, MG, que ilustra um déficit hídrico de até 822 mm/ano e um período do excedente hídrico em torno de três meses (novembro a janeiro), conforme Figura 23.

**Figura 23:** Balanço hídrico Normal Mensal – estação de Jaíba – período de 1996 a 2006 – ETP – evapotranspiração potencial e ETR – evapotranspiração real.



Fonte: Silva *et al.* (2008) *apud* Costa (2011).

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 não só às condições climáticas, mas também à escassez de coberturas inconsolidadas. Com base no escoamento subterrâneo total, os valores de infiltração nos sedimentos do sistema intersticial (sobrepuesto ao sistema cárstico) encontram-se entre 10 e 20% da precipitação anual. Estudos na região mostram uma tendência de que a infiltração direta nas áreas de interflúvio seja pouco expressiva em relação à recarga localizada (dolinas), esta última favorecida pelas condições de chuvas intensas concentradas e que promovem elevado escoamento superficial em curto período de tempo. Portanto, a despeito do uso intenso do recurso subterrâneo decorrente da escassez de águas superficiais, o potencial hídrico subterrâneo na região também não é elevado, sendo classificado como médio a baixo. Relatório da ANA aponta reservas explotáveis de  $47 \text{ m}^3/\text{s}$ , no domínio cárstico-fissurado e menciona que a faixa mais comum de vazões dos poços está entre 5 e  $60 \text{ m}^3/\text{h}$  para profundidades, geralmente, entre 50 e 150 m. Além disso, o número de poços improdutivos é relativamente grande.

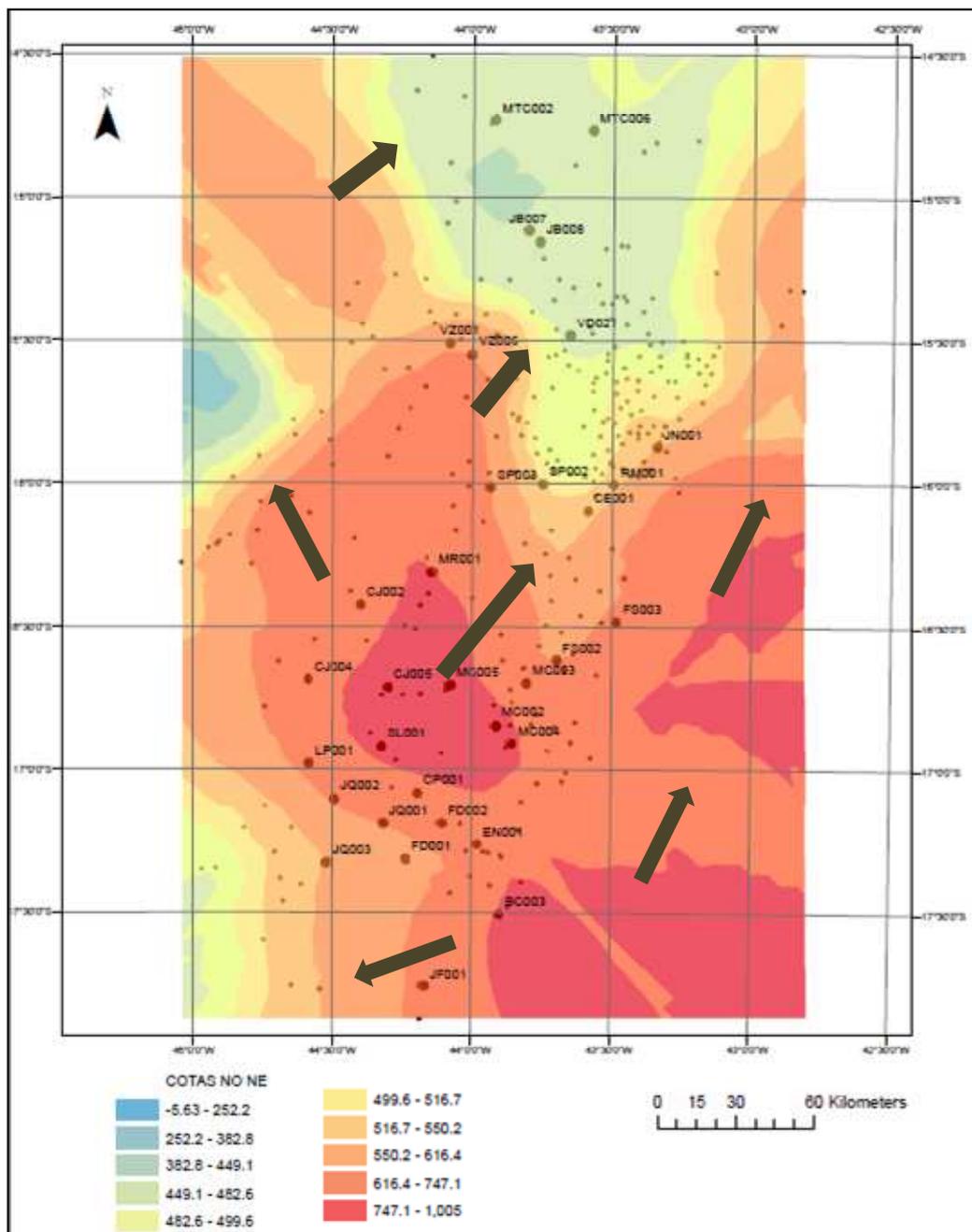
No carste, as águas infiltradas no subsolo pela absorção do escoamento superficial podem voltar à mesma bacia hidrográfica, mais a jusante, ou desviar-se para outra bacia hidrográfica ou outros aquíferos. Isso dificulta estabelecer as relações entre os rios de superfície e os aportes de águas subterrâneas que eles recebem dos aquíferos, as quais variam dependendo da geografia, do clima e da geologia local.

Na região Norte de Minas, mais especificamente nas UPGRH cujas águas subterrâneas são monitoradas, os levantamentos dos níveis estáticos em alguns poços permitiram estimar os sentidos dos fluxos predominantes regionais, os quais são mostrados na Figura 24, obtida a partir dos dados da Tabela 6.

**Tabela 6:** Município, UPGRH correspondente, código do poço, nível estático (em m) medido em relação ao nível do mar e coordenadas geográficas correspondentes.

MUNICÍPIO	UPGRH	CÓDIGO DO POÇO	NÍVEL ESTÁTICO (m)	COORDENADAS GEOGRÁFICAS	
				UTM X	UTM Y
Bacaiúva	SF6	BC003	842	617179	8064287
Capitão Enéias	SF10	CE001	528	651091	8219830
Coração de Jesus	SF6	CJ002	716	564099	8184072
Coração de Jesus	SF6	CJ004	667	544230	8155233
Coração de Jesus	SF6	CJ005	806	574580	8151937
Claro dos Poções	SF6	CP001	619	585892	8111144
Engenho Navarro	SF6	EN001	662	608770	8091241
Francisco Dumont	SF6	FD001	603	581308	8085567
Francisco Dumont	SF6	FD002	649	595259	8099234
Francisco Sá	SF10	FS002	587	639030	8162139
Francisco Sá	SF10	FS003	655	662195	8177189
Jaíba	SF9	JB007	449	628767	8328198
Jaíba	SF9	JB008	445	633270	8323859
Joaquim Felício	SF6	JF001	646	588368	8036066
Janaúba	SF10	JN001	530	678013	8244533
Jequitaiá	SF6	JQ001	591	572701	8099327
Jequitaiá	SF6	JQ002	584	554215	8108889
Jequitaiá	SF6	JQ003	529	551084	8084243
Lagoa dos Patos	SF6	LP001	692	544546	8122538
Montes Claros	SF6	MC002	882	615854	8137257
Montes Claros	SF10	MC003	619	627665	8153391
Montes Claros	SF10	MC004	928	621969	8130298
Montes Claros	SF6	MC005	845	598508	8152769
Mirabela	SF10	MR001	721	591753	8196236
Matias Cardoso	SF10	MTC002	436	616377	8370883
Matias Cardoso	SF10	MTC006	443	653495	8366723
Riacho dos Machados	SF10	RM001	482	661569	8229839
São João da Lagoa	SF6	SL001	793	572146	8129260
São João da Ponte	SF10	SP002	497	633994	8230132
São João da Ponte	SF10	SP003	650	614258	8228969
Verdelândia	SF10	VD021	467	644726	8287781
Varzelândia	SF9	VZ001	778	598396	8264904
Varzelândia	SF10	VZ006	691	607374	8280673

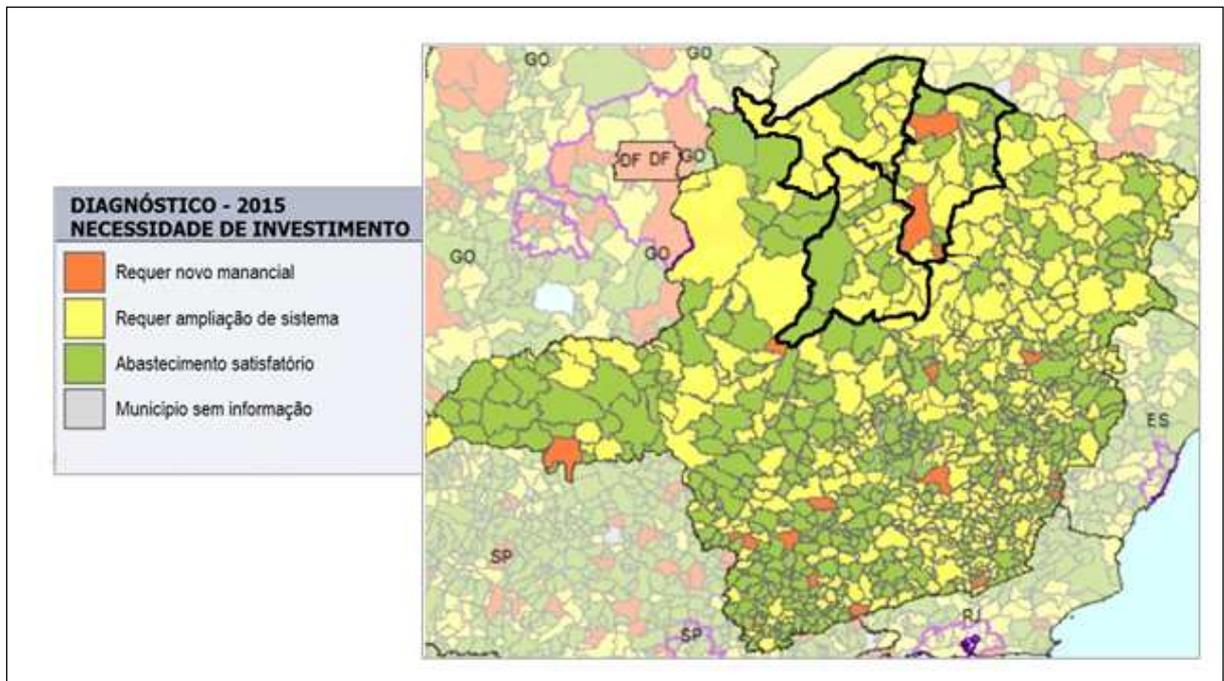
**Figura 24:** Mapa das cotas dos níveis estáticos em 33 poços medidos em períodos chuvosos (campanhas de 2010 a 2012) – por interpolação simples esférica – as setas sobre o mapa indicam os prováveis fluxos regionais em função de gradientes hidráulicos localizados.



## USOS DA ÁGUA

As águas subterrâneas são utilizadas em 20% dos municípios mineiros para fins de abastecimento urbano 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 em Minas Gerais não têm garantidas as demandas futuras ou precisam de ampliação do abastecimento. As UPGRH SF6, SF9 e SF10 (destacados na Figura 25) apresentam quadro semelhante ao restante do Estado, sendo que 64% dos municípios requerem ampliação do sistema de abastecimento de água potável e 5% dos municípios necessitam da exploração de novos mananciais.

**Figura 25:** 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 monitorada.

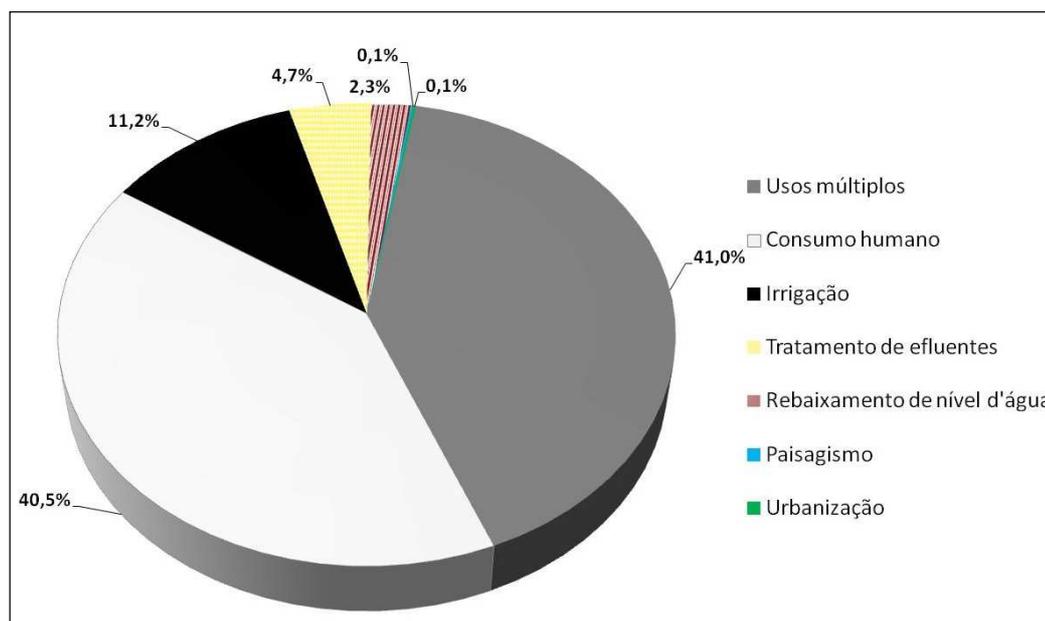


Fonte: Adaptado de ANA, 2012(a).

A importância atual da demanda pelos recursos hídricos subterrâneos nesta região fica evidente a partir dos tipos de mananciais de abastecimento público (superficiais ou subterrâneos) caracterizados pela ANA (2012-a). A partir dos pontos de captação de água bruta, 56% dos municípios da região norte são abastecidos por sistemas isolados de águas subterrâneas (contra 20% no Estado como um todo). O uso da água subterrânea é mais intenso, em Minas Gerais, na bacia do rio Verde Grande e na bacia do rio Riachão (afluente do Pacuí) e em alguns municípios das microrregiões administrativas de Unaí e Montes Claros.

A partir de levantamento realizado pelo IGAM a partir do SIAM – Sistema Informações Ambientais de MG, são mostrados na Figura 26, os principais usos consuntivos obtidos a partir das outorgas para uso das águas subterrâneas, concedidas até o ano de 2012, na região monitorada – UPGRH SF6, SF9 e SF10. Observa-se que a irrigação é a atividade econômica que mais consome água na região. Entretanto, diferentemente de outras regiões do Estado, no norte de Minas, o consumo humano destaca-se significativamente dos demais usos, superando até mesmo a irrigação.

**Figura 26:** Percentuais relativos das vazões outorgadas até o ano de 2012 para uso de águas subterrâneas nas UPGRH SF6, SF9 e SF10, no norte de Minas – vazões outorgadas para uso consuntivo.



Fonte: SIAM, 2012.

Dentre os usos múltiplos estão incluídos dois ou mais dos seguintes usos, tanto consuntivos, como não-consuntivos, combinados: consumo humano, consumo industrial, contenção de taludes, controle de cheias, depuração de efluentes, irrigação, lavagem de veículos, pesquisa hidrogeológica, rebaixamento de nível d'água, recirculação de água, lançamento de efluentes.

### **CAPÍTULO III – QUALIDADE DO AQUÍFERO NAS SUB-BACIAS SF6, SF9 E SF10 NO NORTE DE MINAS**

Em função do elevado número de variáveis naturais e antrópicas que interferem na qualidade físico-química e biológica de determinado aquífero aliado às variações destas variáveis no tempo e no espaço, o conhecimento da hidroquímica e a avaliação da qualidade das águas é tarefa relativamente complexa. Exigem-se levantamentos de longo prazo a partir de medições sistemáticas de diversos parâmetros, cujos resultados compõem, ao longo do tempo, as séries históricas, as quais devem ser representativas.

Considerando a existência de uma série histórica relativamente mais representativa e adequada à análise dos dados de monitoramento, o presente relatório analisa, de forma mais detida, os resultados do monitoramento iniciado em 2005 – denominado monitoramento das águas subterrâneas no Norte de Minas.

No monitoramento da mesorregião Norte de Minas, foram executadas 15 campanhas semestrais, totalizando mais de 30.000 resultados, incluindo análises de agrotóxicos (estas últimas realizadas no ano de 2010). A maior parte dos poços de monitoramento, nesta região, extrai água do sistema aquífero Bambuí. 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).

Um resumo da qualidade hidroquímica das águas subterrâneas nesta região é mostrado a partir da estatística descritiva aplicada aos resultados do monitoramento, no período de 2005 a 2011 (Tabela 7). São apresentados, para cada parâmetro selecionado previamente (conforme item “Parâmetros Monitorados”): as concentrações mínimas e máximas, os percentis 10% e 25%, a mediana (ou percentil 50%), os percentis 75% (ou 3º quartil) e 90%, além da média aritmética, desvio padrão, percentual de outliers, percentual de dados faltantes e de dados censurados. Os valores de dados válidos somados aos censurados (n) variaram entre 315 e 569, lembrando que foram contabilizados os resultados de cada parâmetro para o conjunto de poços de monitoramento no período 2005-2011 (127 poços no total, englobando todos os pontos nas diferentes configurações da rede).

Observa-se a partir da Tabela 7 que, de modo geral, há amplas variações nos valores dos parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas na área de estudo. Essas variações, comumente, 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 físico-químicos envolvidos.

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. A região norte do Estado apresenta três feições hidrogeológicas principais: carste, cárstico-fissurado e fissurado e suas águas refletem bem estes ambientes, onde é feito o monitoramento das águas subterrâneas pelo IGAM. Em áreas de ocorrência de rochas calcárias, caso do sistema aquífero Bambuí, são observados problemas localizados de elevada dureza e de sólidos totais dissolvidos, que podem restringir alguns usos.

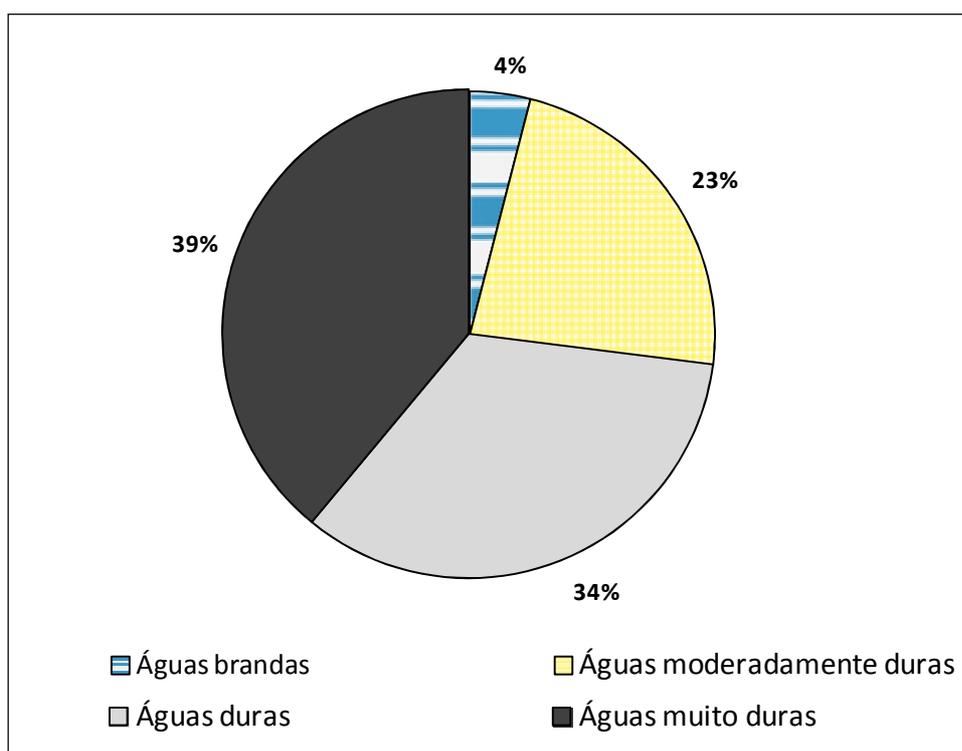
**Tabela 7** – Síntese dos resultados de qualidade das águas subterrâneas – estatística descritiva – para os Aquíferos das UPGRH SF6, SF9 e SF10 – região Norte de Minas no período de 2005 a 2011.

Variável	Nº dados	Mínimo	Percentil 10%	Mediana (Percentil 50%)	3º Quartil (Percentil 75%)	Percentil 90%	Máximo	Média	Desvio Padrão	% Outliers	% dados faltantes	% dados censurados
<b>pH</b>	547	5,1	6,5	7,0	7,4	7,8	8,6	7,1	0,5	2	4,9	0
<b>Condutividade Elétrica - CE (µS/cm)</b>	545	9	288	651	941	1.292	8774	782	593	5	5,2	0
<b>Sólidos totais dissolvidos - STD (mg/L)</b>	568	6	183	448	657	914	2169	528	362	5	1,2	0
<b>Alcalinidade de bicarbonato (mg/L CaCO<sub>3</sub>)</b>	564	7,4	132,0	286,0	331,1	374,2	430,7	267,0	91,0	1	1,9	0
<b>Arsênio (mg/L As)</b>	449	0,0000	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0290	0,0003	0,0017	3	21,9	74,6
<b>Boro (mg/L B)</b>	162	0,00	0,04	0,04	0,08	0,19	0,90	0,09	0,16	3,65	71,8	20,9
<b>Cloreto total (mg/L Cl<sup>-</sup>)</b>	569	0,20	0,79	24,30	65,30	158,80	801,00	64,42	117,08	11	1	4,7
<b>Dureza total (mg/L CaCO<sub>3</sub>)</b>	315	8,0	109,0	235,1	422,1	539,2	1261,0	299,0	207,0	1	45,2	0
<b>Fenóis (mg/L)</b>	521	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,010	0,001	0,001	34	9,4	65,2
<b>Fluoreto (mg/L F<sup>-</sup>)</b>	569	0,10	0,09	0,26	0,41	0,95	6,30	0,44	0,69	14	1	25,6
<b>Fósforo total (mg/L P)</b>	569	0,00	0,01	0,02	0,04	0,08	2,30	0,04	0,12	13	1	31,7
<b>Magnésio dissolvido (mg/L Mg<sup>2+</sup>)</b>	569	0,496	3,068	8,950	15,560	29,940	62,200	12,885	11,856	9	1	0
<b>Nitrato (mg/L NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)</b>	568	0,01	0,02	0,46	1,72	4,73	41,90	1,69	3,27	12	1,2	7,5
<b>Sulfato total (mg/L SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)</b>	569	0,5	2,5	12,3	24,4	61,3	796,0	31,1	70,7	13	1	10,1
<b>Turbidez (NTU)</b>	567	0,1	0,3	1,0	3,0	13,2	477,0	8,4	33,7	15	1,4	5,4
<b>Alumínio total (mg/L Al)</b>	449	0,05	0,05	0,12	0,19	0,33	19,78	0,26	1,10	8	21,9	35
<b>Bário (mg/L Ba)</b>	416	0,003	0,016	0,061	0,111	0,163	1,214	0,089	0,122	3	27,7	1,9
<b>Cálcio dissolvido (mg/L Ca<sup>2+</sup>)</b>	569	0,94	26,90	82,40	130,00	164,36	342,00	94,02	59,74	2	1	0
<b>Chumbo total (mg/L Pb)</b>	449	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,481	0,005	0,024	24	21,9	71
<b>Cobre total (mg/L Cu)</b>	449	0,002	0,002	0,002	0,002	0,006	0,246	0,004	0,013	37	21,9	64,9
<b>Ferro total (mg/L Fe)</b>	449	0,02	0,02	0,12	0,37	1,36	61,40	1,09	4,66	12	21,9	11,5
<b>Manganês total (mg/L Mn)</b>	449	0,002	0,002	0,009	0,044	0,198	4,940	0,074	0,271	16	21,9	23,1
<b>Níquel (mg/L Ni)</b>	449	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,021	0,002	0,001	2,61	21,9	75,5
<b>Potássio dissolvido (mg/L K<sup>+</sup>)</b>	569	0,40	0,97	1,78	2,47	4,57	26,15	2,59	3,06	11	1	0
<b>Selênio (mg/L Se)</b>	162	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0008	0,0131	0,0005	0,0014	3,83	71,8	24,3
<b>Sódio total (mg/L Na)</b>	373	0,35	6,09	20,90	47,90	106,36	376,50	39,13	46,45	7	35,1	0
<b>Zinco (mg/L)</b>	449	0,01	0,03	0,10	0,19	0,35	7,24	0,21	0,48	7	21,9	2,8

Apesar da amplitude elevada observada para as concentrações da maior parte dos parâmetros, predominam algumas características nas águas subterrâneas no Norte de Minas:

- A dureza é elevada, sendo que águas classificadas como muito duras ocorreram em 39% dos poços e as água classificadas com duras correspondem a 34% dos poços monitorados. Considerou-se um dos critérios de classificação mais utilizados, em que as águas muita duras são aquelas com concentrações superiores a 300 mg/L de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), as águas duras estão compreendidas na faixa entre 150 e 300 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ , as águas moderadamente duras estão abaixo de 150 e acima de 50 mg/L  $\text{CaCO}_3$  e em que as águas brandas são aquelas com concentração de  $\text{CaCO}_3$  inferior ou igual a 50 mg/L. A distribuição percentual dos graus de dureza nas amostras analisadas, segundo este critério, é mostrada na Figura 27.

**Figura 27:** Percentuais das águas classificadas de acordo com o grau relativo de dureza.



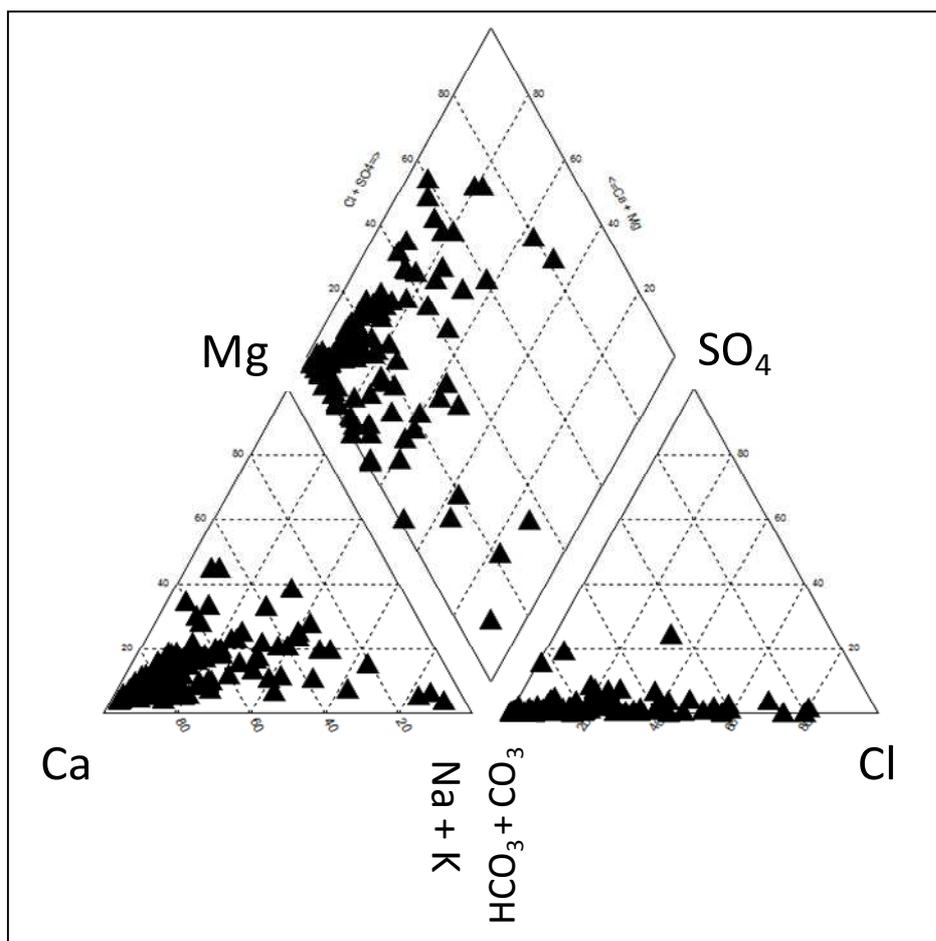
- A salinidade pode ser considerada tolerável, ou seja, as águas apresentam condutividade elétrica com valores menores do que 1.500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  na maior parte dos poços monitorados – 92% do total. Exceção são as águas dos seguintes poços: VD003 com oito medições acima do valor citado; EP001 e FS004 ambos com quatro medições superiores ao valor de referência, PP001 com duas medições e BC001 com uma medição acima do valor de referência.

- Há predominância de águas com caráter neutro a levemente alcalino, pH entre 6,5 e 7,5 (em 45% dos poços). O caráter alcalino, ou seja, com pH acima de 7,5, ocorreu em 34% dos poços, sendo que apenas 0,9% das medições (correspondentes a 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.

Alguns parâmetros, especialmente os metais como bário, zinco, arsênio e selênio apresentaram concentrações relativamente elevadas, de forma mais localizada – em alguns pontos específicos. Em alguns poços, houve concentrações excessivas de nitrato e de fenóis totais.

As classificações das águas, com relação aos íons dominantes, foram feitas a partir de diagrama de Piper, apresentado na Figura 28. O diagrama mostra que predominam as águas do tipo bicarbonatadas cálcicas (86% dos poços). São encontradas também as águas dos tipos: cloretadas cálcicas (7%) e bicarbonatadas sódicas (6%). As cloretadas sódicas e bicarbonatadas magnesianas são a minoria, com 0,5% cada. A sequência mais frequente é:  $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ .

**Figura 28:** Diagrama trilinear de Piper para as medianas das concentrações iônicas nos poços monitorados nas sub-bacias SF6, SF9 e SF10, no período de 2005 a 2011.



Fonte: SOUZA *et al.*, 2014 (no prelo)

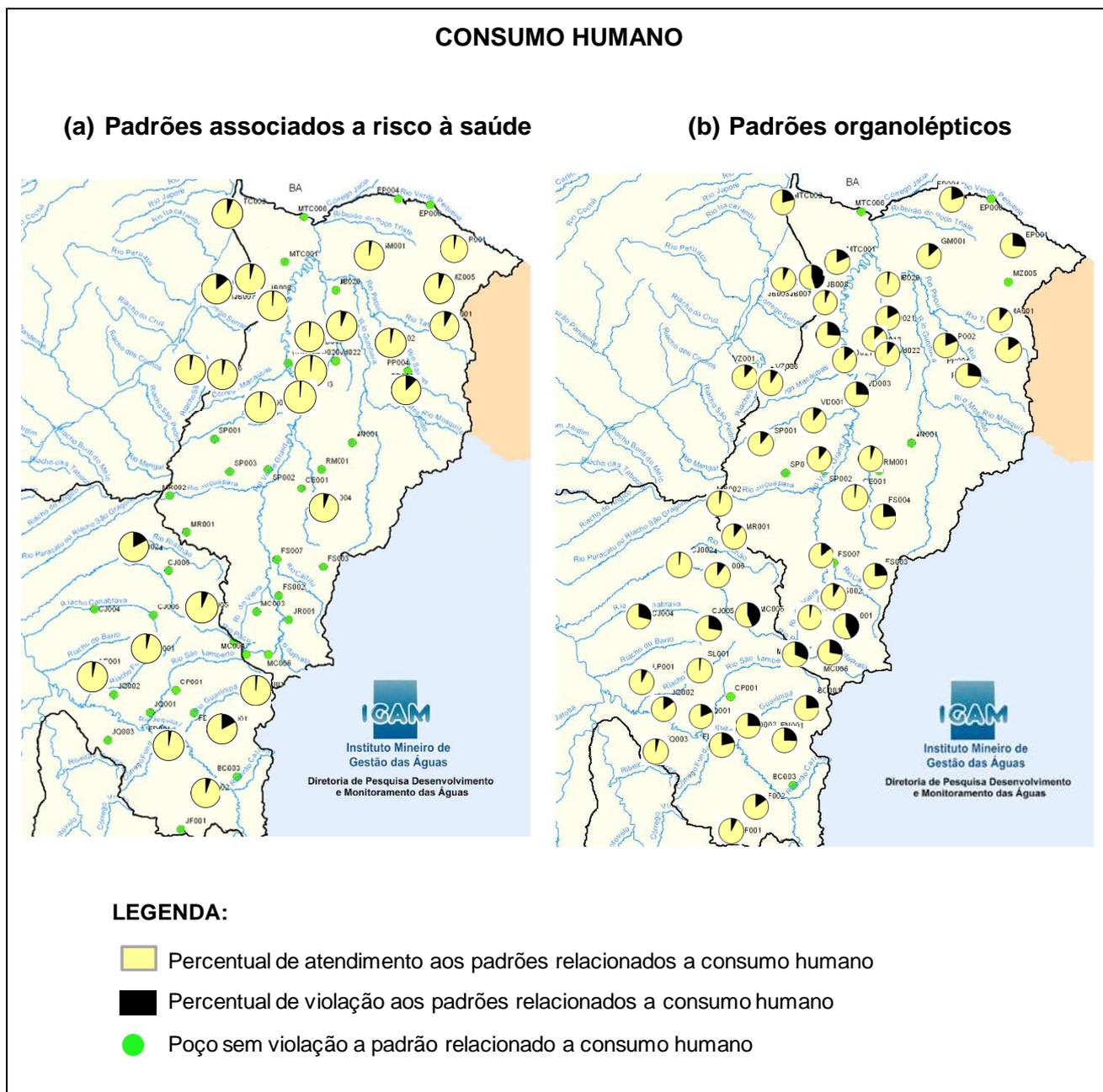
## **ATENDIMENTO A LIMITES LEGAIS PARA DIFERENTES USOS DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NAS UPGRH SF6, SF9 E SF10**

Quanto ao atendimento aos padrões ou limites legais, foram adotados os valores da Resolução Conama 396/2008 e da Portaria de Potabilidade do Ministério da Saúde – nº 2914/2011, conjuntamente. Comparativamente com os limites legais, a avaliação dos resultados obtidos no período 2005-2011 demonstra que, de forma geral, as águas subterrâneas no Norte de Minas não apresentam qualidade adequada para o consumo humano, sendo desejável tratamento prévio ou restrições em alguns casos. Com algumas exceções, a maior parte dos poços (88%) apresenta águas com características organolépticas indesejáveis (aquelas associadas a gosto ou odor desagradáveis e, portanto, relacionados à rejeição da água). Dentre os parâmetros organolépticos mais comuns estão: ferro, alumínio, manganês, turbidez, cor e dureza.

Outro aspecto, ainda mais importante, é a violação a parâmetro de consumo humano associado a risco a saúde. Ao se considerar este tipo de parâmetro, 43% dos poços tiveram, em pelo menos uma das medições, concentração superior ao limite estabelecido, com destaque para: fluoreto, chumbo e nitrato. É exigível, nestes casos, algumas restrições de uso ou mesmo vedação do consumo dessas águas. O IGAM informou à Secretaria de Estado de Saúde, a respeito destes resultados, bem como à Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento para a adoção das medidas cabíveis, e tem buscado desenvolver ações conjuntas com estas Secretarias para assegurar o uso adequado do recurso hídrico subterrâneo no Estado.

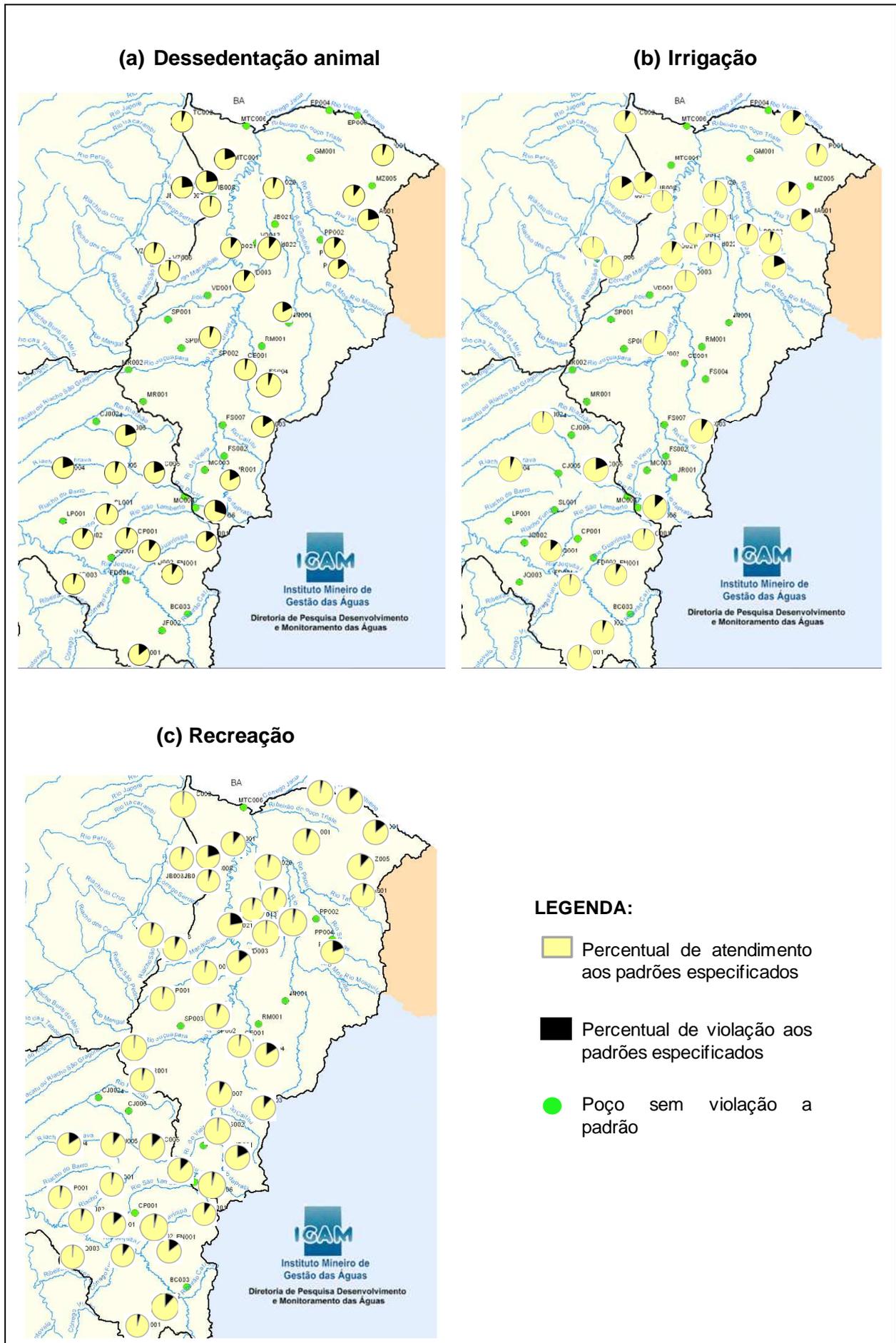
Na Figura 29, são mostrados os percentuais de violação aos padrões de consumo humano, em relação ao total de medições realizadas em cada poço, tanto em relação aos padrões associados a risco à saúde humana, quanto para os padrões associados a gosto e odor.

**Figura 29:** Percentuais de violação em relação ao total de medições realizadas, para cada poço, frente aos parâmetros da água para consumo humano: (a) padrões associados a risco à saúde e (b) padrões organolépticos (que alteram sabor ou odor da água).



Na Figura 30, são apresentados os poços, de forma análoga à abordagem anterior, para os demais tipos de uso – dessedentação animal, irrigação e recreação.

**Figura 30:** Percentuais de violação em relação ao total de medições realizadas, para cada poço, frente aos parâmetros da água para: (a) dessedentação humana; (b) irrigação; (c) recreação.



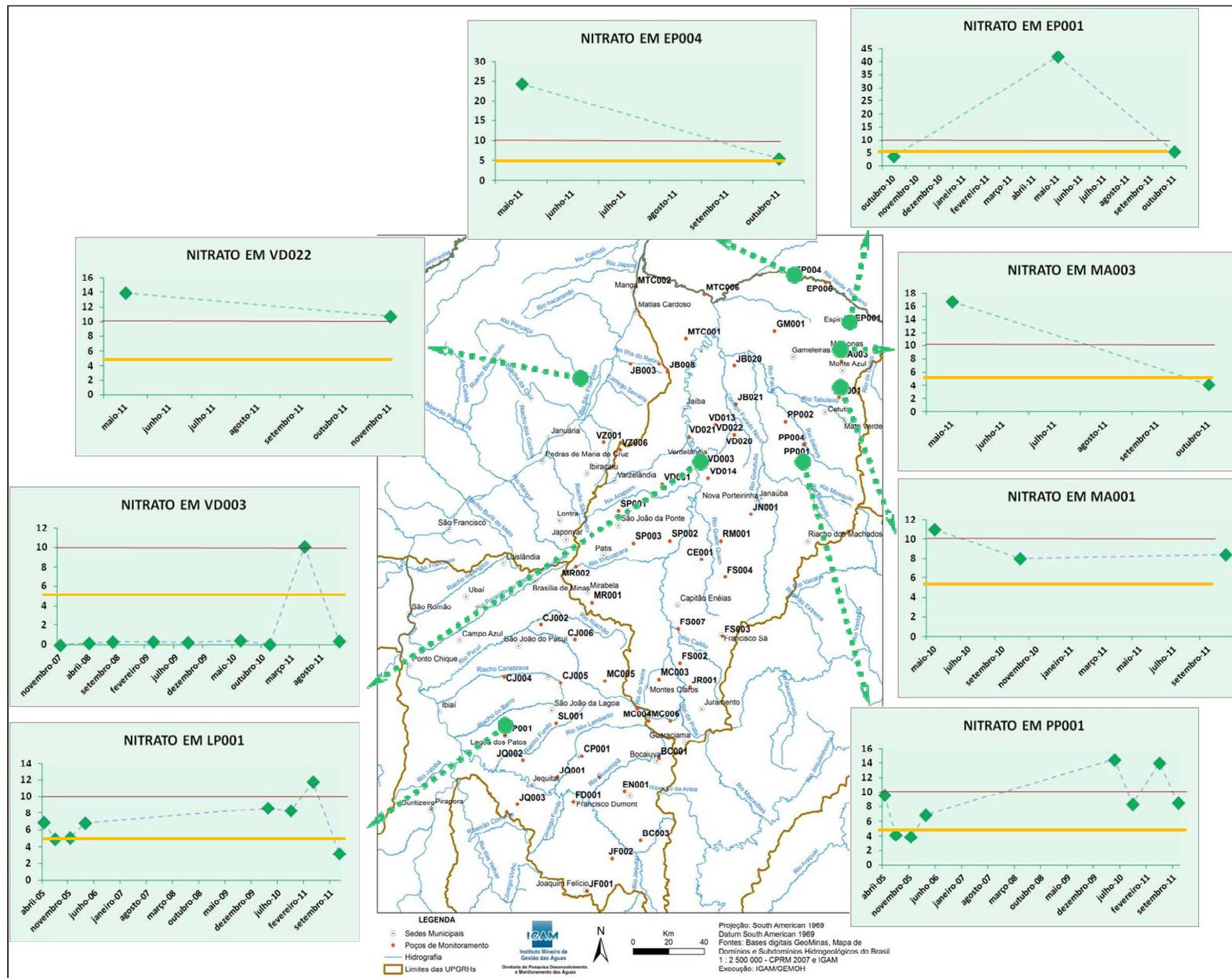
Dos mapas anteriores, observa-se que, embora variável, na maior parte dos poços a ocorrência de violações é relativamente baixa em comparação com o número total de análises realizadas nas águas de cada poço. Novos estudos para verificar a variação temporal e sazonal dos principais parâmetros deverão ser realizados.

Dentre os parâmetros que apresentaram violação de padrões, alguns deles, como é o caso dos fenóis e dos nitratos, podem ter origem associada a fontes antrópicas difusas. Os fenóis podem, por exemplo, ser derivados da degradação de alguns agrotóxicos. Outros parâmetros, como o zinco, o bário, alumínio, ferro e fluoreto, provavelmente têm origens naturais, associadas à ocorrência de minerais-fonte.

Ainda com relação ao atendimento a padrões legais, são apresentados, nas Figuras 31 a 34, os resultados das concentrações de determinados parâmetros – por meio de gráficos de série temporal – associados aos respectivos poços, nos casos em que houve violação a limite legal para consumo humano associado a risco à saúde, com exceção do chumbo, parâmetro este discutido posteriormente.

Nas Figuras 31 e 32, são apresentados os gráficos mencionados anteriormente, cujos parâmetros, normalmente, estão associados a fatores antrópicos, cujo mapa de fundo mostra as principais sedes municipais e cursos d'água. Nas figuras 33 e 34, são mostrados os mesmos gráficos para parâmetros associados, mais comumente, a fatores naturais, cujos poços foram plotados sobre o mapa de domínios hidrogeológicos.

**Figura 31:** Gráficos de série temporal mostrando os resultados obtidos em cada poço de monitoramento em que houve violação a limite legal de consumo humano para o nitrato – período 2005-2011.



## Nitrato

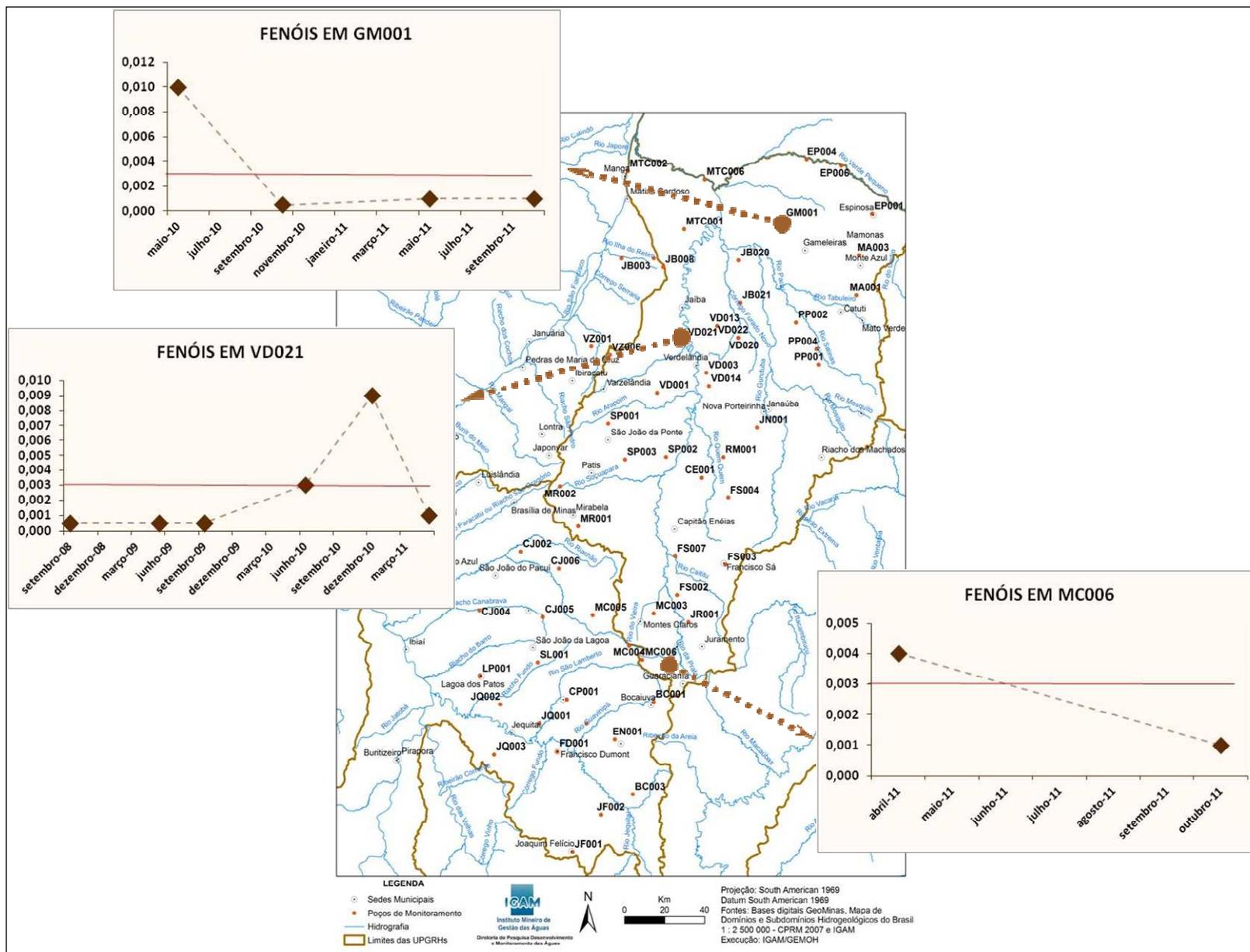
Nas águas subterrâneas é comum a ocorrência de baixos teores do íon nitrato, substância que representa o estágio final da degradação da matéria orgânica. Em concentrações acima de 5 mg/L é indicativo de contaminação antrópica e acima de 10 mg/L pode causar risco à saúde humana, associado a doenças tais como metahemoglobinemia e câncer gástrico.

Dos poços em que houve ocorrência de violação aos limites legais, cinco deles, ou seja, 63% necessitam de série histórica mais longa para uma melhor avaliação. Todavia, pode-se observar que, dentre os poços que já têm mais de oito medições (PP001, LP001 e VD003), dois deles vem apresentando, de forma sistemática, valores elevados de nitrato: o PP001, no centro-leste da UPGRH F10 e o LP001, na região central da UPGRH SF6. Em ambos, este composto apresenta concentrações superiores a 5 mg/L (63% das medições no ponto PP001 e 75% das medições no ponto LP001) e chega, em uma amostragem, a superar o limite de 10 mg/L. No poço VD003, uma única medição superou o limite legal, sendo que, nas demais amostragens, os valores foram relativamente baixos – todos menores do que 5 mg/L.

As principais fontes antrópicas que podem contribuir para a elevação dos níveis de compostos nitrogenados são: vazamentos de redes de esgoto, utilização de fossas sépticas ou negras, aplicação de fertilizantes nitrogenados, ou a influência de rios contaminados na zona de captação de poços. Dentre os compostos nitrogenados (nitrogênio orgânico → amônia → nitrito → nitrato), o nitrato é o mais móvel e persistente deles.

De acordo com Cetesb (2010), a contaminação de aquíferos por compostos nitrogenados e suas diversificadas procedências tem sido documentadas em todo o mundo, sendo que, na maioria das cidades de países em desenvolvimento, o rápido crescimento da população urbana tem resultado em grandes áreas sem a adequada coleta e tratamento dos esgotos. Esta pode ser a origem do nitrato no poço LP001, uma vez que o mesmo encontra-se na sede municipal de Lagoa dos Patos. O índice médio de domicílios com esgotamento sanitário em Minas Gerais é de 78,6%, segundo o censo demográfico 2010 do IBGE e o de tratamento de esgotos era de 23% (BRASIL: PNSB 2008). De acordo com a FEAM (2012), 39% da população urbana era atendida com tratamento de esgotos em 2012, embora não tenham sido mencionados os índices por região do Estado. Além dos esgotos, deve-se considerar ainda o uso de fertilizantes nitrogenados nas áreas rurais.

**Figura 32:** Gráficos de série temporal mostrando os resultados obtidos em cada poço de monitoramento em que houve violação a limite legal de consumo humano para os fenóis – período 2005-2011.



## Fenóis

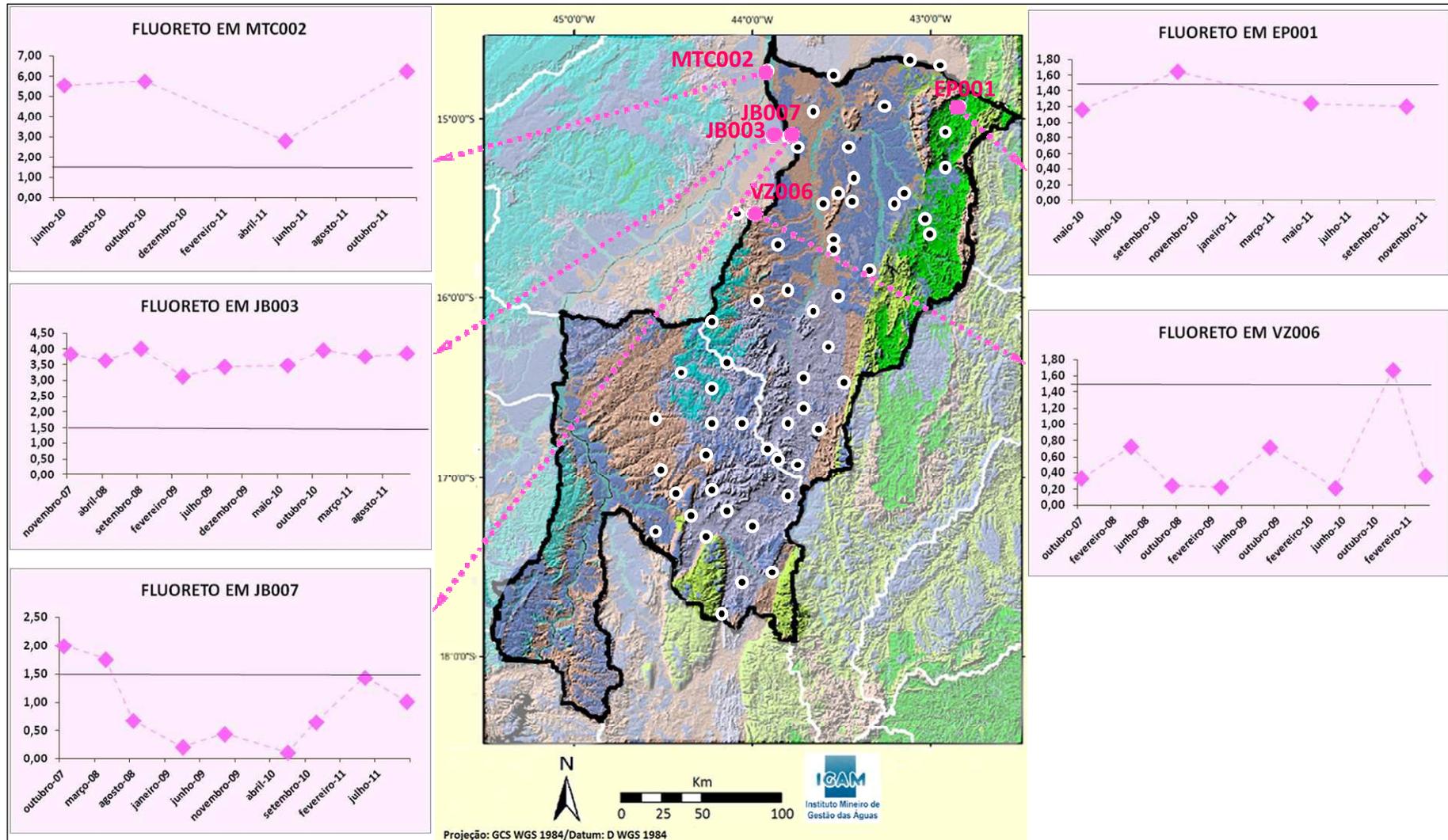
A principal origem dos fenóis é antrópica, sendo que estes compostos são, especialmente, gerados a partir de: efluentes industriais (químicos – especialmente plásticos, corantes, revestimentos e tintas; farmacêuticos; petroquímicos; conversão de carvão e siderúrgicos), efluentes de mineração, além da aplicação de insumos agropecuários (agrotóxicos e produtos para o gado). Estão presentes ainda em esgotos e em efluentes hospitalares, devido ao uso de desinfetantes. Naturalmente, os fenóis podem estar presentes nas águas a partir da decomposição da matéria orgânica, havendo relatos de fenóis advindos da decomposição de certas folhas como as do carvalho, de algumas raízes, ou ainda durante a decomposição bioquímica de algas mortas. Sua concentração natural atinge valor máximo de 0,003 mg/L, que é o limite de potabilidade (Pacheco *et al.*, 2005).

Segundo os autores, estes compostos causam cheiro e sabor desagradáveis na água potável já em pequenas concentrações, sobretudo na presença de cloro. Em maiores concentrações (6 mg/L), são letais para os peixes. Concentrações tóxicas para o homem são da ordem de 13 mg/kg, bem superiores às normalmente encontradas nas águas. Por ser um bactericida forte, interfere nos testes de DBO.

Na área monitorada, três poços apresentaram águas com valores que violam o limite de potabilidade para fenóis, atingindo entre 0,004 a 0,010 mg/L. O poço MC006, com apenas duas medições necessita de mais amostragens a fim de se verificar a tendência em maior prazo. Os outros dois poços, VD021 e GM001, apresentaram um único resultado com violação do limite legal, apresentando, respectivamente, os seguintes percentuais de violação, em relação ao total das medições executadas: 17% e 25%.

Ambos são poços localizados em zona rural e relativamente distantes de cidades de maior porte. Em função disso, supõe-se que, provavelmente, a ocorrência de destes compostos nos poços destacados esteja associada ao uso de agrotóxicos e que os fenóis sejam gerados a partir da decomposição desses produtos. Com relação ao poço GM001, cabe mencionar que o mesmo encontra-se em zona rural muito pouco antropizada, o que torna mais difícil associá-lo com contaminações antropogênicas. Entretanto, em uma análise mais detalhada, este poço está à jusante da área do projeto Jaíba, em relação ao fluxo subterrâneo regional predominante. Isso indica potencial de contaminação por fenóis decorrentes de uso de agrotóxicos na área agrícola do projeto citado que, mesmo distante, pode representar impacto considerável.

**Figura 33:** Gráficos de série temporal mostrando os resultados obtidos em cada poço de monitoramento em que houve violação a limite legal de consumo humano para fluoreto – período 2005-2011 – sobre mapa de domínios hidrogeológicos.



## Fluoreto

Alguns poços monitorados no norte de Minas, especialmente na região de Matias Cardoso, Jaíba e Verdelândia vêm apresentando concentrações de fluoreto que ultrapassam os valores-limite para consumo humano, o que representa risco à saúde associado a doenças como a fluorose e fluorosteoporose.

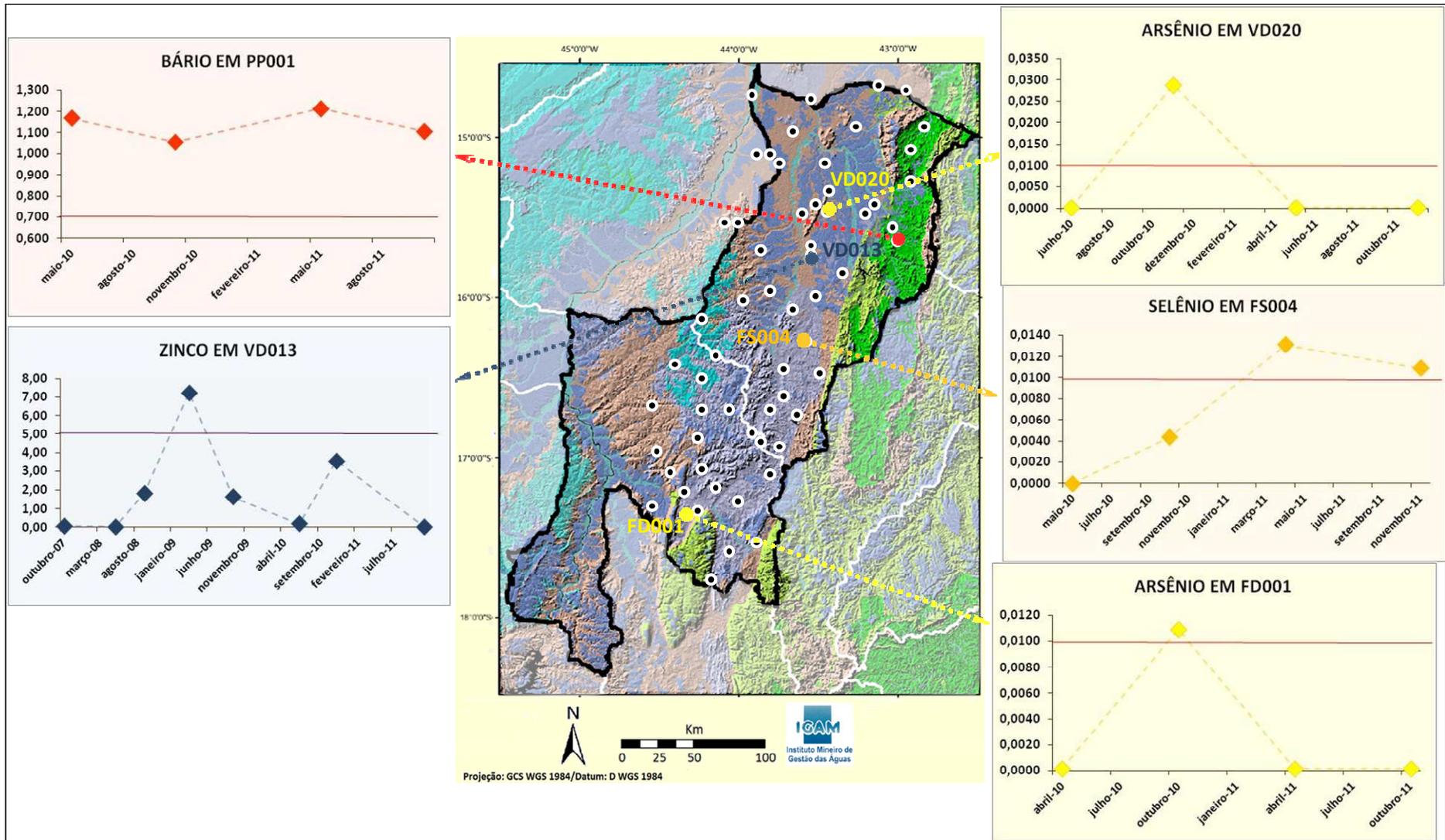
O flúor é o mais eletronegativo dos elementos e o mais reativo. Em função disso, raramente ocorre livre na natureza, estando normalmente combinado quimicamente como íon fluoreto (F<sup>-</sup>). Os minerais-fonte mais abundantes do elemento são a fluorita e a apatita, e o valor natural mais comum é até 0,05 mg/L, sendo que valores superiores são considerados anomalias geoquímicas (Cetesb, 2007).

A variação no conteúdo de flúor é considerada como sendo o resultado da interação de uma série de fatores, dentre os quais os mais importantes são: (1) fatores relacionados com a disponibilidade de fluoretos que eventualmente passam para o sistema hídrico, a partir da atividade vulcânica associada à formação de fenda ou composição de rochas vulcânicas – soluções hidrotermais e pneumatolíticas em zonas orogênicas ativas presentes e pretéritas e (2) fatores que determinam os tempos de residência de fluoretos dissolvidos nas águas, isto é, a partir de reações químicas envolvendo especialmente as espécies de Ca<sup>2+</sup> e F<sup>-</sup>. Outros fatores de menor importância podem contribuir, localizadamente, para o aumento da concentração do elemento nas águas: a introdução de fluoretos através da precipitação atmosférica, dissolução de crostas salinas, ou a injeção de fluoretos no sistema hidrológico por operações industriais (por exemplo, mineração de fluorita).

De acordo com Gaciri & Davies (1993), diferentes padrões de comportamento de fluoreto têm sido observados nos aquíferos. Maiores concentrações de flúor são encontradas em áreas de descarga do que em áreas de recarga, com uma tendência de enriquecimento de fluoreto ao longo do sentido do fluxo, sendo frequentes variações nas concentrações de fluoreto em águas subterrâneas em função da profundidade.

No monitoramento executado pelo IGAM, podem ser identificados dois poços em que as águas atingem concentrações de fluoreto que ultrapassam, sistematicamente, o valor limite: o MTC002 e o JB003. Ambos encontram-se na região oeste da área monitorada, à margem direita do rio São Francisco. O MTC002 é o poço que apresentou as maiores concentrações de fluoreto, chegando a quatro vezes o valor do limite. Nos outros três poços – JB007, EP001 e VZ006 – em que houve violações, as mesmas se intercalam com valores mais baixos, inferiores ao limite para consumo humano equivalente a 1,5 mg/L, com os seguintes percentuais de violação, respectivamente: 22%, 25%, 12,5%.

**Figura 34:** Gráficos de série temporal mostrando os resultados obtidos em cada poço de monitoramento em que houve violação a limite legal de consumo humano para bário, arsênio, selênio e zinco – período 2005-2011 – sobre mapa de domínios hidrogeológicos.



## Bário

As principais fontes naturais de bário são o intemperismo e a erosão de depósitos naturais, normalmente vênios, onde ocorrem na forma de barita ( $\text{BaSO}_4$ ), ou feldspatos ricos em bário. Ocorre como um elemento secundário, em muitos tipos de rocha, mas é mais abundante nas rochas ígneas, e é rapidamente libertado a partir da interação água-rocha, sendo que sua solubilidade é controlada pela solubilidade da barita. O sulfato associado com o bário (formando a barita) pode sofrer redução precipitando o mineral mackinawita e disponibilizando, em alguns casos e de forma natural, o  $\text{Ba}^{2+}$  solúvel na água subterrânea. Assim, as concentrações de bário nas águas naturais costumam ser inversamente proporcional às concentrações de sulfato. Altas concentrações de bário são esperadas, principalmente, quando houve a redução de sulfato e as concentrações deste ânion se tornam inferiores a 10 mg/L nas águas subterrâneas. As fontes do bário mais comuns são os feldspatos e micas, sendo relatada também a inclusão sólida de barita nos vênios de fluorita. Portanto, é usual a associação natural entre bário e flúor. A concentração de bário raramente excede 1 mg/L em águas naturais e as concentrações relatadas variam entre 0,001 e 0,9 mg/L, sendo 0,7 mg/L o valor limite da potabilidade. Fontes antrópicas do bário incluem: processos de produção de pigmentos, fogos de artifício, indústria do vidro, fabricação e uso de agrotóxicos. A ingestão de bário em doses superiores às permitidas pode causar desde um aumento transitório da pressão sangüínea, por vasoconstrição, até sérios efeitos tóxicos sobre o coração, vasos e nervos. (Gilkeson *et al.*, 1978; Cetesb, 2007; GOMES *et al.*, 2011).

O bário vem ocorrendo em concentrações superiores ao limite para consumo humano e de forma sistemática nas águas do poço PP001, em valores que superam em, aproximadamente 1,7 vezes o valor-limite. Considerando que os poços no entorno do referido poço não apresentaram concentrações elevadas deste elemento, supõe-se que sua ocorrência seja bem localizada e possa ser atribuída a ocorrência de pequena extensão de mineral-fonte. O poço citado encontra-se no domínio hidrogeológico do cristalino, no sudeste da UPGRH SF10.

## Arsênio

O arsênio é um metalóide de baixa concentração média na crosta terrestre (1,8 ppm) e ocorre numa variedade de tipos de depósitos minerais, principalmente na forma de arsenopirita (FeAsS) e pirita arsenífera. O elemento pode ser parcialmente liberado para as águas e ainda imobilizado via adsorção em óxidos-hidróxidos de ferro, alumínio e manganês ou em minerais de argila. Nas águas, as formas mais comuns são oxianions de As (V), em condições de Eh alto a moderado, e de As (III) em condições mais redutoras. A concentração de arsênio, em água potável, não deve exceder 0,01 mg/L. A toxicidade das espécies de As (III) é considerada várias vezes superior à das espécies de As (V). O elemento é carcinogênico, sendo sua forma inorgânica a mais nociva ao homem e a via mais comum de exposição humana é através do consumo de água contaminada. A exposição crônica pode causar sérios problemas metabólicos às pessoas, incluindo hiperqueratose, câncer de pele, câncer pulmonar, distúrbios do sistema nervoso, aumento da frequência de abortos espontâneos, dentre outras doenças. A introdução antrópica mais usual é a mineração e o refino de metais (Borba & Figueiredo, 2004).

De acordo com Gastmans e colaboradores (2010), a ocorrência natural de arsênio (As) em concentrações anômalas, acima do limite de potabilidade de 10 µg/L, vem sendo observada em águas subterrâneas nas mais diversas unidades aquíferas do mundo. Estas ocorrências vêm suscitando a realização de novos estudos, que geralmente buscam a caracterização e compreensão dos processos hidrogeoquímicos envolvidos na origem destas anomalias, de maneira a permitir que medidas preventivas sejam adotadas, minimizando os riscos de exposição das populações consumidoras do recurso hídrico. Foram relatadas anomalias de arsênio relacionadas a processos hidroquímicos naturais em aquíferos na Argentina, Chile, México, China, Hungria e, principalmente, em Bangladesh, onde cerca de 40 milhões de pessoas consomem água subterrânea com concentrações de arsênio acima de limites recomendados. Essas ocorrências estão geralmente associadas a ambientes hidrogeoquímicos específicos, como bacias fechadas em regiões áridas ou semi-áridas, e a aquíferos redutores associados a aluviões recentes.

No Norte de Minas, observou-se anomalia em dois poços – o VD020, localizado em Verdelândia na UPGRH SF10 e o FD001, localizado em Francisco Dumont na UPGRH SF6. Em ambos, a anomalia foi detectada e em uma única medição, correspondentes a 25% do número total das amostragens realizadas nestes poços, sendo que as duas ocorreram em período chuvoso. No VD020, o valor da anomalia observada correspondeu a quase três vezes o valor limite. Já no FD001, o valor observado superou o limite em apenas 10% (igual a 0,011 mg/L). Em função do número ainda pouco expressivo de análises, recomenda-se a continuidade do monitoramento nestes pontos para verificação das tendências futuras.

## Selênio

O selênio pode ser benéfico ou tóxico, em função de sua concentração no ambiente, sendo amplamente distribuído na natureza. Os processos responsáveis por sua ocorrência relacionam-se à: atividade vulcânica, intemperismo das rochas e solos, incluída a redução química ou bacteriana, e queima de combustíveis fósseis. A importância de um processo em particular está associada à especiação do elemento, que é controlada pelo pH e pelas condições redox do ambiente. Selênio pode existir nas seguintes valências: 2<sup>-</sup>, 0, 4<sup>+</sup> e 6<sup>+</sup>. Cada estado de oxidação apresenta um comportamento químico diferente, sendo que as duas últimas valências são as mais comuns nos ambientes característicos das águas subterrâneas. A concentração de selênio no solo, água ou minerais é específica em cada local, sendo que médias mundiais ou regionais são de pouco valor prático. Níveis sanguíneos elevados do elemento, superiores a 1 mg/L, podem ocasionar a selenose, doença que inclui distúrbios gastrointestinais, perda de cabelo, unhas manchadas brancas, fadiga, irritabilidade e danos nervosos leves (FRAGA, 2005).

Em um único poço, o FS004 – no município de Francisco Sá na UPGRH SF10, observaram-se águas com níveis de selênio superior ao limite de 0,01 mg/L. As violações ocorreram em 50% das medições executadas no poço, ainda em número relativamente pequeno (4).

## Zinco

O zinco é comumente encontrado na crosta terrestre, sendo um micronutriente essencial, porém, em concentrações elevadas, esse metal atinge níveis tóxicos no ambiente e pode afetar o crescimento e o metabolismo normal de espécies. Por ser um elemento essencial para o ser humano, só se torna prejudicial à saúde quando ingerido em concentrações relativamente altas. A toxicidade do zinco ocorre nas formas agudas e crônicas, sendo que a ingestão de 150 a 450 mg de Zn por dia foi associada à: baixa assimilação do cobre, alterações nas funções do ferro, diminuição da função imunológica e redução dos níveis de HDL. As maiores emissões de zinco para o ambiente originam-se dos resíduos metalúrgicos (escória), rejeitos da mineração, cinzas dos processos de combustão e o uso de fertilizantes à base de zinco (óxido, sulfato, nitrato e cloreto de zinco) (WOLFF, 2009; FRAGA, 2005).

Um único poço ao centro da UPGRH SF10, o VD013, registrou águas com concentração superior ao limite para consumo humano, equivalente a 5 mg/L, o que ocorreu em uma única medição no total de oito, ou seja, em apenas 13% do total de medições. Neste caso, o nível observado foi de 1,5 vezes o valor limite.

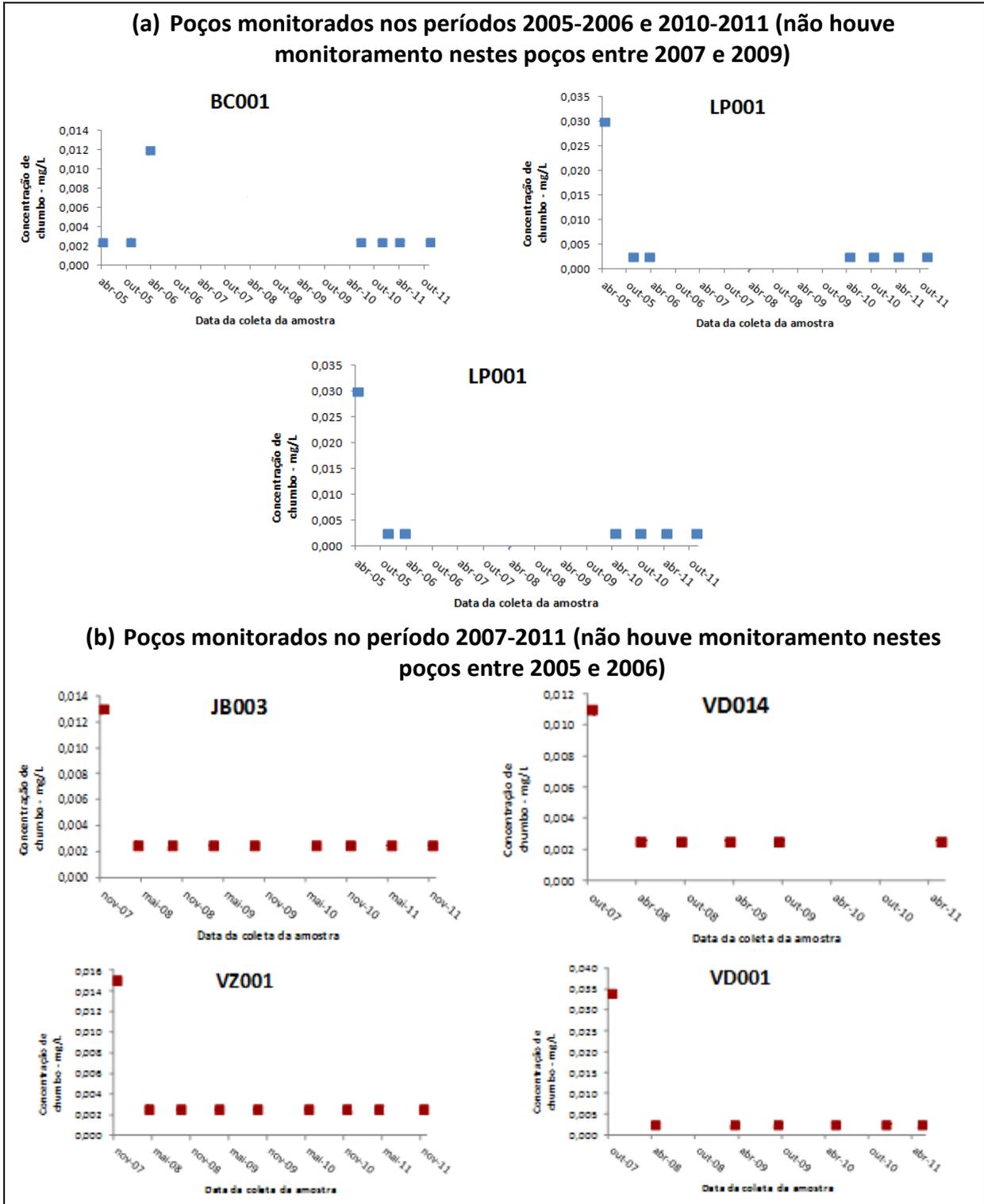
## Chumbo

O chumbo foi o parâmetro com maior índice de violações nas UPGRH SF6 e SF10 e, todavia, ele não constitui elemento presente na geologia da região, além de não ter sido associado a possíveis fontes antrópicas que justificariam sua ocorrência em teores tão elevados, ainda mais que a presença do metal foi detectada em diversos poços distribuídos na área monitorada.

Dentre os parâmetros limitados para consumo humano e que apresentam risco à saúde, este metal é importante em função de 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, o número relativamente elevado de valores extremos (avaliados a partir de gráficos *box-plot* – com concentrações entre 4 a 13 vezes os valores dos outliers superiores nos poços de monitoramento em que houve valor extremo, chegando a 48 vezes superior ao padrão legal para consumo humano em uma das análises) e a ocorrência destes valores em datas de amostragem específicas (1ª campanha de monitoramento – abril/2005, 4ª campanha – março/2006 e 5ª campanha – outubro e novembro/2007) torna estes resultados sujeitos a questionamentos. Soma-se a isso o fato de que tais ocorrências de valores extremos, nestas amostragens específicas, ocorreram de forma generalizada na área monitorada, em dez poços de monitoramento, a saber: BC001, LP001, SL001, JB007, VD014, VD001, JB003, VZ001, JB008, VD003. Para ilustrar estes valores atípicos, são apresentados os gráficos de série temporal para o elemento na Figura 35, que mostra as diferenças relativas dos valores extremos e dos demais observados em cada ponto de monitoramento.

**Figura 35:** Gráficos de série temporal para os valores medidos de concentração de chumbo – mg/L – nas águas de alguns poços monitorados: (a) de 2005 a 2006 e de 2010 a 2011, e (b) de 2007 a 2011.



Fonte: adaptado de Souza (2013).

A conjugação destes três fatores (muitos dados com valores extremos para o parâmetro, ocorrência de extremos em determinadas campanhas e de forma não localizada na área) indica possível erro sistemático nos resultados obtidos. Assim, torna-se necessário 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 de valores menores, se avalie a pertinência na invalidação destes resultados anteriores.

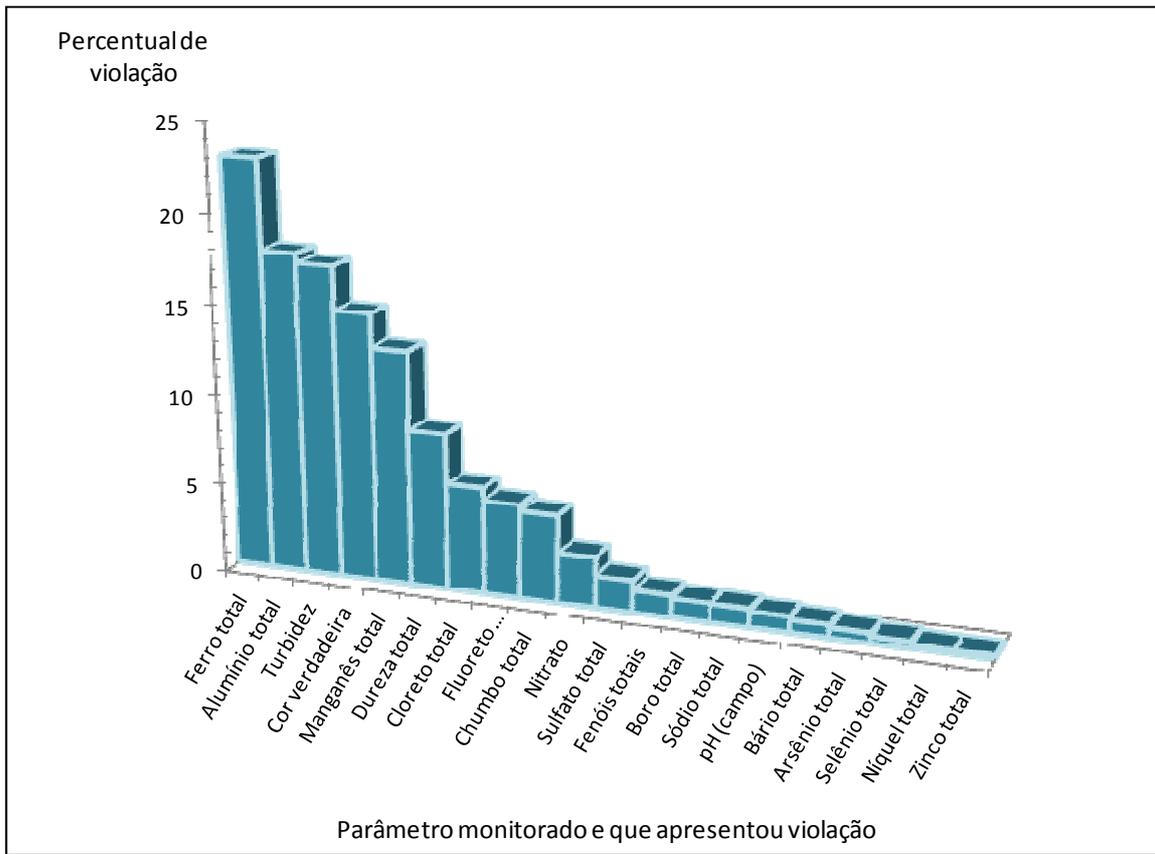
É desejável que novas análises sejam feitas futuramente com maior número de dados sem, contudo, desconsiderar possível erro nas análises executadas para este parâmetro.

Ressalta-se que este comportamento observado para o chumbo não ocorreu para os demais parâmetros analisados no monitoramento das águas subterrâneas na região norte 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.

### **RESUMO DOS PARÂMETROS QUE VIOLARAM PADRÕES DE POTABILIDADE NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NAS UPGRH SF6, SF9 E SF10**

Na Figura 36, são apresentadas as frequências percentuais de violações aos padrões, por parâmetro, considerando a Portaria de Potabilidade (nº 2914-2011) do Ministério da Saúde e a Resolução Conama nº 396/2008, conjuntamente. A referida figura refere-se aos poços da atual configuração da rede, composta por 60 pontos e definida a partir de 2010.

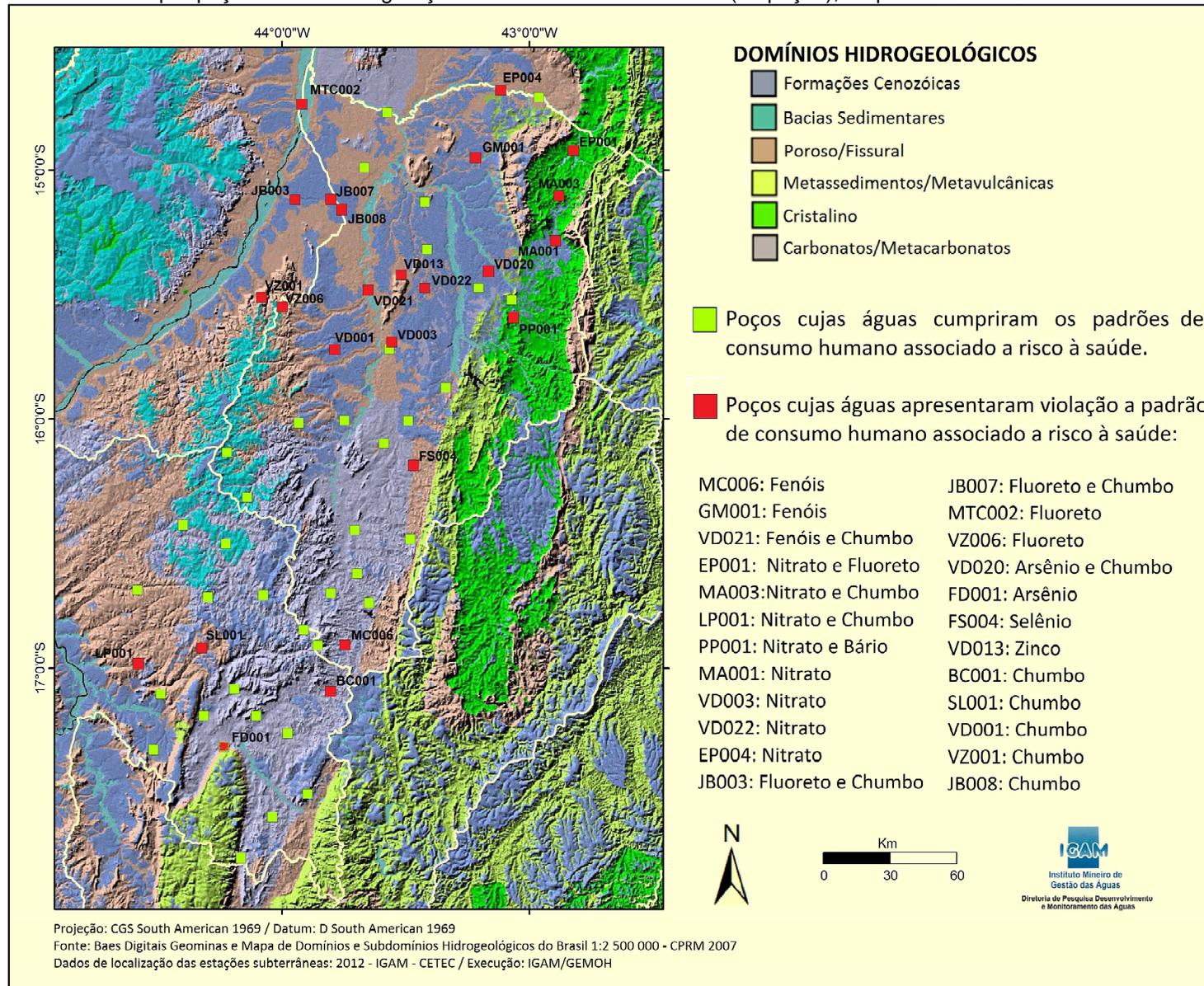
**Figura 36:** Gráfico de barras mostrando a frequência de violações, por parâmetro monitorado e que apresentou violação, nas sub-bacias SF6, SF9 e SF10, no Norte de Minas para o período 2010-2011.



Fonte: adaptado de SOUZA, 2013.

Na Figura 37, é apresentado um resumo global para o conjunto dos poços cujas águas violaram limites para consumo humano e para os parâmetros associados a risco à saúde. Para este uso específico, houve violações para chumbo, nitrato, fluoreto, fenóis, arsênio, bário, zinco e selênio. A referida figura, contendo os domínios hidrogeológicos ao fundo, refere-se aos poços da atual configuração da rede, composta por 60 pontos e definida a partir de 2010.

**Figura 37:** Rede de monitoramento nas sub-bacias SF6, SF9 e SF10 (no Norte de Minas); seus principais sistemas aquíferos aflorantes; e a respectiva ocorrência de violação de padrões legais relacionados a consumo humano e associados a risco à saúde, segundo a Portaria de Potabilidade (Nº 2914-2011 do Ministério da Saúde), por poço da atual configuração da rede de monitoramento (60 poços), no período 2005-2011.



Algumas características principais e de origem natural das águas com diferenciação hidroquímica podem ser associadas aos respectivos poços, de modo a indicar aspectos geológicos na região monitorada. Exemplo disso foram as estações localizadas nos municípios de Monte Azul, MA001, e Espinosa, EP001, que se situam, segundo mapa geológico – Figura 19, nos domínios de rochas granito-gnaissicas, representados pelo complexo Porteirinha e complexo sienitóide do embasamento cristalino. Todavia, as análises das águas desses poços apresentam altos valores de dureza de cálcio e magnésio, característica intrínseca de águas provenientes de rochas calcáreas do aquífero Bambuí. Portanto, parece haver influência das rochas carbonáticas ou águas provenientes do aquífero Bambuí na composição hidroquímica das águas dessas estações. Embora o mapa geológico da Folha Monte Azul, escala 1:100.000 não informe a presença de calcáreos do grupo Bambuí ao norte de Monte Azul, pode ser possível a presença de camadas calcáreas (lentes de calcáreos Bambuí) na região, como já relatado para as imediações de Pai Pedro (CPRM, 2007). Segundo Nota Explicativa da Folha Monte Azul da mesma fonte, a região situada entre as serras Central a oeste e a serra do Espinhaço a leste é uma superfície aplainada, pertencente ao ciclo de denudação Velhas, onde houve acúmulo em alguns pontos de material detrítico, os quais formam depósitos inconsolidados. Outra explicação pode relacionar-se ao regime influente dos rios que atravessam as rochas calcáreas, como o rio Verde Grande. As águas do poço EP001 apresentaram diferenciação estatística ao nível de confiança de 95% das águas dos demais poços monitorados, com elevados níveis de nitrato, cloreto e sódio.

A aplicação de testes não paramétricos de Kruskal-Wallis e de comparações múltiplas indicou algumas diferenciações hidroquímicas nas águas de alguns poços, que passamos a discutir.

Em Matias Cardoso, o poço MTC002, está localizado em sedimentos quaternários da planície aluvial do rio São Francisco, na UPGRH SF9, e suas águas se diferenciaram por apresentar elevados níveis de fluoreto. De forma análoga, o poço JB003, também na borda leste da região monitorada, apresentou elevados níveis de fluoreto.

As águas do poço PP001, localizado no cristalino, apresentaram elevados teores de bário e de potássio, conforme já mencionado. A elevada correlação entre estes dois elementos pode indicar que a origem de bário nessas águas esteja relacionada, hipoteticamente, à ocorrência de feldspato potássico.

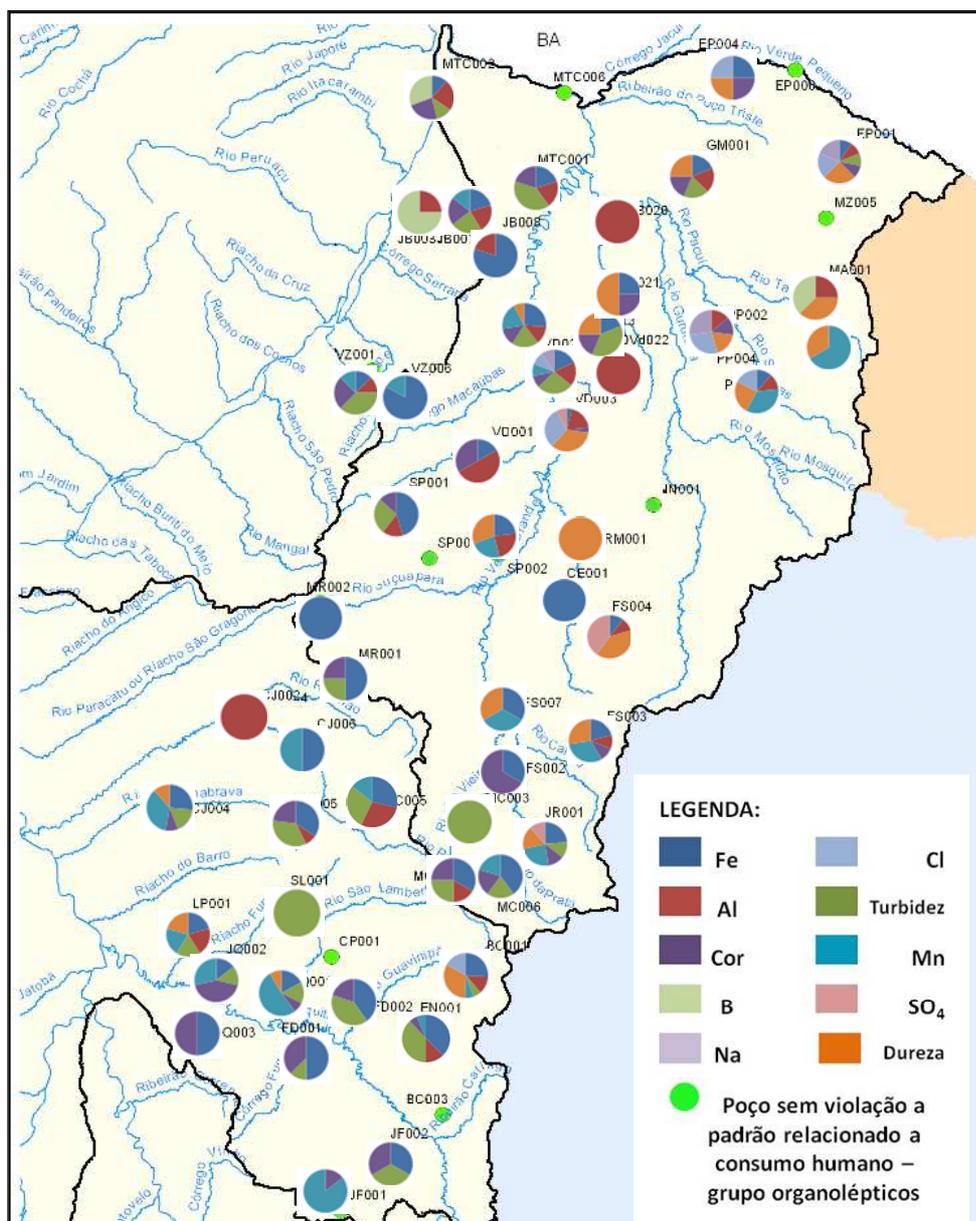
Em Francisco Dumont, o poço FD001 situa-se às margens da serra do Cabral e está sob influência direta de sedimentação proveniente das encostas da serra, localizado em coberturas detríticas terciário-quaternárias. Pode haver influência de recarga em níveis mais altos da referida

serra. Neste poço, as águas se diferenciaram por apresentar baixo conteúdo salino, baixo pH, elevada alcalinidade de carbonato, e elevado teor de fósforo.

O poço localizado ao sul da cidade de Bocaiúva, BC003, está muito próximo à borda da serra do Espinhaço, a qual se localiza a aproximadamente oito quilômetros a leste. Nesse poço, o aquífero poroso é formado por sedimentos alúvio-coluvionares. Suas águas se caracterizam por elevadas concentrações de alcalinidade de bicarbonato.

Conforme comentado anteriormente, alguns parâmetros associados a sabor e aroma das águas – de caráter organoléptico – tiveram concentrações elevadas e apresentaram violação aos limites para consumo humano, de forma generalizada nas sub-bacias monitoradas. Dentre estes, os parâmetros que apresentaram maior frequência de violação foram: ferro, alumínio, turbidez, cor e manganês, e sua ocorrência em superiores aos valores-limite da legislação é mostrada na Figura 38.

**Figura 38:** 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.



Fonte: SOUZA, 2013.

A partir da Figura 38, observa-se que a ocorrência de parâmetros organolépticos é, de fato, generalizada na área monitorada, sendo comum a associação entre os parâmetros supracitados, em diversos poços.

A ocorrência destes parâmetros, dificilmente estaria associada à geologia, porque estes elementos não fazem parte da formação geológica regional e não são esperados em concentrações elevadas, naturalmente. Portanto, é necessário verificar as condições de construção dos poços de extração, as condições de manutenção e de bombeamento, uma vez que os próprios poços podem ocasionar os níveis elevados detectados para estes parâmetros.

## **EVOLUÇÃO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO NORTE DE MINAS - UPGRH SF6, SF9 E SF10 – PERÍODO 2005-2011**

Os resultados obtidos para o 3º quartil dos resultados do monitoramento a cada período de monitoramento (2005-2006; 2007-2009 e 2010-2011) são mostrados para os poços comuns, mantidos nas diferentes configurações da rede na Tabela 8. Em função do número de análises nos poços ser ainda relativamente pequeno, os valores são ilustrativos, sendo necessário obter-se mais dados em um período de monitoramento maior, mantida a atual configuração da rede, para que se possam aplicar os devidos testes estatísticos e se avaliar tendências. As oscilações observadas nos valores do 3º quartil, mostrados na Tabela 8, podem ser ocasionadas pela variação normal do parâmetro. É desejável, futuramente, avaliar possível aumento nas concentrações de sais – a partir dos valores da condutividade elétrica e dos sólidos totais dissolvidos, e, especialmente do sulfato total.

**Tabela 8:** Resultados do 3º quartil para as águas subterrâneas nas UPGRH SF6, SF9 e SF10 – para os parâmetros selecionados: no período 2005-2011 (todo o monitoramento abordado) e para cada uma das fases com mesma configuração da rede de monitoramento: 2005-2006, 2007-2009 e 2010-2011.

Variável	3º Quartil (Percentil75%)			
	2005-2011	2005-2006	2007-2009	2010-2011
pH	7,4	7,4	7,3	7,4
Condutividade Elétrica - CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	941	924	945	956
Sólidos totais dissolvidos - STD (mg/L)	657	550	672	700
Alcalinidade de bicarbonato (mg/L $\text{CaCO}_3$ )	331,1	298,6	349,0	336,6
Arsênio (mg/L As)	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Boro (mg/L B)	0,08	ND	0,10	0,07
Cloreto total (mg/L $\text{Cl}^-$ )	65,30	37,70	84,30	70,28
Dureza total (mg/L $\text{CaCO}_3$ )	422,1	354,1	475,0	458,0
Fenóis (mg/L)	0,001	0,001	0,001	0,001
Fluoreto (mg/L F)	0,41	0,31	0,56	0,37
Fósforo total (mg/L P)	0,04	0,04	0,03	0,04
Magnésio dissolvido (mg/L $\text{Mg}^{2+}$ )	15,560	18,300	12,730	21,300
Nitrato (mg/L $\text{NO}_3^-$ )	1,72	2,25	1,65	1,54
Sulfato total (mg/L $\text{SO}_4^{2-}$ )	24,4	16,0	26,2	34,2
Turbidez (NTU)	3,0	3,0	2,3	3,7
Alumínio total (mg/L Al)	0,19	0,14	0,26	0,13
Bário (mg/L Ba)	0,111	NA	0,117	0,109
Cálcio dissolvido (mg/L $\text{Ca}^{2+}$ )	130,00	116,93	136,40	126,40
Chumbo total (mg/L Pb)	0,003	0,003	0,003	0,003
Cobre total (mg/L Cu)	0,002	0,002	0,002	0,002
Ferro total (mg/L Fe)	0,37	0,35	0,30	0,51
Manganês total (mg/L Mn)	0,044	0,073	0,031	0,051
Níquel (mg/L Ni)	0,002	0,002	0,002	0,002
Potássio dissolvido (mg/L $\text{K}^+$ )	2,47	2,71	2,24	2,63
Selênio (mg/L Se)	0,0003	ND	0,0003	0,0003
Sódio total (mg/L Na)	47,90	NA	39,65	65,05
Zinco (mg/L)	0,19	0,30	0,20	0,16

## CAPÍTULO IV – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE OCORRÊNCIA DO AQUÍFERO GUARANI EM MG – TRIÂNGULO MINEIRO

O Sistema Aquífero Guarani – SAG – é um aquífero transfronteiriço, que se localiza na região centro-leste da América do Sul compreendendo: Brasil, Paraguai, Uruguai e Argentina – Figura 39. Sua área ocupa 1,2 milhões de km<sup>2</sup>, estendendo-se sobre 75% na bacia do Paraná e parte da bacia hidrográfica do Rio Prata. No Brasil, a área do aquífero se estende por oito Estados: Mato Grosso do Sul, com uma área de 213.200 km<sup>2</sup>; Rio Grande do Sul, com 157.600 km<sup>2</sup>; São Paulo, com 155.800 km<sup>2</sup>; Paraná, com 131.300 km<sup>2</sup>; Goiás, com 55.000 km<sup>2</sup>; Minas Gerais, com 52.300 km<sup>2</sup>; Santa Catarina, com 49.200 km<sup>2</sup>; e Mato Grosso, com 26.400 km<sup>2</sup>.

Figura 39: Abrangência do sistema aquífero Guarani.



Fonte: Machado, 2006.

Em Minas Gerais, sua área de ocorrência situa-se na metade oeste do Triângulo Mineiro e em uma área de menor extensão, na borda sudoeste do Estado, na divisa com São Paulo.

Devido à importância do sistema aquífero Guarani, ele vem sendo objeto de estudos e ações visando à construção de uma gestão integrada e sustentável de seus recursos hídricos. Neste contexto, insere-se o Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema

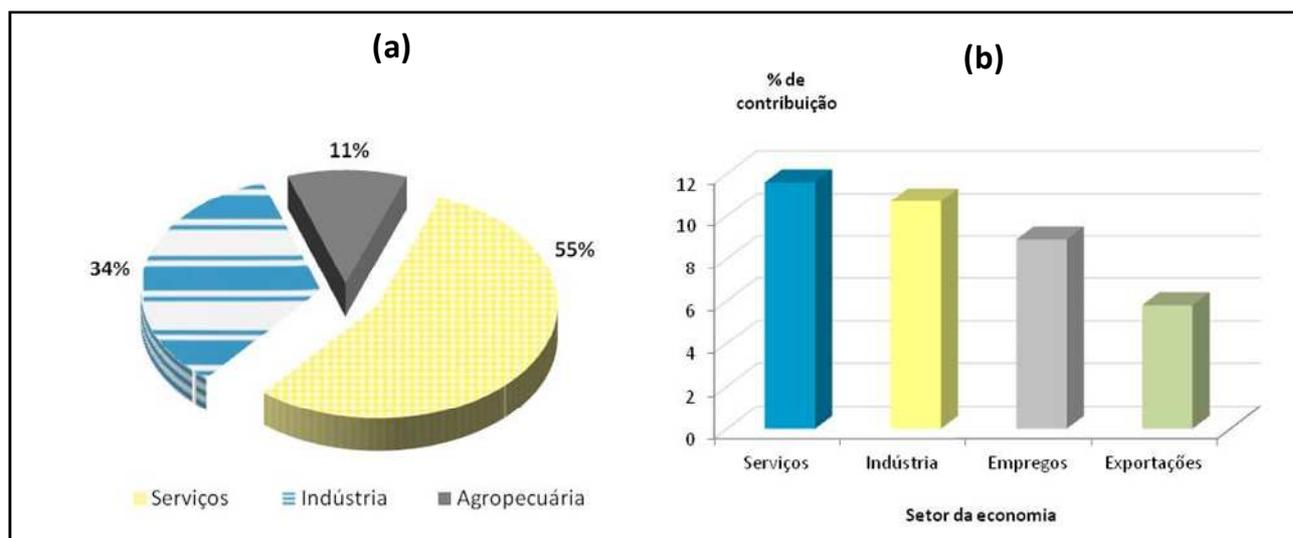
Aquífero Guarani (PSAG), cujo objetivo é construir o arcabouço de gestão para o aquífero, tendo como premissas o conhecimento da dinâmica de fluxos e das características hidroquímicas. O projeto *Monitoramento das águas subterrâneas do sistema aquífero Guarani*, no Triângulo Mineiro, vem ao encontro desses conceitos e soma esforços para a construção de ferramentas de gestão nas esferas regionais.

## ASPECTOS SÓCIO-ECONÔMICOS

O Triângulo Mineiro constitui uma das dez regiões de planejamento do Estado de Minas Gerais, denominada Mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. A Mesorregião ocupa uma área de 90.545 km<sup>2</sup> e 2.185.979 habitantes, com 66 municípios.

A economia da região é impulsionada pelo agro-negócio, pecuária, produção e processamento de grãos e carne. Destaca-se também o plantio e a indústria de beneficiamento da cana-de-açúcar, setor em expansão, há décadas, e cujas áreas em produção continuam com progressivo aumento. Segundo levantamentos da CONAB, a área de cultivo da cana-de-açúcar em Minas Gerais passou de 543.946 hectares em 2009 e 2010 para 800.000 hectares em 2011 (OLIVEIRA *et al.*, 2013). Na Figura 40, são apresentados dois indicadores econômicos que mostram a importância da região, em termos de geração de renda e da contribuição para o valor agregado do Estado.

**Figura 40:** Números da economia do Triângulo Mineiro: (a) Percentual de geração de renda por setor econômico na região e (b) Percentual de contribuição da região para o agregado do Estado.



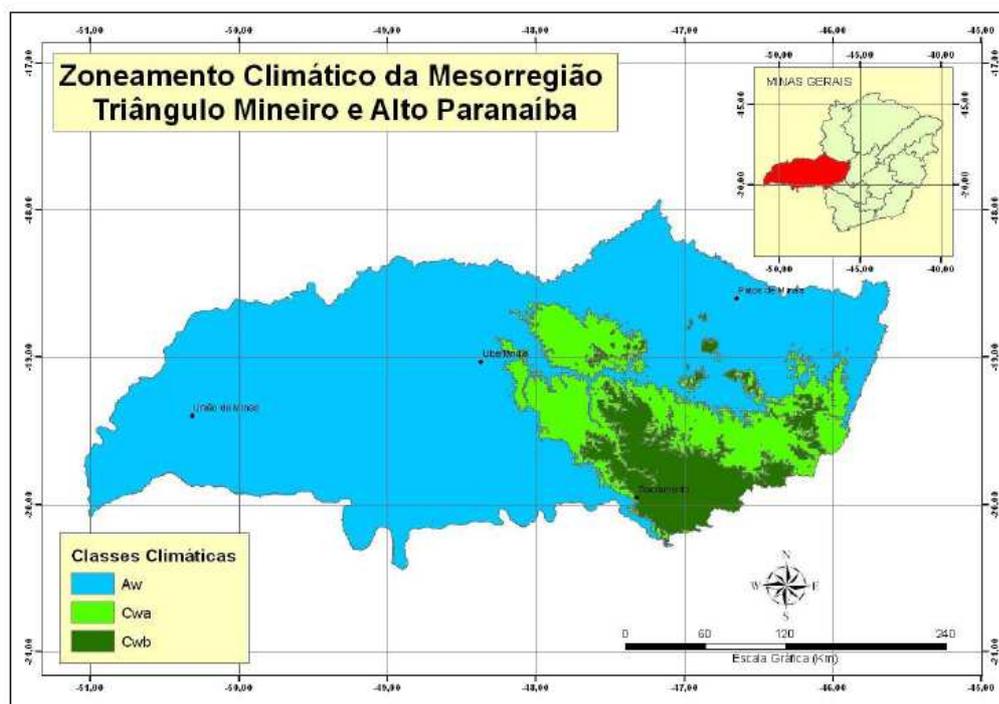
Fonte: MINAS GERAIS, 2010.

De forma geral, os índices do saneamento básico acompanham o grau de desenvolvimento econômico. No Triângulo o percentual de domicílios com acesso ao abastecimento de água e rede de esgoto é de, aproximadamente, 92% e 93%, respectivamente.

## CLIMA

A maior parte do Triângulo Mineiro apresenta-se com temperaturas médias mensais iguais ou superiores a 17°C. A precipitação anual varia entre 1.400 e 1.700 mm, com os valores mais altos nas regiões de maior altitude, concentrada nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro. O período seco estende-se de maio a agosto. Na Figura 41, são detalhados os subtipos climáticos na região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba.

**Figura 41:** Mapa climático da Mesorregião Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, modelo de Köppen.



Fonte: SÁ JÚNIOR, 2009.

Conforme informações do Núcleo de Estudo em Fruticultura da Universidade Federal de Uberlândia, o clima no Triângulo e Alto Paranaíba pode ser caracterizado, na maior parte da região, como sendo do tipo Aw (Clima tropical chuvoso, megatérmico, com inverno seco – Classificação de Koppen). A temperatura média do mês mais frio é superior a 18 °C, e a precipitação do mês mais seco, inferior a 60 mm.

Na parte nordeste da região, na chapada entre as cidades de Uberlândia-MG e Uberaba-MG, o clima é do tipo Cwa: clima temperado suave, mesotérmico, chuvoso, com inverno seco. A temperatura média do mês mais frio varia entre 3 e 18°C e a do mês mais quente é superior a 22°C.

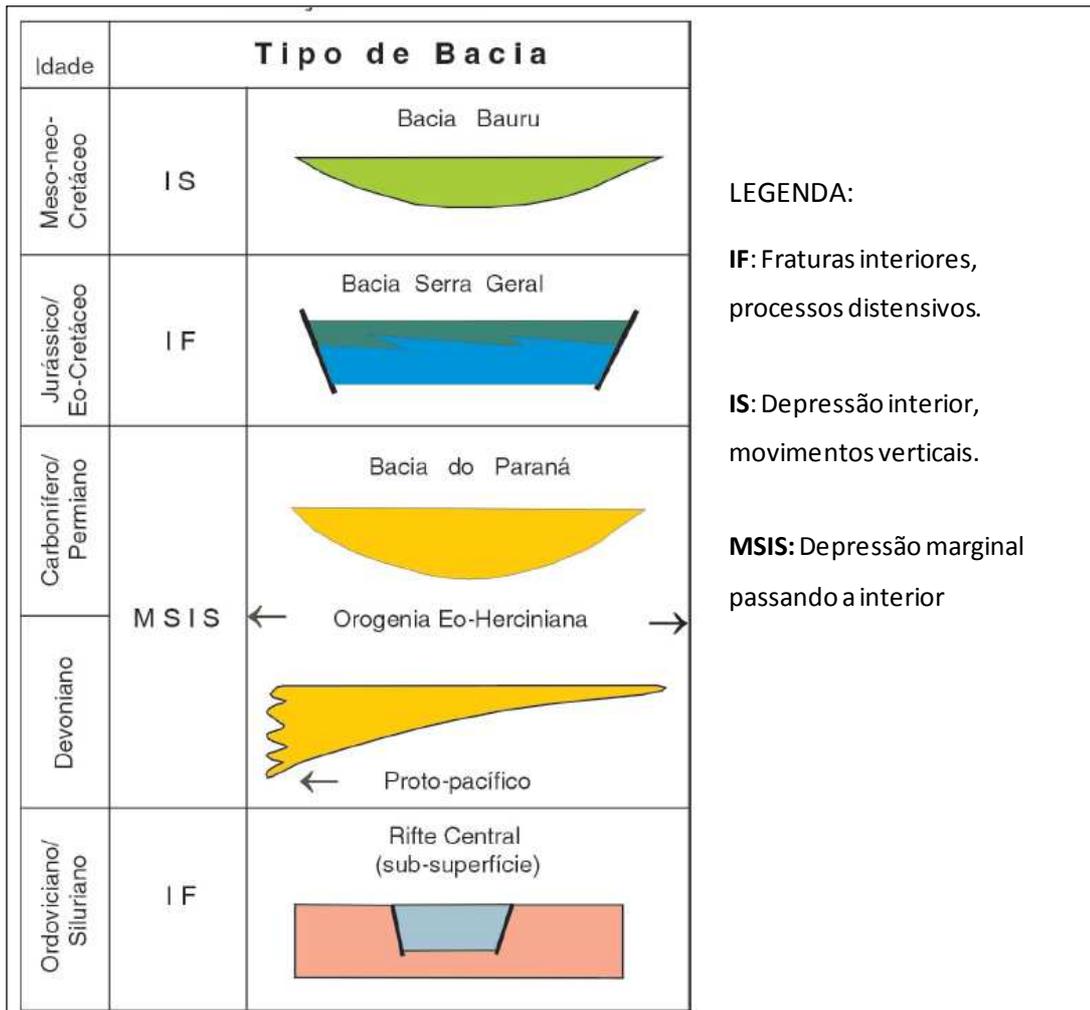
Na serra de Araguari, o clima é do tipo Cwb, semelhante ao Cwa, diferindo apenas por ser a temperatura média do mês mais quente, próxima a 22°C.

## ASPECTOS GEOLÓGICOS E HIDROGEOLÓGICOS

O sistema aquífero é constituído por formações geológicas dos períodos Jurássico e Triássico, cuja origem é sedimentar, e são os arenitos das formações Botucatu (Jurássico) e Pirambóia (Triássico). Esses arenitos foram depositados em ambiente fluvial lacustre que passou a ambiente desértico e depois para úmido e super úmido. Essas unidades sedimentares estão confinadas pelos basaltos da formação Serra Geral (REBOUÇAS, 1994). O sistema aquífero Guarani é uma unidade hidrogeológica formada por rochas sedimentares da bacia do Paraná e Chaco-Paraná e sua estrutura física atual é resultado dos derrames basálticos que recobriram os arenitos, da ativação de falhamentos e arqueamentos regionais e de soerguimentos das bordas da bacia.

Já as unidades estratigráficas da região do Triângulo Mineiro formaram-se no contexto da evolução da Bacia do Paraná. A bacia do Paraná é formada por três áreas de sedimentação independentes, separadas por discordâncias: bacia do Paraná propriamente dita, uma área de sedimentação que, primitivamente, se abria para o oceano Panthalassa a oeste; a bacia Serra Geral, compreendendo os arenitos eólicos da formação Botucatu e os derrames basálticos da formação Serra Geral e bacia Bauru (BRASIL: CPRM, 2003). A Figura 42 ilustra de forma esquemática a história da formação das bacias e os processos tectônicos, responsáveis pela sua configuração.

**Figura 42:** Evolução tectônica da província sedimentar meridional, incluindo a bacia do Paraná, associada aos tipos básicos de tectônica formadora da bacia.



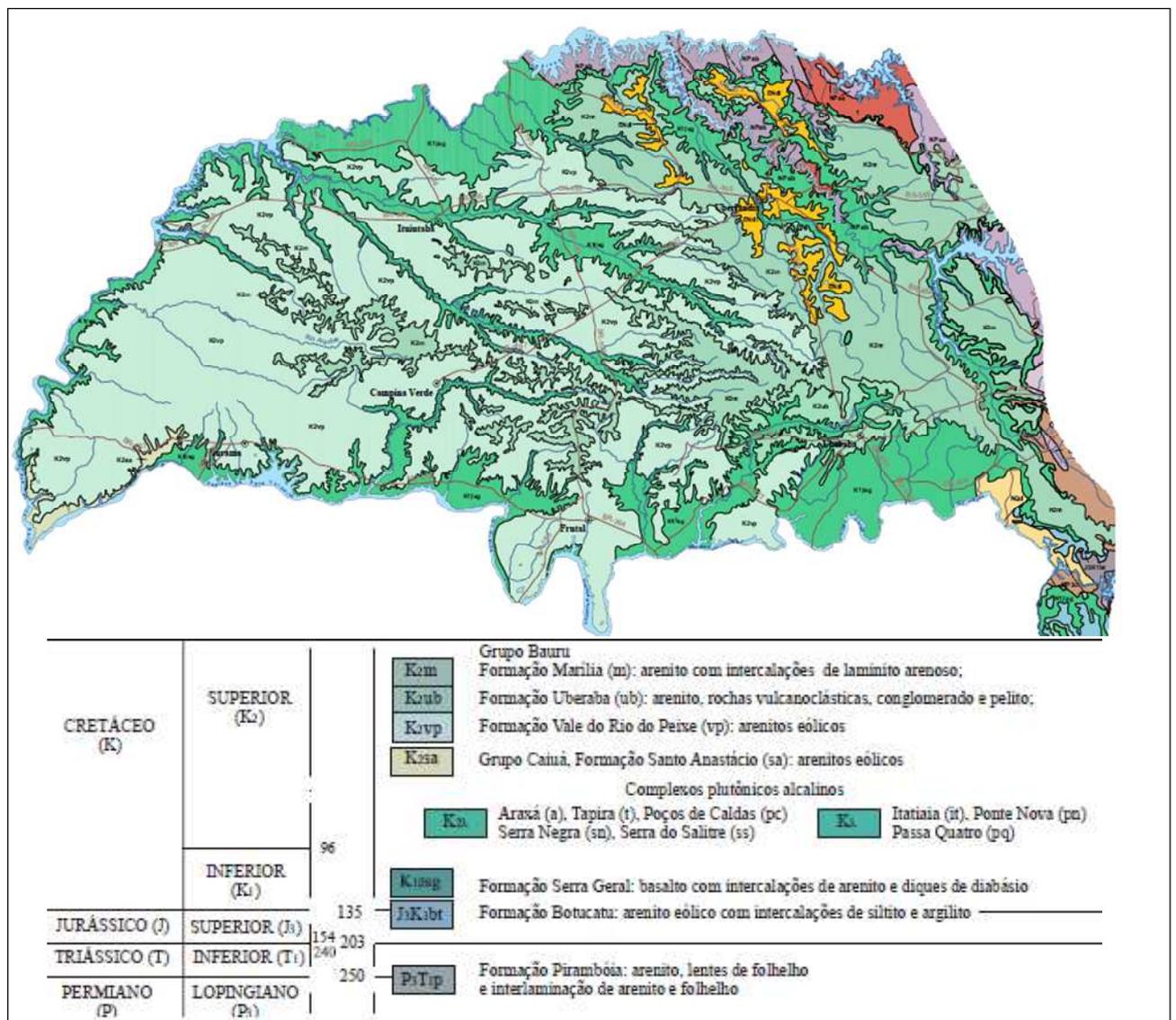
Fonte: BRASIL, 2003 (CPRM).

Da base para o topo, o pacote estratigráfico é constituído do embasamento cristalino, composto por rochas metamórficas, xistos e quartzitos do grupo Araxá, Pré-Cambriano Inferior (800 M.a.). Sobrepõem-se às rochas metamórficas, os sedimentos das formações Pirambóia/Botucatu, que, por sua vez, são recobertos pelos derrames basálticos da formação Serra Geral. A diferenciação entre as duas formações é realizada com certa dificuldade. A sedimentação inicial da formação Pirambóia deu-se em regime flúvio-eólico, quando foram depositados arenitos de granulometria fina a média, com matriz argilosa, presença de níveis de areia grossa a conglomerados com ocorrência subordinada de intercalação de arenitos finos a siltitos. A formação Botucatu caracteriza sedimentação eólica em regime desértico, sendo constituída de camadas de arenitos médios a finos, róseos, de aspecto fosco. Em bons afloramentos, podem ser observadas estratificações cruzadas de grande porte, típicos de ambientes dunares.

A formação Serra Geral é constituída por derrames basálticos, cujos componentes minerais são plagioclásio, olivina e piroxênio com estrutura microcristalina, agindo como unidade selante para

os arenitos Além dos derrames de lavas, a formação geológica apresenta soleiras e diques de diabásios. Localmente os basaltos podem apresentar intercalações de arenitos, denominados intertrapeanos, com espessura de poucos metros. A atividade vulcânica foi datada através do método K-Ar e remonta ao final do Júrassico e início do Cretáceo. Os sedimentos do Cretáceo Superior do grupo Bauru são as unidades estratigráficas que se sobrepõem à formação Serra Geral. Segundo Corsi (2003), o grupo Bauru é constituído pelas Formações Adamantina, Uberaba e Marília. As unidades estratigráficas mais jovens são compostas por sedimentos detrítico-arenosos e cascalheiras de idade terciário/quaternária. Parte destes aspectos abordados anteriormente é mostrada na Figura 43.

**Figura 43:** Recorte do mapa geológico de Minas Gerais: Triângulo Mineiro.



Fonte: adaptado de CPRM & COMIG, 2003.

Na Tabela 9 são mostradas as unidades estratigráficas, associadas aos sistemas aquíferos, no Triângulo Mineiro.

**Tabela 9:** Unidades estratigráficas do Triângulo Mineiro e sistemas aquíferos.

ÉON	ERA	PERÍODO E ÉPOCA	SISTEMA AQUÍFERO	FORMAÇÃO	LITOLOGIA	TIPO DE AQUÍFERO
FANEROZÓICO	MESOZÓICO	Cretáceo Superior	<b>SISTEMA AQUÍFERO BAURU</b>	Formação Marília	Arenito com intercalações de laminito arenoso	POROSO
				Formação Uberaba	Arenito, rochas vulcanoclásticas, conglomerado e pelito	POROSO
				Formação Vale do Rio do Peixe	Arenitos eólicos	POROSO
				Formação Santo Anastácio	Arenitos eólicos	POROSO
		Cretáceo Inferior	<b>SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL</b>	Formação Serra Geral	Basalto com intercalações de arenito e diques de diabásio	Fissurado e fissurado misto nos derrames com intertrapes
		Cretáceo Inferior / Jurássico Superior	<b>SISTEMA AQUÍFERO GUARANI</b>	Formação Botucatu	Arenito eólico com intercalações de siltito e argilito	POROSO
		Triássico Inferior / Permiano		Formação Pirambóia	Arenito, lentes de folhelho e interlaminação de arenito e folhelho	POROSO

Fonte: CPRM, 2003.

Na área de abrangência da rede hoje implantada no estado de Minas Gerais, o confinamento do sistema aquífero Guarani é estruturado pelos derrames de basaltos da formação Serra Geral. Existe a possibilidade de intercomunicação entre os sistemas aquíferos Guarani e os aquíferos sobrepostos, através de conexões hidráulicas formadas a partir de fraturamento profundo nas formações basálticas, fissuras e juntas de acamamento. Em estudo realizado na região centro sul de Mato Grosso do Sul, estas conexões foram discutidas (LASTORIA *et al.*, 2006). No município de Ribeirão Preto, constatou-se que as camadas inferiores da formação Serra Geral possuem intercalações de arenitos, indicando contemporaneidade da sedimentação eólica e os primeiros derrames basálticos.

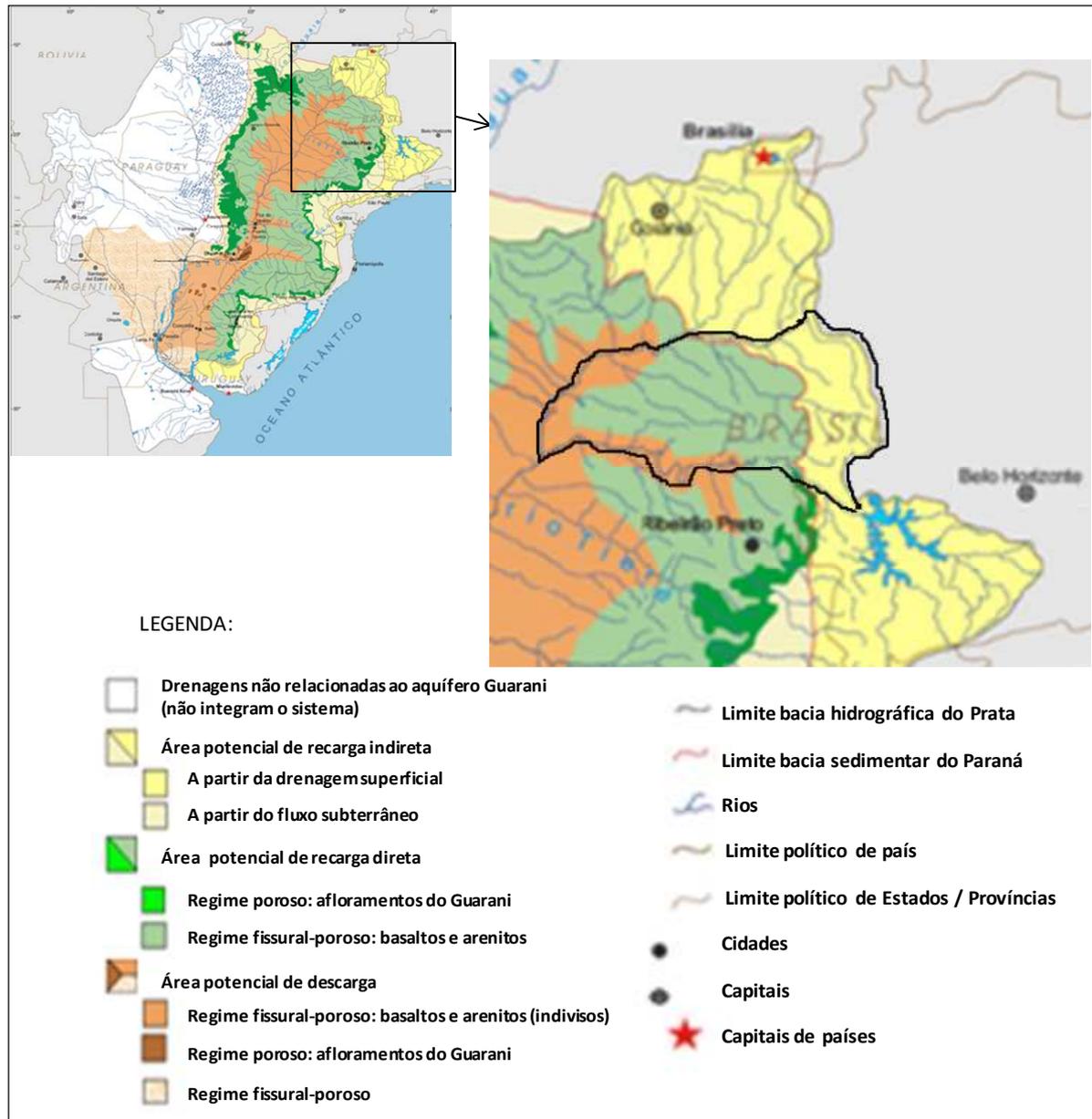
Nos poços tubulares da rede de monitoramento, foram registradas entradas de água nos poços, localizadas nos arenitos intertrape e nas zonas de contato dos basaltos com os arenitos.

O mapeamento hidrogeológico do SAG foi realizado no âmbito do *Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani*. O mapeamento demonstra que a região a oeste do Triângulo Mineiro faz parte da área potencial de recarga indireta a partir da drenagem superficial, fato relevante quando se considera aspectos de interação entre águas subterrâneas e superficiais e preservação ambiental. As regiões limítrofes com o Estado de São Paulo, Goiás e Mato Grosso do Sul, que margeiam os cursos do rio Grande e Paranaíba, foram reconhecidas como área potencial de descarga, pertencentes ao regime fissural/poroso, compreendendo basaltos e arenitos. O mapeamento hidrogeológico em grande escala poderá ser aprimorado, à medida que forem sendo feitos mapeamentos mais detalhados, realizados em escala local. Os dados obtidos através da rede de poços de monitoramento de águas subterrâneas, instalados no domínio do aquífero, contribuirão da mesma forma para o aprimoramento do conhecimento sobre a estrutura do SAG.

O SAG é reconhecido como um “sistema complexo e heterogêneo, onde os fluxos regionais e locais de águas subterrâneas são controlados por estruturas geotectônicas (arcos, falhas e diques), por condicionantes sedimentares (geometria, granulometria, grau de diagênese, estratos que o constituem e sua relação com os estratos inferiores e superiores) e por condicionantes geomorfológicas, altimetria, declividade e formas do relevo” (PSAG, 2009).

Os poços pertencentes à rede do sistema aquífero Guarani - SAG são profundos, com boa produtividade e vazão média de 202 m<sup>3</sup>/h. O SAG, no Triângulo Mineiro, alcança espessuras de 100 a 300 m (CORSI, 2003). A partir dos poços monitorados, foram medidas espessuras dos arenitos variando de 2,4 a 294 m, já os basaltos da formação Serra Geral, sobrepostos aos arenitos, possuem valores de espessura 321 a 973 m.

**Figura 44:** Mapa esquemático do sistema aquífero Guarani, mostrando áreas de afloramento, descarga e recarga, e com destaque para a região de ocorrência deste sistema em Minas Gerais.



Fonte: adaptado de UFSC, 2013.

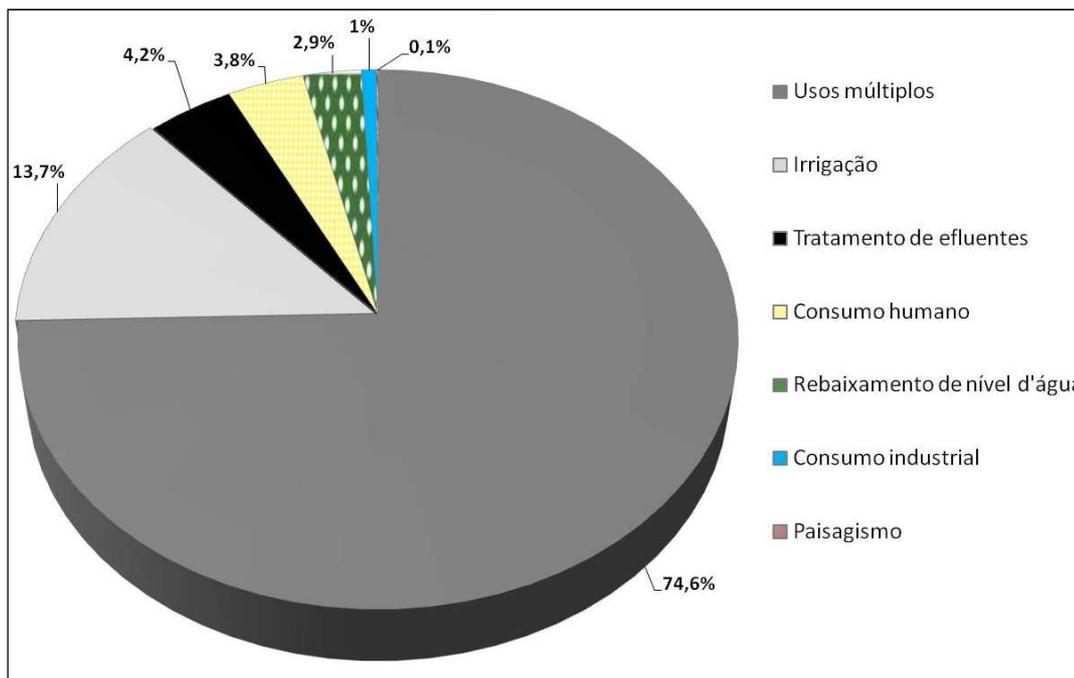
## USOS DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

O Triângulo Mineiro é um importante pólo regional de agropecuária e de intensa utilização da terra pela agricultura, atividade realizada, muitas vezes, sem a aplicação de técnicas adequadas à conservação do solo e, em alguns casos, mediante uso indevido de agrotóxicos, o que contribui para reduzir a qualidade das águas superficiais e que representa risco para a qualidade das águas subterrâneas. Em áreas urbanas, o lançamento de efluentes domésticos sem tratamento nos cursos d'água também contribui para a contaminação das águas subterrâneas, principalmente

nos aquíferos livres aluviais, uma vez que estes possuem interação por meio dos fluxos com os corpos d'água superficiais, os quais, segundo Rebouças (1994), comportam-se como canais de drenagem da unidade aquífera.

Segundo dados obtidos a partir dos levantamentos das vazões subterrâneas outorgadas, os usos consuntivos deste recurso hídrico distribuem-se conforme mostrado na Figura 45, para o Triângulo Mineiro (sub-bacias do rio Grande e do rio Paranaíba).

**Figura 45:** Percentual de vazões outorgadas para as águas subterrâneas na região do Triângulo mineiro, excluídos os usos não consuntivos.



Fonte: SIAM, 2012.

Interessante observar a importância relativa dos usos múltiplos ou combinados na questão do consumo do recurso hídrico subterrâneo, os quais correspondem a quase 75% do uso total. Ressalta-se que os usos múltiplos incluem os usos combinados de dois ou mais dos seguintes tipos de uso: consumo humano, consumo industrial, contenção de taludes, controle de cheias, tratamento de efluentes, extração mineral, geração de energia, irrigação, pesquisa hidrogeológica, rebaixamento de nível d'água, recirculação de água e lançamento de efluentes.

A irrigação corresponde ao segundo maior consumo (aproximadamente 14%) e o consumo humano como quarto maior uso (aproximadamente 4%). Aspecto que se destaca e surpreende é a quantidade relativamente grande do recurso hídrico subterrâneo utilizado na depuração ou no tratamento de efluentes, terceiro maior uso, com 4,2% do total.

A título de informação, foram excluídas as outorgas para os seguintes usos não-consuntivos: controle de cheias, pesquisa hidrogeológica, contenção de taludes, recirculação de água, lançamento de efluentes, transposição de corpo de água e regularização de vazão.

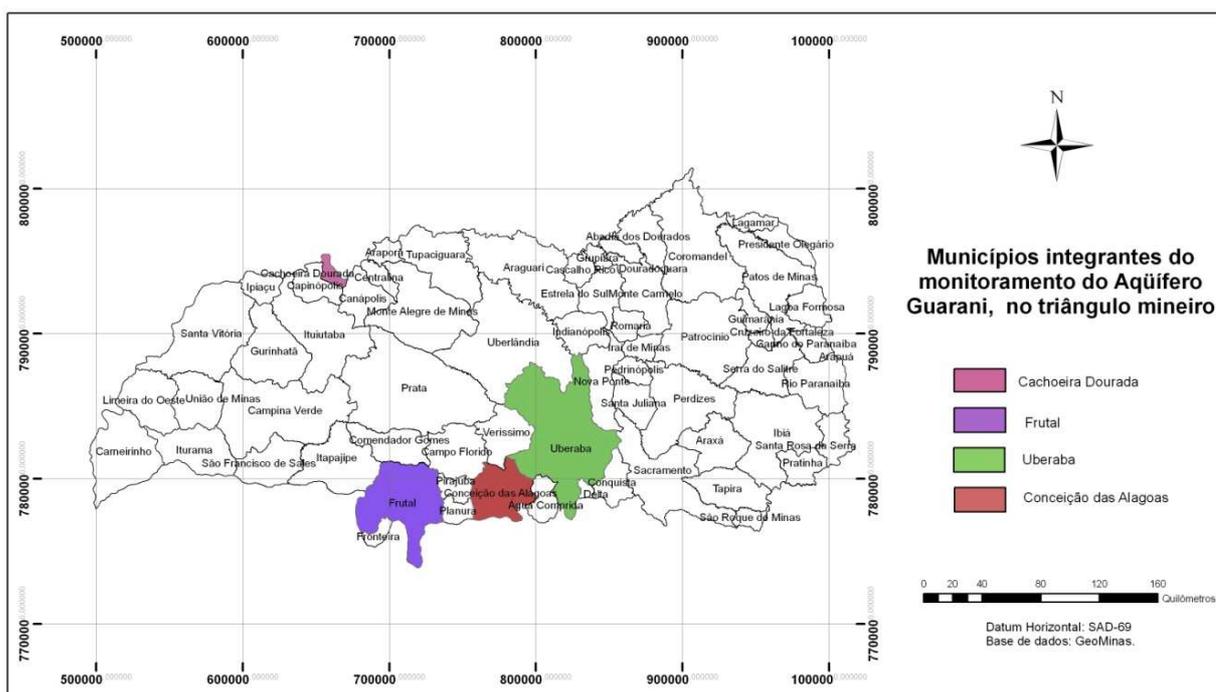
## CAPÍTULO V – MONITORAMENTO DO AQUIFERO GUARANI EM MINAS GERAIS

Na região do Triângulo Mineiro, o monitoramento das águas subterrâneas é realizado em poços do sistema aquífero Guarani e do sistema aquífero Bauru. Este último não é abordado no presente relatório, em função do monitoramento neste sistema ter se iniciado recentemente.

Com relação ao aquífero Guarani, o número de medições é ainda pequeno e, por isso, pouco representativo. Em vista disso, optou-se por não executar o tratamento estatístico destes dados, no momento, ressaltando a importância da continuidade do monitoramento para uma avaliação futura adequada da qualidade deste aquífero, no Estado. Neste relatório, é apresentada a caracterização hidroquímica das águas monitoradas, em analogia ao estudo da divisão hidroquímica do SAG – Sistema Aquífero Guarani conforme apresentado no Programa Estratégico de Ação – PEA, um dos produtos do projeto internacional de estudos desse aquífero.

A rede de monitoramento operada atualmente abrange as sub-bacias dos rios Grande e Paranaíba - UPGRH GD8 e PN3 – nos municípios mostrados na Figura 46.

**Figura 46:** Mapa de localização dos municípios integrantes do monitoramento do aquífero Guarani, no Triângulo Mineiro.



A rede de monitoramento do aquífero Guarani em Minas Gerais, localizada no Triângulo Mineiro (a oeste do Estado), é formada por poços tubulares profundos captando da área confinada, e atravessam, em alguns casos, os sedimentos do grupo Bauru, e os derrames basálticos da formação Serra Geral, até alcançar os arenitos das formações Pirambóia e Botucatu. A profundidade destes poços varia de 341 m (CAL1) a 1156 m (FRT1), os quais são mostrados na Tabela 10 que especifica para cada um deles, o município e os usos de suas águas.

**Tabela 10:** Poços de monitoramento do sistema aquífero Guarani – SAG, com respectivos códigos, identificações do tipo de poço, municípios, localidades e usos.

CÓDIGO DO POÇO	TIPO DE POÇO	MUNICÍPIO	LOCALIDADE	SETOR / USO
CAL1	Dedicado	Conceição das Alagoas	Estância Recanto das Águas	Abastecimento/ Balneabilidade
FRT1	Misto	Frutal	Faz. São Bento da Ressaca Usina Frutal Açúcar e Álcool	Industrial
FRT2	Misto	Frutal	Frutal COPASA	Abastecimento humano
CD3	Dedicado	Cachoeira Dourada	Yquara Termas	Balneabilidade
UBR3	Misto	Uberaba	Área urbana de Uberaba CODAU	Abastecimento humano

**Figura 47:** Fotografia ilustrando a amostragem em um dos poços profundos no aquífero Guarani, e detalhe da sonda multiparamétrica empregada nas medições em campo.



Estudos, realizados no âmbito do *Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do SAG* (2009), levaram à diferenciação das águas subterrâneas do aquífero em diferentes fácies e zonas hidroquímicas, sintetizados na Figura 48.

**Figura 48:** Mapa hidrogeoquímico do sistema aquífero Guarani, modificado de Organização dos Estados Americanos, Aquífero Guarani: Programa Estratégico de Ações – PEA.



**LEGENDA:**

- |  |  |                               |  |
|--|--|-------------------------------|--|
|  | Limite departamental, estadual, provincial e internacional |                               | Sedimentos do Sistema Aquífero Guarani |
|  | Limite do SAG  |                               | Sedimentos pré-SAG                     |
|  | Zonas químicas   |                               | Embasamento                            |
|  | Zonas com conteúdo salino elevado                          | <b>Convenções geológicas:</b> |  |
|  | Zonas com concentração excessiva de flúor                  |                               | Arco                                   |
|  | Sedimentos pós-SAG   |                               | Arco Sugerido                          |
|  | Basaltos   |                               | Falha                                  |
|  | Capital do País  |                               | Lineamento                             |
|  |  |                               | Sinclinal                              |



Fonte: SG/SAG. Modificado do Informe Final de Hidrogeologia. Consórcio Guarani 2008

Observando-se o mapa apresentado na figura anterior, as estações monitoradas pelo IGAM estão localizadas nas zonas hidroquímicas II, que são definidas como áreas intermediárias do setor confinado do SAG. Segundo os estudos realizados pelo *Projeto SAG*, as águas subterrâneas dessas zonas hidroquímicas sofrem influência, em sua composição, de aquíferos sotopostos, no caso, dos basaltos da Formação Serra Geral e dos arenitos do Grupo Bambuí.

Quanto às fácies hidroquímicas presentes na região monitorada, as águas podem ser associadas aos seguintes tipos de água:

- Tipo A – águas potáveis bicarbonatadas sódicas e calcio-magnésicas e calcio-sódicas.
- Tipo B – águas em sua maioria potáveis, bicarbonatadas sódicas com maior grau de mineralização e condutividade elétrica média. São águas que representam uma evolução do tipo A.
- Tipo D – águas cloretadas sódicas com alta mineralização e condutividade elétrica maior que 10.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . (características das águas do poço CD3 de Cachoeira Dourada).

A análise comparativa da hidroquímica dos poços monitorados com aqueles realizados no âmbito do *Projeto SAG* obteve os resultados apresentados na Tabela 11.

Características hidrotermais são observadas nos poços monitorados, cuja temperatura das águas variou entre 31°C e 48°C. O aquecimento natural das fontes ocorre em grandes profundidades e é dado em função do grau geotérmico presente na região. Essa característica faz com que o uso para recreação seja observado na região. Nesse caso, a outorga para o direito de uso é responsabilidade do Departamento Nacional de Produção Mineral- DNPM.

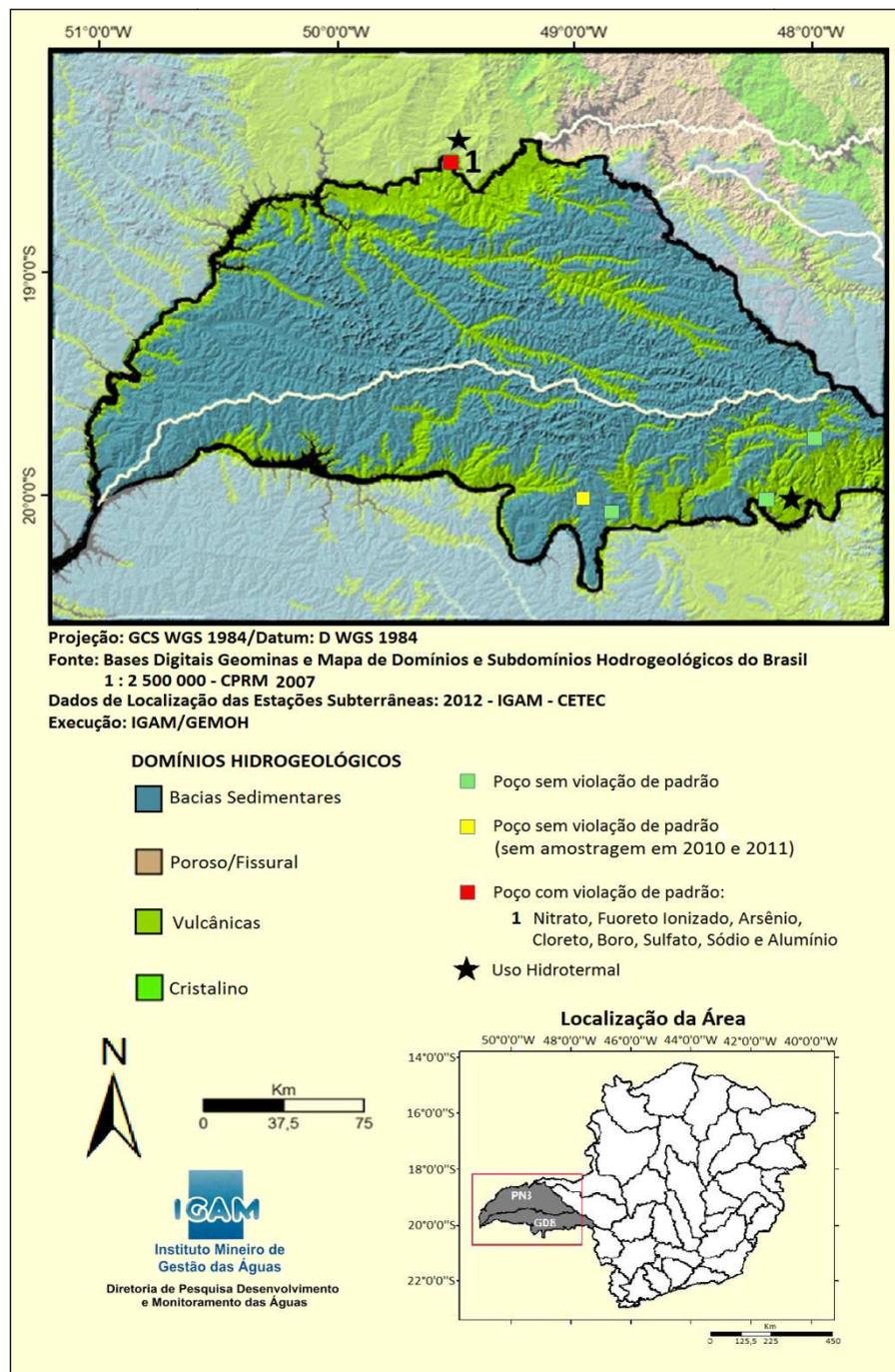
**Tabela 11:** Divisão hidroquímica do aquífero Guarani - analogia com as estações monitoradas no estudo do Programa Estratégico de Ação – PEA.

<b>DIVISÃO HIDROQUÍMICA DO AQUÍFERO GUARANI - ANALOGIA COM AS ESTAÇÕES MONITORADAS ESTUDO DO PROGRAMA ESTRATÉGICO DE AÇÃO/PEA</b>										
Estação	Campanhas	Relação Na/Cl	Relação Cl/SO4	Condutividade Elétrica	Temperatura in Loco	pH in loco	Grupo - Estudo PEA	Descrição Tipo - Estudo PEA	Zona Hidroquímica - Estudo PEA	CLASSIFICAÇÃO por PIPER
FRT1	2009	Na>Cl	Cl<SO4	301,8	-	9,44	Tipo B2	"Águas geralmente potáveis, bicarbonatadas sódicas, com maior grau de mineralização e CE médias. Representa uma evolução das águas do tipo A. A proporção de água salina na mistura para produzir as mudanças observadas pode ser de ≤ 1%."	Zona II	Bicarbonatada sódicas
	2010	Na>Cl	Cl<SO4	295,1	45,7	9,14				
	2011	Na>Cl	Cl<SO4	291,5	48,2°	9,42				
CD3	2009	Na>Cl	Cl<SO4	12060	-	-	Análoga ao Tipo D	"São possivelmente, águas cloretadas sódicas com alta mineralização, o que determina a baixa resistividade elétrica observadas nos perfis geofísicos. Ocorre na Zona IV, observação indireta em perfis elétricos de poços de petróleo da Argentina."	Zona II (Zona limítrofe do SAG)	Águas sulfatadas ou cloretadas sódicas
	2010	Na>Cl	Cl<SO4	12890	38,8°	5,86				
	2011	Na>Cl	Cl<SO4	12600	38,4	7,47				
UBR3	2009	Na>Cl	Cl=SO4	234,0	-	9,35	Tipo A1	"Águas geralmente potáveis, bicarbonatadas cálcicas (Ca-HCO3) e subordinadamente águas calco-magnesianas e calco-sódicas. Pouca mineralização e baixas CE. Pequena evolução hidroquímica e composição próxima às águas de recarga"	Zona I (limítrofe entre Zona I e II)	Bicarbonatadas Cálcicas ou magnesianas
	2010	Na>Cl	Cl=SO4	162,9	31,7	7,34				
	2011	Na>Cl	Cl=SO4	150,5	34,6	7,40				
CAL1	2009	Na>Cl	Cl<SO4	132,5	-	8,20	Tipo B2	"Águas geralmente potáveis, bicarbonatadas sódicas, com maior grau de mineralização e CE médias. Representa uma evolução das águas do tipo A. A proporção de água salina na mistura para produzir as mudanças observadas pode ser de ≤ 1%."	Zona II	Bicarbonatadas Cálcicas ou magnesianas
	2010	Na>Cl	Cl<SO4	133,8	34,0	7,77				
	2011	Na>Cl	Cl<SO4	125,9	31,1	8,14				



Ao verificar-se a conformidade das águas monitoradas aos padrões estabelecidos para o uso mais restritivo, o consumo humano, observa-se algumas violações conforme apresentado na Figura 49. No entanto, deve ser observado que apenas as águas captadas na estação UB3 têm essa finalidade e, para esta, não se observa inconformidade dos parâmetros monitorados com aqueles apresentados na Portaria do Ministério da Saúde.

**Figura 49:** Rede de monitoramento no aquífero Guarani no Triângulo Mineiro; principais aquíferos aflorantes na área; e a respectiva ocorrência de violação a padrões legais relacionados a consumo humano e associados a risco à saúde, segundo a Portaria de Potabilidade (nº 2914-2011) do Ministério da Saúde, por poço.



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A qualidade das águas subterrâneas é diretamente influenciada pelo tipo de rocha onde está armazenada, como também pela qualidade da água de recarga, tempo de contato no aquífero, a ocorrência de fontes potencialmente poluidoras, vulnerabilidade natural dos aquíferos, dentre outros. O monitoramento é a ferramenta utilizada, não só para a avaliação de sua qualidade e adequação aos diversos usos, em um determinado momento, mas principalmente para o acompanhamento da evolução da condição de qualidade das águas ao longo do tempo. O conhecimento da condição de qualidade das águas subterrâneas do Estado permite que ações, com vistas ao uso adequado, bem como para a proteção e a conservação sejam adotadas.

Medida necessária é a orientação dos usuários das águas quanto às restrições de uso, inclusive aquelas motivadas por causas naturais. Esta ação deve ser desenvolvida em conjunto com a Secretária Estadual de Saúde e é desejável o envolvimento dos respectivos Comitês de Bacias Hidrográficas.

Buscando melhor interpretar os resultados de qualidade das águas subterrâneas, especialmente, para os poços de monitoramento, cujas análises mostraram alterações da qualidade natural, e orientar futuras ações necessárias à melhoria da qualidade dessas águas, o IGAM tem conduzido estudo de uso e ocupação do solo na região monitorada no Norte de Minas.

O monitoramento das águas subterrâneas executado pelo IGAM tem identificado problemas regionais que requerem atenção dos órgãos gestores de meio ambiente, recursos hídricos e de saúde, de concessionárias e de consumidores de água.

No caso das águas subterrâneas na mesorregião Norte de Minas, são desejáveis também ações, junto às Prefeituras Municipais, no sentido de melhoria da qualidade dessas águas, especialmente para o consumo humano, as quais podem incluir a viabilização de pré-tratamento simplificado nas comunidades (tais como filtros para o abrandamento da água – redução da dureza), ou o uso combinado das águas subterrâneas com as águas pluviais, mediante armazenamento e tratamento simplificado. Importante também será a atuação dos Comitês de Bacia no detalhamento do conhecimento das características e da qualidade das águas subterrâneas nas UPGRH do Estado.

O presente relatório evidencia a importância da delimitação de áreas de proteção no entorno dos poços de produção, o que deve ser desenvolvido em conjunto com os órgãos responsáveis pelo abastecimento público, bem como da delimitação de áreas de restrição e controle, em conjunto com órgãos de saúde e órgãos gestores do meio ambiente, de forma preventiva e para cada uso específico, considerando a qualidade das águas subterrâneas e outras situações, a exemplo de áreas de risco.

Fundamental é a ampliação das redes existentes, buscando aumentar a cobertura no Estado. O IGAM vem buscando ampliar a rede de monitoramento das águas subterrâneas por meio de parcerias e convênios, inclusive com instituições públicas federais, vislumbrando, no futuro, cobrir todo o Estado, em face da importância de se conhecer para gerir este importante recurso hídrico. Neste sentido, vem inserindo novos pontos de monitoramento – caso da bacia do rio das Velhas, em fase de delineamento da rede. Todavia, ainda não se dispõe de resultados de medições nestas novas frentes.

No caso do monitoramento realizado no norte mineiro, o mesmo carece ainda de maior número de medições, mantida a atual configuração dos poços. Mesmo com as atuais limitações, o IGAM vem se esforçando no sentido de buscar ampliar o conhecimento das características e da qualidade das águas dos aquíferos; para subsidiar ações preventivas relacionadas ao uso adequado do recurso hídrico e para nortear futuro estabelecimento de valores de referência.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2011*. São Paulo: 2011. 184 p. Relatório.

ANA - Agência Nacional de Águas. *Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Verde Grande*. Brasília: 2011. 180 p. Relatório-Síntese.

ANA - Agência Nacional de Águas. *Cadernos de recursos hídricos: disponibilidades e demandas de recursos hídricos no Brasil*. Brasília: MMA, 2005. 123 p. Relatório.

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

BERTOLO, Reginaldo Antônio; Marcolan, Leonardo Nobuo Oshima; Bourotte, Christine Laure Marie. Relações Água-Rocha e a Hidrogeoquímica do Cromo na Água Subterrânea de Poços de Monitoramento Multiníveis de Urânia, SP, Brasil. *Geologia USP Série Científica*. São Paulo, v. 9, n. 2, p. 47-62, junho 2009.

BORBA, Ricardo Perobelli; FIGUEIREDO, Bernardino Ribeiro. A influência das condições geoquímicas na oxidação da arsenopirita e na mobilidade do arsênio em ambientes superficiais tropicais. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 34, n. 4, p. 489-500, 2004.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. *Censo Demográfico 2010 – Dados preliminares*. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em nov/2012.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – PNSB/2008*. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em nov/2012.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. 2005. *Resolução Conama nº 357* de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459> > Acesso em: maio 2012.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. 2008. *Resolução Conama Nº 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 do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. 2009. *Resolução Conama nº 420* de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=620>> Acesso em: maio 2012.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH. 2001. *Resolução CNRH nº 15* de 11 de janeiro de 2001. Estabelece diretrizes gerais para a gestão de águas subterrâneas. Disponível em: < [http://www.cnrh.gov.br/sitio/index.php?option=com\\_content&view=article&id=14:resolucoes&catid=16:resolucoes&Itemid=42](http://www.cnrh.gov.br/sitio/index.php?option=com_content&view=article&id=14:resolucoes&catid=16:resolucoes&Itemid=42)>. Acesso em: maio 2012.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH. 2001. *Resolução CNRH nº 16* de 8 de maio de 2001. Estabelece critérios gerais para a outorga de direito de uso de recursos hídricos. Disponível em: < [http://www.cnrh.gov.br/sitio/index.php?option=com\\_content&view=article&id=14:resolucoes&catid=16:resolucoes&Itemid=42](http://www.cnrh.gov.br/sitio/index.php?option=com_content&view=article&id=14:resolucoes&catid=16:resolucoes&Itemid=42)>. Acesso em: maio 2012.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH. 2002. *Resolução CNRH nº 22* de 24 de maio de 2002. Estabelece diretrizes para inserção das águas subterrâneas no instrumento Planos de Recursos Hídricos. Disponível em: < [http://www.cnrh.gov.br/sitio/index.php?option=com\\_content&view=article&id=14:resolucoes&catid=16:resolucoes&Itemid=42](http://www.cnrh.gov.br/sitio/index.php?option=com_content&view=article&id=14:resolucoes&catid=16:resolucoes&Itemid=42)>. Acesso em: maio 2012.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH. 2002. *Resolução CNRH nº 29* de 11 de dezembro de 2002. Define diretrizes para a outorga de uso dos recursos hídricos para o aproveitamento dos recursos minerais. Disponível em: < [http://www.cnrh.gov.br/sitio/index.php?option=com\\_content&view=article&id=14:resolucoes&catid=16:resolucoes&Itemid=42](http://www.cnrh.gov.br/sitio/index.php?option=com_content&view=article&id=14:resolucoes&catid=16:resolucoes&Itemid=42)>. Acesso em: maio 2012.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH. 2005. *Resolução CNRH nº 48* de 21 de março de 2005. Estabelece critérios gerais para a cobrança pelo uso dos recursos hídricos. Disponível em: < [http://www.cnrh.gov.br/sitio/index.php?option=com\\_content&view=article&id=14:resolucoes&catid=16:resolucoes&Itemid=42](http://www.cnrh.gov.br/sitio/index.php?option=com_content&view=article&id=14:resolucoes&catid=16:resolucoes&Itemid=42)>. Acesso em: maio 2012.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH. 2005. *Resolução CNRH nº 55* de 28 de novembro de 2005. Estabelece diretrizes para elaboração do Plano de Utilização da Água na Mineração-PUA, conforme previsto na Resolução CNRH no 29, de 11 de dezembro de 2002. Disponível em: < [http://www.cnrh.gov.br/sitio/index.php?option=com\\_content&view=article&id=14:resolucoes&catid=16:resolucoes&Itemid=42](http://www.cnrh.gov.br/sitio/index.php?option=com_content&view=article&id=14:resolucoes&catid=16:resolucoes&Itemid=42)>. Acesso em: maio 2012.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH. 2007. *Resolução CNRH nº 76* de 16 de outubro de 2007. Estabelece diretrizes gerais para a integração entre a gestão de recursos hídricos e a gestão de águas minerais, termais, gasosas, potáveis de mesa ou destinadas a fins balneários. Disponível em: <[http://www.cnrh.gov.br/sitio/index.php?option=com\\_content&view=article&id=14:resolucoes&catid=16:resolucoes&Itemid=42](http://www.cnrh.gov.br/sitio/index.php?option=com_content&view=article&id=14:resolucoes&catid=16:resolucoes&Itemid=42)>. Acesso em: maio 2012.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH. 2008. *Resolução CNRH nº 91* de 5 de novembro de 2005. Dispõe sobre procedimentos gerais para enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneos. Disponível em: <[http://www.cnrh.gov.br/sitio/index.php?option=com\\_content&view=article&id=14:resolucoes&catid=16:resolucoes&Itemid=42](http://www.cnrh.gov.br/sitio/index.php?option=com_content&view=article&id=14:resolucoes&catid=16:resolucoes&Itemid=42)>. Acesso em: maio 2012.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH. 2008. *Resolução CNRH nº 92* de 5 de novembro de 2005. Estabelece critérios e procedimentos gerais para proteção e conservação das águas subterrâneas no território brasileiro. Disponível em: <[http://www.cnrh.gov.br/sitio/index.php?option=com\\_content&view=article&id=14:resolucoes&catid=16:resolucoes&Itemid=42](http://www.cnrh.gov.br/sitio/index.php?option=com_content&view=article&id=14:resolucoes&catid=16:resolucoes&Itemid=42)>. Acesso em: maio 2012.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH. 2010. *Resolução CNRH nº 107* de 13 de abril de 2010. Estabelece diretrizes e critérios a serem adotados para o planejamento, a implantação e a operação de Rede Nacional de Monitoramento Integrado Qualitativo, Quantitativo de Águas Subterrâneas. Disponível em: <[http://www.cnrh.gov.br/sitio/index.php?option=com\\_content&view=article&id=14:resolucoes&catid=16:resolucoes&Itemid=42](http://www.cnrh.gov.br/sitio/index.php?option=com_content&view=article&id=14:resolucoes&catid=16:resolucoes&Itemid=42)>. Acesso em: maio 2012.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH. 2011. *Resolução CNRH nº 126* de 20 de junho de 2011. Aprova diretrizes para o cadastro de usuários de recursos hídricos e para a integração das bases de dados referentes aos usos de recursos hídricos superficiais e subterrâneos. Disponível em: <[http://www.cnrh.gov.br/sitio/index.php?option=com\\_content&view=article&id=14:resolucoes&catid=16:resolucoes&Itemid=42](http://www.cnrh.gov.br/sitio/index.php?option=com_content&view=article&id=14:resolucoes&catid=16:resolucoes&Itemid=42)>. Acesso em: maio 2012.

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.

BRASIL. Congresso Nacional. Lei n. 9.433 de 8 de janeiro de 1997. Institui a política nacional de recursos hídricos, cria o sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos, regulamenta o inciso xix do art. 21 da constituição federal, e altera o art. 1º da lei 8.001, de 13 de março de 1990. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Poder Executivo, Brasília, DF, 9 jan. 1997. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9433.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm)> Acesso em: maio 2012.

BRASIL. Congresso Nacional. Lei n. 9.984 de 17 de julho de 2000. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas - ANA, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Poder Executivo, Brasília, DF, 18 jul. 2000. Disponível em: < [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9984.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9984.htm)> Acesso em: maio 2012.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas & SIG. Org.; Bizzi, Luiz Augusto; Schobbenhaus, Carlos; Vidotti, Roberta Mary; Gonçalves, João Henrique. Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2003. 692 p.

CARDOSO, F.B. da F. & Oliveira, F.R. de & Nascimento, F. S. do & Varella Neto, P. L., 2008. *Poços Tubulares Construídos no Brasil*, in: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, XVI ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS. ABAS, Natal – RN. 2008.

CBH JEQUITÁI E PACUÍ – Comitê das Bacias Hidrográficas dos rios Jequitáí e Pacuí. Plano diretor das bacias hidrográficas dos rios Jequitáí, Pacuí e trechos do rio São Francisco. 2010. 61 p. Resumo-Executivo.

CETEM - Centro De Tecnologia Mineral. *Agrominerais para o Brasil*. Rio de Janeiro: 2010. 34 p.

CORSI, ALESSANDRA C. Compartimentação morfoestrutural da Região do Triângulo Mineiro (MG): aplicado à exploração de recursos hídricos subterrâneos. Tese de Doutorado do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 2003.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Geologia da Folha Monte Azul\* SD.23-Z-D-II. Programa Geologia do Brasil – Levantamentos Básicos. Brasília 2007.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil; COMIG – Companhia Mineradora de Minas Gerais. Mapa geológico do estado de Minas Gerais. 2003. Escala: 1:1.000.000. Disponível em:<<http://www.codemig.com.br/uploads/mapag.pdf>>. Acesso em: jul 2012.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Relatório de qualidade das águas subterrâneas no estado de São Paulo: 2004-2006*. Coord.: DIAS, Claudio Luiz & Elzira BARBOUR, Dea Alves [et al.]. São Paulo: Cetesb. 2007. 199 p. Disponível em: < <http://www.cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em: jul. 2011.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Relatório de qualidade das águas subterrâneas do estado de São Paulo: 2007-2009*. Coord.: Modesto, Rosângela Pacini [et al.]. São Paulo: Cetesb. 2010. 258 p. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/publicacoes.asp>>. Acesso em: nov. 2011.

EGGER, Valdinei Alves. *O supergrupo Espinhaço entre Serranópolis de Minas e Mato Verde (MG): Estratigrafia e implicações para o entendimento dos depósitos aluvionares de diamantes da região*. Dissertação de mestrado do Instituto de Geociências da UFMG, Programa de Pós-graduação em Geologia, 2006. Belo Horizonte, MG. Disponível em: <[www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/PesquisaObraForm.do?select](http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/PesquisaObraForm.do?select)>. Acesso em: março - 2013.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. Programa Minas Trata Esgoto: Relatório De Progresso 2007-2009. Coord.: Penido, Rodolfo Carvalho Salgado & Amaral, Rosa Carolina... [et al.]. Belo Horizonte: FEAM. 2012. 32 p. Disponível em: <<http://www.feam.br/images/stories/minastrataesgoto/relatorio-minas-trata-esgoto.pdf>>. Acesso em: nov. 2012.

FRAGA, Cesar G. Relevance, essentiality and toxicity of trace elements in human health – review. *Molecular Aspects of Medicine*, v. 26, p. 235–244, 2005.

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.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. Informativo CEI 2009. Produto interno bruto das regiões de planejamento de Minas Gerais/2009. Disponível em: <<http://www.fjp.gov.br/index.php/analise-economica/pib-produto-interno-bruto-de-minas-gerais>>. Acesso em: set. 2012.

GACIRI, S.J.; DAVIES, T.C. The occurrence and geochemistry of fluoride some natural waters of Kenya. *Journal of Hydrology*, v. 143, p. 395-412, 1993.

GASTMANS, Didier; VEROSLAVSKY, Gerardo; CHANG, Hung Kiang; MARMISOLLE, Josefina; OLEAGA, Alejandro. Influência do arcabouço hidroestratigráfico nas ocorrências de arsênio em águas subterrâneas ao longo do corredor termal do rio Uruguai (Argentina – Brasil – Uruguai). *Geociências*, v. 29, n. 1, 2010.

GILKESON, Robert H.; PERRY Jr., Eugene C.; CARTWRIGHT, Keros. Isotopic and geologic studies to identify the sources of sulfate in groundwater containing high barium concentrations. 42p. 1978. Disponível em: <<http://web.extension.illinois.edu/iwrc/pdf/165.pdf>>. Acesso em: maio-2013.

GOMES, Olga Venimar de Oliveira; AIRES, José Ribeiro; MARQUES, Eduardo Duarte; SILVA-FILHO, Emmanoel Vieira da. Bário e Flúor Dissolvidos nas Águas Subterrâneas do Leste da Baía da Guanabara – RJ. Congresso Nacional de Geoquímica (13). Anais...Gramado, 2011.

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. *Monitoramento da Qualidade das Águas Subterrâneas de Minas Gerais: projeto aquífero Guarani – 2009 e projeto Jaíba, Varzelândia e Verdelândia – 2005 a 2011*. Belo Horizonte: IGAM, 2009, v. 1. Disponível em: <[http://search.4shared.com/postDownload/FMmWdm53/relatrio\\_completoguaranieja.html](http://search.4shared.com/postDownload/FMmWdm53/relatrio_completoguaranieja.html)>. Acesso em: maio 2011. Relatórios.

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. *Monitoramento da qualidade das águas superficiais da bacia do rio Paranaíba: Relatório 2009*. Belo Horizonte: IGAM, 2009. Relatórios.

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. *Monitoramento da qualidade das águas superficiais da bacia do rio Grande: Relatório 2009*. Belo Horizonte: IGAM, 2009. Relatórios.

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.

LASTORIA, Giancarlo; SINELLI, Osmar; KIANG, Chang Hung; HUTCHEON, Ian; PARANHOS Filho, Antônio Carlos; GASTMANS, Didier. HIDROGEOLOGIA da formação Serra Geral no estado de Mato Grosso do Sul. *Águas Subterrâneas*, v.20, n.1, p.139-150, 2006.

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

MACHADO, José Luiz Flores. A redescoberta do Aquífero Guarani. *Scientific American – Brasil*. Ed. 47 - 2006. Disponível em: < [http://www2.uol.com.br/sciam/reportagens/a\\_redescoberta\\_do\\_aquifero\\_guarani\\_imprimir.html](http://www2.uol.com.br/sciam/reportagens/a_redescoberta_do_aquifero_guarani_imprimir.html)>. Acesso em: maio 2013.

MANAHAN, Stanley E. *Fundamentals of Environmental Chemistry: Environmental Chemistry of Water*. 2ª Ed. 1003p. Lewis Publishers. 2001.

MINAS GERAIS. Assembléia Legislativa. Lei n. 13.199 de 29 de janeiro de 1999. Dispõe sobre a política estadual de recursos hídricos e dá outras providências. Disponível em: < <http://www.almg.gov.br/consulte/legislacao/completa/completa.html?tipo=LEI&num=13199&comp=&ano=1999>> Acesso em: maio 2012.

MINAS GERAIS. Assembléia Legislativa. Lei n. 13.771 de 11 de dezembro de 2000. Dispõe sobre a administração, a proteção e a conservação das águas subterrâneas de domínio do estado e dá outras providências. Disponível em: < <http://www.almg.gov.br/consulte/legislacao/completa/completa.html?tipo=LEI&num=13771&comp=&ano=2000>> Acesso em: maio 2012.

MINAS GERAIS. Assembléia Legislativa. Lei n. 15.056 de 31 de março de 2004. Estabelece diretrizes para a verificação da segurança de barragem e de depósito de resíduos tóxicos industriais e dá outras providências. Disponível em: < <http://www.almg.gov.br/consulte/legislacao/completa/completa.html?tipo=LEI&num=15056&comp=&ano=2004>> Acesso em: maio 2012.

MINAS GERAIS. Assembléia Legislativa. Decreto n. 41.578 de 8 de março de 2001. Regulamenta a lei nº 13.199, de 29 de janeiro de 1999, que dispõe sobre a política estadual de recursos hídricos. Disponível em: < <http://www.almg.gov.br/consulte/legislacao/completa/completa.html?tipo=DEC&num=41578&comp=&ano=2001>> Acesso em: maio 2012.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado do Planejamento e Gestão, coordenação. Plano Mineiro de Desenvolvimento integrado - PMDI 2011-2030. Belo Horizonte, MG, 2010. Disponível em: <[http://www.planejamento.mg.gov.br/governo/publicacoes/plano\\_mineiro\\_des\\_integrado.asp](http://www.planejamento.mg.gov.br/governo/publicacoes/plano_mineiro_des_integrado.asp)>. Acesso em: ago. 2012.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. Portaria n. 2914 de 14 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. *Diário Oficial da União*, Poder Executivo, Brasília, DF, 14 dez. 2011. Seção 1. p. 39. Disponível em: <[http://portal.saude.gov.br/portal/arquivos/pdf/port\\_2914\\_qualidade\\_h2o.pdf](http://portal.saude.gov.br/portal/arquivos/pdf/port_2914_qualidade_h2o.pdf)>. Acesso em: 19 abr. 2012.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *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.

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 .

PACHECO Jr., A. C.; SOUZA, E. L.; ROCHA FILHO, G. N. da. Estudo experimental da capacidade de sorção e desorção de fenóis em solos da área da Albras – Barcarena/PA – Brasil. *Geochimica. Brasilienses*, v. 19, n. 1, p. 37-47. 2005.

OLIVEIRA, Gabriel de; LUZ, André Moscardo Salles Almeida; MORAES, Elisabete Caria; RUDORFF, Bernardo Friedrich Theodor. Variação temporal dos componentes do balanço radiativo em áreas de cana-de-açúcar no oeste de MG e sudeste de GO. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR (16): anais...*, Foz do Iguaçu, p. 1657-1664, 2013.

OLIVEIRA, L. A.; CAMPOS, J. E. G. Parâmetros hidrogeológicos do sistema aquífero Bauru na região de Araguari/MG: fundamentos para a gestão do sistema de abastecimento de água. *Revista Brasileira de Geociências*. 2004. Disponível em: <[sbgeo.org.br/pub\\_sbg/rbg/vol34\\_down/3402/1401.pdf](http://sbgeo.org.br/pub_sbg/rbg/vol34_down/3402/1401.pdf)>. Acesso em: ago. 2012.

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.

PSAG – PROJETO DE PROTEÇÃO AMBIENTAL E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI. *Aquífero Guarani – Programa Estratégico de Ação (PEA)*. Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani. 2009. 426 p.

REBOUÇAS, A.C. Gestão sustentável dos grandes aquíferos. Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas: ABAS. Anais... Recife/PE. p. 131 – 139. 1994. Disponível em: <<http://aguassubterraneas.emnuvens.com.br/asubterraneas/article/.../16363>>. Acesso em: set. 2012.

REIS, LAÍS N. G. Mapeamento da Expansão da cana-de-açúcar na Mesorregião Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba por meio de imagens TM/Landsat. Monografia apresentada para obtenção do título de Bacharel em Geografia. Instituto de Geografia na Universidade Federal de Uberlândia, 2010. Disponível em: <[http://www.geografiaememoria.ig.ufu.br/downloads/Lais\\_Naiara\\_Goncalves\\_dos\\_Reis.pdf](http://www.geografiaememoria.ig.ufu.br/downloads/Lais_Naiara_Goncalves_dos_Reis.pdf)>. Acesso em: ago. 2012.

SÁ JUNIOR, Arinaldo. Aplicação da classificação de Köppen para o zoneamento climático para o estado de Minas Gerais. Orientador: Luiz Gonzaga de Carvalho. 2009. 101 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Água e Solo), Programa de Pós-graduação em Engenharia de Agrícola da Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

SIAM – Sistema Integrado de Informações Ambientais. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD) – Minas Gerais. 2012. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/siam/login.jsp>>. Acesso em: dez 2012.

SOUZA, Maria do Carmo Fonte Boa. *Aspectos hidrodinâmicos e avaliação da qualidade das águas subterrâneas nas sub-bacias do Rio Verde Grande, Jequitaí e Pacuí – MG*. Orientadora: Sílvia Maria Alves Corrêa Oliveira. 2013. 164 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente), Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

SOUZA, M<sup>a</sup> do Carmo F. B.; OLIVEIRA, Sílvia C. Oliveira; PAIXÃO, Maricene M. de O. M. P.; HAUSSMANN, Maria Goretti. *Avaliação da qualidade e do potencial das águas subterrâneas do aquífero Bambuí no norte de Minas Gerais*. Rev. Bras. de Rec. Híd. No prelo 2014.

SOUZA, O. P; MELO, B. Características da região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba para produção de fruta. Disponível em: <<http://www.fruticultura.iciag.ufu.br/noticiaeafins.html>>. Acesso em: jun/2013.

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina. Mapa do sistema aquífero Guarani. 2013. Disponível em: [http://www.aquiferoguarani.ufsc.br/banco\\_de\\_dados.html](http://www.aquiferoguarani.ufsc.br/banco_de_dados.html). Acesso em: mar 2013.

VARGAS, William Medrano. Evaluación de la calidad de aguas residuales de la planta de tratamiento de Alba Rancho (Semapa) com fines de Riego. 2001. 42 F. Dissertação – Centro de Levantamientos Aeroespaciales y Aplicaciones SIG para el Desarrollo Sostenible de los Recursos Naturales – CLAS, Cochabamba, 2001.

VON SPERLING, Eduardo. Afinal, quanta água temos no planeta? *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 11, n.4, p. 189-199, 2006.

WOLFF, G; ASSIS, L.R.; PEREIRA, G.C.; CARVALHO, J.G.; CASTRO, E.M. Efeitos da toxicidade do zinco em folhas de *Salvinia auriculata* cultivadas em solução nutritiva. *Planta Daninha*, Viçosa, v. 27, n. 1, p.133-137, 2009.

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>> Acesso em: mar. 2012.

## **APÊNDICE I - ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: ASPECTOS LEGAIS**

## ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: ASPECTOS LEGAIS

O arcabouço legal brasileiro para gestão de recursos hídricos foi construído com base nos aspectos ligados às águas superficiais, especialmente no Direito de Água, relacionado à regulamentação do uso do recurso hídrico. As normas que tratavam das águas subterrâneas mantiveram-se, por muito tempo, exclusivamente na esfera federal e tratavam dos recursos hídricos subterrâneos de forma indireta (com exceção do Código de Águas - Decreto nº 24.643/1934). Neste contexto, podem ser citados os seguintes instrumentos legais: águas minerais (Código de Águas Minerais - Decreto-Lei nº 7.841/1945, e legislação mineral), proteção do meio ambiente (Código Penal - Decreto-Lei nº 2.848/40; Código Florestal - Lei nº 4.771/1965; Política Nacional de Meio Ambiente - Lei nº 6.938/1981); e qualidade da água para consumo humano (legislação sobre saúde pública).

Em função da concepção de que estas águas são de domínio estadual, postergou-se a normatização nacional. Este cenário muda gradativamente com a Constituição Federal de 1988, com a promulgação da chamada *Lei das Águas*, a Lei Federal nº 9.433 de 1997 que, dentre outros, instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos; além de outros marcos, como as discussões sobre o Projeto Aquífero Guarani, iniciado em 1999; e a criação, em 2000, da Câmara Técnica Permanente de Águas Subterrâneas do Conselho Nacional de Recursos Hídricos - CNRH.

Atualmente, dispõem de legislação estadual sobre as águas subterrâneas: Alagoas, Ceará, Goiás, Minas Gerais, Pará, Pernambuco, Rio de Janeiro e São Paulo.

### LEGISLAÇÃO FEDERAL

A Constituição Federal de 1988, em vigência, muito pouco modificou o texto do Código de Águas. Uma das poucas alterações feitas é a extinção do domínio privado da água, previsto em alguns casos naquele antigo diploma legal. Todos os corpos d'água, a partir de então, passaram a ser de domínio público. No artigo 20, III, determina como bens da União os lagos, os rios e quaisquer correntes de água em terrenos de seu domínio, ou que banhem mais de um Estado (trans-estaduais); sirvam de limites com outros países, ou se estendam a território estrangeiro ou dele provenham (transfronteiriços), bem como os terrenos marginais e as praias fluviais. A Constituição estabelece, em seu artigo 26, inciso I:

*“Incluem-se entre os bens dos Estados: as águas superficiais ou subterrâneas, fluentes, emergentes e em depósito, ressalvadas, neste caso, na forma da lei, as decorrentes de obras da União”* (grifo nosso).

A Lei nº 9.433 de 1997 estabeleceu o regime de outorga e a cobrança de uso dos recursos hídricos, estabelecendo o aspecto valorativo no que se refere aos usos múltiplos da água, às prioridades desses usos, ao seu valor econômico, à sua finitude e à participação popular da gestão. No caso específico da água subterrânea, a Lei nº 9.433/97 estabelece, em seu artigo 12, a sujeição ao regime de outorga da extração de água de aquífero subterrâneo para consumo final ou insumo no processo produtivo (inciso II). Ao tratar sobre a utilização da água subterrânea, a Lei 9.433/97 dispõe, em seu artigo 49, que constitui infração perfurar poços para extração de água subterrânea ou operá-los sem a devida autorização-outorga (inciso V).

Por sua vez, a Lei nº 9.984/2000, que dispõe sobre criação da Agência Nacional de Águas, ANA – entidade responsável pela implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e pela coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, confere ao referido órgão regulador a competência administrativa para conceder outorgas, por intermédio de autorização, o direito de uso dos recursos hídricos de domínio da União (art. 4º, inciso IV). E ainda, atribui poderes à ANA para implementar, em articulação com os Comitês de Bacia Hidrográfica, a cobrança pelo uso de recursos hídricos de domínio da União (inciso VIII).

Em 2008, foi publicada a Resolução Conama nº 396, que dispõe ou estabelece, dentre outros:

- A classificação das águas subterrâneas;
- Diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas, condicionado a: caracterização hidrogeológica e hidrogeoquímica, caracterização da vulnerabilidade e dos

riscos de poluição, cadastramento de poços existentes e em operação, uso e a ocupação do solo e seu histórico, viabilidade técnica e econômica do enquadramento, localização das fontes potenciais de poluição, e qualidade natural e a condição de qualidade das águas subterrâneas;

- Diretrizes ambientais para prevenção e controle da poluição das águas subterrâneas, incluindo: Áreas de Proteção de Aquíferos e Perímetros de Proteção de Poços de Abastecimento; e Áreas de Restrição e Controle do Uso da Água Subterrânea.

A Resolução Conama nº 396/2008 também estabelece diretrizes para o monitoramento das águas subterrâneas pelos órgãos ambientais, as quais poderão ser alteradas em função dos usos preponderantes, das características hidrogeológicas, hidrogeoquímicas, das fontes de poluição e de outros critérios técnicos definidos pelo órgão competente, com destaque para o seguinte:

1. Parâmetros mínimos monitorados: de natureza físico-química – Sólidos totais dissolvidos - STD, nitrato, pH, turbidez, condutividade elétrica – e biológica – coliformes termotolerantes (qualitativos), e medição do nível d'água (quantitativo). A cada cinco anos, deverá ser feita caracterização da qualidade da água contemplando todos os parâmetros listados no Apêndice I da Resolução;
2. Frequência mínima de monitoramento: no início, semestral e reavaliada após período representativo;
3. Amostras: coletadas utilizando métodos padronizados em pontos de amostragem representativos da área de interesse e, no caso de amostragem em poços tubulares e de monitoramento, estes deverão ser construídos de acordo com as normas técnicas vigentes;
4. Análises: realizadas utilizando-se métodos padronizados em amostras integras, sem filtração ou qualquer outra alteração, a não ser o uso de preservastes que, quando necessários, deverão seguir as normas técnicas vigentes. As análises deverão ser feitas em laboratório que atenda aos limites de quantificação praticáveis (anexo I da Resolução);
5. Amostragem, análises e controle de qualidade: realizadas pelo órgão competente, podendo ser utilizado laboratório próprio, conveniado ou contratado, sendo que este deverá possuir critérios e procedimentos de qualidade aceitáveis;
6. Limites de quantificação: no caso do limite de quantificação da amostra-LQA ser maior do que o limite de quantificação praticável-LQP, este também será aceito para atendimento desta Resolução, desde que tecnicamente justificado. Caso a substância seja identificada na amostra entre o LDM – limite de detecção do método – e o LQA, o fato deverá ser reportado no laudo analítico com a nota de que a concentração não pode ser determinada com confiabilidade, não se configurando, neste caso, não conformidade em relação aos VMPs – valores máximos permitidos - definidos para cada classe;
7. Laudos: deverá ter, além dos parâmetros e respectivos resultados, conteúdo mínimo que contemple a identificação do local da amostragem, as datas e horários de amostragem e entrada da amostra no laboratório, anexando a cadeia de custódia; indicação do método de análise utilizado para cada parâmetro; limites de quantificação praticados pelo laboratório e da amostra, quando for o caso, para cada parâmetro analisado; resultados dos brancos do método e *surrogates* (rastreadores); incertezas de medição para cada parâmetro; e ensaios de adição e recuperação dos analitos na matriz (*Spike*);
8. Tratamento dos dados: Os resultados do monitoramento deverão ser analisados estatisticamente e qualquer aumento de concentração de contaminantes deverá ser monitorado, sua origem identificada, e medidas adequadas de prevenção e controle deverão ser adotadas pelos órgãos competentes.

Posteriormente, a Resolução Conama 420/2009, estabeleceu obrigações para empreendimentos que desenvolvem atividades com potencial de contaminação dos solos e águas subterrâneas e para os órgãos ambientais. Cabe aos primeiros: implantar programa de monitoramento de qualidade do solo e das águas subterrâneas na área do empreendimento e, quando necessário, na sua área de influência direta (...) e apresentar relatório técnico conclusivo sobre a qualidade do solo e das águas subterrâneas, a cada solicitação de renovação de licença e previamente ao encerramento das atividades. Passa a ser de responsabilidade dos órgãos ambientais: publicar a relação das atividades com potencial de contaminação dos solos e das águas subterrâneas, com fins de orientação das ações de prevenção e controle da qualidade do solo. As atividades com potencial de contaminação das águas subterrâneas foram definidas com base na Lei Federal nº 10.165/2000, em seu anexo VIII, incluindo os seguintes grupos de atividades: Extração e Tratamento de Minerais, Indústria de

Produtos Minerais Não Metálicos, Indústria Metalúrgica, Indústria Química, Indústria Mecânica, Indústria de material Elétrico, Eletrônico e Comunicações, Indústria de Material de Transporte, Indústria de Madeira, Indústria de Papel e Celulose, Indústria de Borracha, Indústria de Couros e Peles, Indústria Têxtil, de Vestuário, Calçados e Artefatos de Tecidos, Indústria de Produtos de Matéria Plástica, Indústria do Fumo, usinas de produção de concreto e de asfalto, Indústria de Produtos Alimentares e Bebidas, produção de energia termoelétrica; tratamento e destinação de resíduos industriais líquidos e sólidos; disposição de resíduos especiais tais como: de agroquímicos e suas embalagens; usadas e de serviço de saúde e similares; destinação de resíduos de esgotos sanitários e de resíduos sólidos urbanos, inclusive aqueles provenientes de fossas; dragagem e derrocamentos em corpos d'água; recuperação de áreas contaminadas ou degradadas, Transporte, Terminais, Depósitos e Comércio, Turismo, Uso de Recursos Naturais. Além das Resoluções Conama, merecem destaque as Resoluções do Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH, cujos aspectos principais referentes ao monitoramento das águas subterrâneas estão resumidos em tabela constante do Apêndice I deste Relatório.

### LEGISLAÇÃO ESTADUAL

Em 1999, foi publicada a Lei Estadual nº 13.199 e seu Decreto regulamentador (nº 41.578) foi sancionado em 2001. Estes instrumentos previram a cooperação entre os entes da federação e a prevenção quanto à disponibilidade e qualidade hídrica. De acordo com a Lei citada:

**Art. 8º** - *O Estado articular-se-á com a União, com outros Estados e com municípios, respeitadas as disposições constitucionais e legais, com vistas ao aproveitamento, ao controle e ao monitoramento dos recursos hídricos em seu território.*

**§ 1º** - *Para o cumprimento dos objetivos previstos no caput deste artigo, serão consideradas: (...)*

**IV** - *a proteção e o controle das áreas de recarga, descarga e captação dos recursos hídricos subterrâneos.*

O Decreto de 2001 estabeleceu em seu artigo 38, parágrafo único que:

*A outorga de extração de águas subterrâneas, em local onde as disponibilidades hidrogeológicas não são conhecidas, será expedida após o encaminhamento, pelo interessado, dos testes de bombeamento que permitam a fixação das vazões a serem exploradas em condições sustentáveis para as reservas de águas subterrâneas e para as vazões de base dos corpos de águas superficiais.*

O referido Decreto também dispõe que o processo de outorga deve visar, especialmente, à redução dos efeitos da sobre-exploração, do rebaixamento de lençol e da contaminação dos aquíferos.

### LEI Nº 13.771 DE 11 DE DEZEMBRO DE 2000

A Lei nº 13.771, específica para as águas subterrâneas de domínio do Estado, e que dispõe sobre a administração, a proteção e a conservação destes recursos hídricos. Além de considerar a interconexão hidráulica existente entre as águas subterrâneas e as superficiais, condicionada à evolução temporal do ciclo hidrológico, esta norma:

- Prevê a instituição de perímetros de proteção sanitária e de alerta contra a poluição, nas áreas de proteção de poços e de outras captações;
- Classifica as áreas de proteção dos aquíferos;
- Estabelece obrigações para o poder executivo estadual e para usuários dos recursos naturais;
- Estabelece infrações, vedações e restrições.

As áreas de proteção dos aquíferos foram classificadas por esta Lei, da seguinte forma:

**Tabela 12:** Classes de áreas de proteção de aquíferos

Área de:	Abrangência - Requisito(s)
<b>Proteção Máxima</b>	Compreende, no todo ou em parte, zonas de recarga, descarga e transporte de aquíferos altamente vulneráveis à poluição e que se constituam em depósitos de águas essenciais para abastecimento público ou para suprir atividades consideradas prioritárias pelos Comitês de Bacia ou, na sua ausência, pelo CERH-MG.
<b>Restrição e Controle</b>	Caracterizada pela necessidade de disciplinamento das extrações, controle máximo das fontes poluidoras já implantadas e restrição a novas atividades potencialmente poluidoras.
<b>Proteção de Poços e Outras Captações</b>	Abrangendo a distância mínima entre poços e outras captações e o respectivo perímetro de proteção.

Esta Lei prevê em casos específicos, restrições a serem imputadas pelo poder executivo, a saber:

Situação:	Restrição (ões):
Caso se faça necessário restringir a captação e o uso das águas subterrâneas por motivo de interesse da conservação, proteção ou manutenção do equilíbrio natural dessas águas; ou no interesse dos serviços públicos de abastecimento de água, ou por motivos geológicos, geotécnicos ou ecológicos	O órgão outorgante do direito de uso poderá, com base em estudos hidrogeológicos ambientais, instituir áreas de proteção e controle, restringir as vazões captadas por poços, estabelecer as distâncias mínimas entre poços e tomar outras medidas que o caso requeira.
No caso de escassez de água subterrânea ou de prejuízo sensível aos aproveitamentos existentes nas Áreas de Proteção Máxima	O CERH-MG poderá: (1) proibir novas captações até que o aquífero se recupere ou seja superado o fato que determinou a carência de água; (2) restringir e regular a captação de água subterrânea, estabelecendo volume máximo a ser extraído em cada captação e o seu regime de operação; (3) controlar as fontes de poluição existentes, mediante programa específico de monitoramento; (4) restringir novas atividades potencialmente poluidoras.
Quando houver restrição à extração de águas subterrâneas	Serão atendidas prioritariamente as captações destinadas ao abastecimento público de água, cabendo ao CERH-MG estabelecer a escala de prioridades, segundo as condições locais.

A referida Lei atribui ao IGAM a obrigação pelo gerenciamento eficaz das águas subterrâneas, mediante:

- Instituição e manutenção de cadastro de poços e outras captações;
- Proposição e implantação de programas permanentes de conservação e proteção dos aquíferos, visando ao seu uso sustentado;

- Implantação de sistemas de outorga e de consulta permanente, de forma a otimizar o atendimento aos usuários de produtos e serviços.

Ficou como atribuição do Poder Executivo do Estado, o gerenciamento das águas subterrâneas por meio de:

- Avaliação quantitativa e qualitativa e planejamento de seu aproveitamento racional;
- Outorga e fiscalização dos direitos de uso dessas águas;
- Adoção de medidas relativas à sua conservação, preservação e recuperação.

Além disso, ela, em conjunto com a de nº 15.056/2004 (que trata da verificação da segurança de barragem e de depósito de resíduos tóxicos industriais), estabeleceu as obrigações destacadas e resumidas na tabela a seguir:

**Tabela 13:** Obrigações estabelecidas para usuários de águas subterrâneas e poluidores, segundo as Leis Federais nº 13.771/2000 e nº 15.056/2004.

Responsável	Obrigações
Empreendimentos consumidores de elevados volumes de águas subterrâneas, classificados ambientalmente como empreendimentos de grande porte e de potencial poluidor	A implantação ou ampliação será precedida de estudo hidrogeológico para avaliação das disponibilidades hídricas e do não comprometimento do aquífero a ser explorado, sem prejuízo da apreciação do Conselho Estadual de Política Ambiental - COPAM-MG.
Empreendimentos de alto risco ambiental, tais como pólos petroquímicos, carboquímicos, cloroquímicos e radiológicos, ou qualquer outra fonte potencial de contaminação das águas subterrâneas que tragam periculosidade e risco para a saúde do público em geral	Os projetos de implantação ou ampliação conterão caracterização detalhada da hidrogeologia local, incluindo avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos potencialmente afetados, assim como proposta para as medidas de proteção e controle a serem adotadas.
Responsável por empreendimento que tenha áreas com depósitos de resíduos construídos no solo e com efluentes perigosos	Implantar sistema de monitoramento das águas subterrâneas, executado conforme plano aprovado pelo COPAM-MG, que conterá: (1) a localização e os detalhes construtivos do poço de monitoramento; (2) a forma de amostragem de amostras, a frequência de amostragem, os parâmetros a serem analisados e os métodos analíticos adotados; (3) a espessura da zona saturada e a direção de escoamento do aquífero freático, assim como a identificação das eventuais interconexões com outras unidades aquíferas. No caso de comprovada alteração dos parâmetros naturais da qualidade da água subterrânea, executar os trabalhos necessários para sua recuperação.

(continua)

**Tabela 13** (continuação)

Responsável	Obrigações
Proprietário ou responsável legal por depósito de resíduos tóxicos industriais	Manter disponíveis para a fiscalização dos órgãos gestores de recursos hídricos e de meio ambiente: (1) registro diário dos níveis de águas subterrâneas localizadas sob o aterro; (2) registro mensal dos parâmetros de qualidade das águas subterrâneas localizadas sob o aterro; (3) registro mensal do volume e das características químicas e físicas dos rejeitos acumulados; (4) registro mensal que demonstre a ausência de contaminação do solo e do lençol de água no entorno e sob a área ocupada pelos rejeitos; (5) relatório técnico anual que ateste a segurança do depósito de resíduos tóxicos industriais, firmado por profissional legalmente habilitado, registrado e sem débito no CREA-MG.
Engarrafadores de água mineral	Quando as águas subterrâneas, por razões de suas qualidades físico-químicas e propriedades oligominerais, prestarem-se à exploração para fins comerciais ou terapêuticos e puderem ser classificadas como águas minerais, a sua utilização será regida tanto pela legislação federal quanto pela legislação estadual relativa à saúde pública, assim como pelas disposições específicas desta lei.
Usuários de recurso hídricos em geral	Quando as águas subterrâneas, por razões de suas qualidades físico-químicas e propriedades oligominerais, prestarem-se à exploração para fins comerciais ou terapêuticos e puderem ser classificadas como águas minerais, a sua utilização será regida tanto pela legislação federal quanto pela legislação estadual relativa à saúde pública, assim como pelas disposições específicas desta lei.

A Legislação Estadual estabeleceu vedações e infrações resumidas, como segue:

**Tabela 14:** Vedações e infrações relacionadas às águas subterrâneas, segundo a Lei nº 13.771/2000.

VEDAÇÕES	
É vedada qualquer ação, omissão ou atividade que cause ou possa causar poluição das águas subterrâneas (qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas que possa ocasionar prejuízo à saúde, à segurança e ao bem-estar da população e comprometer o uso para fins de abastecimento humano e outros).	
Nas Áreas de Proteção Máxima, não são permitidas as atividades:	(1) implantação de indústrias de alto risco ambiental, de pólos petroquímicos, carboquímicos, cloroquímicos e radiológicos ou de quaisquer outras fontes potenciais de grande impacto ambiental; (2) atividades agrícolas que utilizem produtos tóxicos de grande mobilidade no solo e que possam colocar em risco as águas subterrâneas, conforme relação divulgada pelo COPAM-MG; (3) parcelamento do solo em unidades inferiores a 2.500m <sup>2</sup> ; (4) parcelamento do solo em unidades superiores a 2.500m <sup>2</sup> não destinadas a residências unifamiliares horizontais e que não sejam dotadas de sistema adequado de tratamento de efluentes e de disposição de resíduos sólidos.

(continua)

**Tabela 14** (continuação)

<b>INFRAÇÕES (LEIS 13.199/99 e 13.771/2000)</b>
Derivar ou utilizar recursos hídricos sem a respectiva outorga de direito de uso.
Ampliar e alterar empreendimento relacionado com a derivação ou a utilização de recursos hídricos que importe alterações no seu regime, quantidade e qualidade, ou iniciar a sua implantação, sem autorização do órgão ou da entidade da administração pública estadual integrante do SEGRH-MG.
Utilizar recursos hídricos ou executar obra ou serviço relacionado com eles, em desacordo com as condições estabelecidas na outorga.
Perfurar poços para a extração de águas subterrâneas ou operá-los sem a devida autorização, ressalvados os casos de vazão insignificante, assim definidos em regulamento.
Fraudar as medidas dos volumes de água captados e a declaração dos valores utilizados.
Infringir instruções e procedimentos estabelecidos pelos órgãos e pelas entidades competentes da administração pública estadual que integram o SEGRH-MG.
Obstar ou dificultar a ação fiscalizadora das autoridades competentes, como referido no inciso anterior, no exercício de suas funções.
Deixar de cadastrar obra de captação conforme exigido por lei ou regulamento.
Provocar a salinização ou poluição de aquíferos subterrâneos.
Deixar de vedar poço ou outra obra de captação, abandonados ou inutilizados.
Deixar de colocar dispositivo de controle em poços jorrantes.
Remover cobertura vegetal em área de recarga de aquífero subterrâneo instituída pelo Poder Público.
Realizar a obra em local diferente daquele para o qual foi licenciada.
Descumprir medida preconizada para Área de Proteção ou de Restrição e Controle

Dentre as Deliberações Normativas, cabe destacar as seguintes:

- Deliberação Normativa CERH nº 07/2002 – que, dentre outros, estabeleceu a classificação dos empreendimentos quanto ao porte e potencial poluidor, tendo em vista a legislação de recursos hídricos de Minas Gerais;
- Deliberação Normativa CERH nº 16/2005 – que estabeleceu medidas emergenciais de recuperação e uso sustentável da bacia do rio Riachão;
- Deliberação Normativa CERH nº 33/2009 – que definiu o uso insignificante de poço tubulares situados nos municípios da região semiárida;
- Deliberação Normativa Conjunta COPAM – CERH nº 02/2010 – que instituiu o Programa Estadual de Gestão de Áreas Contaminadas, que estabelece as diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por substâncias químicas. Esta DN também estabeleceu a lista de valores orientadores para solos e água subterrânea no âmbito estadual.

Na Tabela 15, são citadas as principais questões relacionadas ao monitoramento qualitativo e quantitativo das águas subterrâneas e que foram tratadas nas Resoluções do CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos.

**Tabela 15:** Principais aspectos das Resoluções CNRH acerca do monitoramento das águas subterrâneas.

<b>Resoluções CNRH</b>		
Nº da norma	Trata ou estabelece	O que dispõe
<b>2001</b>		
<b>15</b>	Diretrizes gerais para a gestão das águas subterrâneas	<p>Prever a interdependência das águas subterrâneas, superficiais e meteóricas nas políticas nacionais de recursos hídricos e nas outorgas.</p> <p>As interferências nas águas subterrâneas identificadas na implementação de projetos ou atividades deverão estar embasadas em estudos hidrogeológicos necessários para a avaliação de possíveis impactos ambientais.</p> <p>Sistemas de Informações de Recursos Hídricos no âmbito federal, estadual e do Distrito Federal deverão conter, organizar e disponibilizar os dados e informações necessários ao gerenciamento integrado das águas.</p> <p>Para aquíferos subjacentes a bacias hidrográficas, o SINGREH e os Sistemas de Gerenciamento de Recursos Hídricos dos Estados ou do Distrito Federal deverão promover a uniformização de diretrizes e critérios para amostragem dos dados e elaboração dos estudos hidrogeológicos necessários à identificação e caracterização da bacia hidrogeológica.</p> <p>Para aquíferos transfronteiriços ou subjacentes a Unidades da Federação, o SINGREH promoverá a integração dos diversos órgãos dos governos federal, estaduais e do Distrito Federal, que têm competências no gerenciamento de águas subterrâneas.</p> <p>Toda empresa que execute perfuração de poço tubular profundo deverá ser cadastrada junto aos Conselhos Regionais de Engenharia, Arquitetura e Agronomia e órgãos estaduais de gestão de recursos hídricos e apresentar as informações técnicas necessárias e deverá apresentar as informações técnicas necessárias, semestralmente e sempre que solicitado.</p> <p>Os poços jorrantes deverão ser dotados de dispositivos adequados para evitar desperdício, ficando passíveis de sanção os responsáveis que não adotarem providências devidas.</p>
<b>16</b>	Critérios gerais para a outorga de direito de uso de recursos hídricos	<p>Em caso de conflito no uso das águas subterrâneas de aquíferos que se estendam a mais de uma Unidade da Federação, caberá ao Conselho Nacional de Recursos Hídricos arbitrá-lo.</p> <p>A análise dos pleitos de outorga deverá considerar a interdependência das águas superficiais e subterrâneas e as interações observadas no ciclo hidrológico visando à gestão integrada dos recursos hídricos.</p>
<b>2002</b>		
<b>22</b>	Diretrizes para a inserção das águas subterrâneas no instrumento plano de recursos hídricos	<p>Os Planos de Recursos Hídricos devem considerar os usos múltiplos das águas subterrâneas, as peculiaridades de função do aquífero e os aspectos de qualidade e quantidade para a promoção do desenvolvimento social e ambientalmente sustentável.</p> <p>Os Planos de Recursos Hídricos devem promover a caracterização dos aquíferos e definir as inter-relações de cada aquífero com os demais corpos hídricos superficiais e subterrâneos e com o meio ambiente, visando à gestão sistêmica, integrada e participativa das águas.</p> <p>Planos de Recursos Hídricos devem incluir, no mínimo, por aquífero: (1) a caracterização espacial; (2) o cômputo das águas subterrâneas no balanço hídrico; (3) a estimativa das recargas e descargas, tanto naturais quanto artificiais; (4) a estimativa das reservas permanentes explotáveis dos aquíferos; (5) caracterização físico, química e biológica das águas dos aquíferos; (6) as devidas medidas de uso e proteção dos aquíferos.</p> <p>Os Planos de Recursos Hídricos devem incluir, no mínimo, por bacia: (1) monitoramento da quantidade e qualidade dos recursos dos aquíferos, com os resultados devidamente apresentados em mapa; (2) rede de monitoramento dos níveis d'água dos aquíferos e sua qualidade; (3) densidade dos pontos de monitoramento; (4) frequência de monitoramento dos parâmetros.</p>

(continua)

**Tabela 15** (continuação)

## Resoluções CNRH

Nº da norma	Trata ou estabelece	O que dispõe
<b>2002</b>		
<b>22</b>	Diretrizes para a inserção das águas subterrâneas no instrumento plano de recursos hídricos	O Plano de Recursos Hídricos subsequente deve conter: (1) resumo das medidas tomadas; (2) resultados alcançados; e (3) avaliação das medidas que não tenham atingido os objetivos propostos.
<b>29</b>	Diretrizes para a outorga de uso dos recursos hídricos para o aproveitamento dos recursos minerais	Define como <i>uso de recursos hídricos</i> : toda e qualquer atividade que altere as condições qualitativas ou quantitativas, bem como o regime das águas superficiais ou subterrâneas.  Estabelece critérios de outorga para usos de recursos hídricos relacionados à atividade minerária.
<b>2005</b>		
<b>48</b>	Critérios gerais para a cobrança pelo uso dos recursos hídricos	Estabelece que a cobrança pelo uso de recursos hídricos tem por um de seus objetivos induzir e estimular a conservação, o manejo integrado, a proteção e a recuperação dos recursos hídricos, com ênfase para as áreas de recarga dos aquíferos, dentre outros, por meio de compensações e incentivos aos usuários.  Para a fixação dos valores a serem cobrados pelo uso de recursos hídricos deverão ser observados, dentre outros, os aspectos relativos às características e a vulnerabilidade dos aquíferos.
<b>55</b>	Diretrizes para elaboração do Plano de Utilização da Água na Mineração - PUA	Define o conteúdo mínimo do PUA para a derivação ou captação de águas superficiais ou extração de águas subterrâneas para consumo final ou insumo do processo produtivo e para captações de águas subterrâneas com a finalidade de rebaixamento de nível de água.
<b>2007</b>		
<b>76</b>	Diretrizes gerais para a integração entre a gestão de recursos hídricos e a gestão de águas minerais, termais, gasosas, potáveis de mesa ou destinadas a fins balneários	O órgão gestor de recurso hídrico competente e o órgão gestor de recursos minerais, com vistas a facilitar o processo de integração, devem buscar o compartilhamento de informações e compatibilização de procedimentos, definindo de forma conjunta o conteúdo e os estudos técnicos necessários, incluindo, dentre outras informações: área ou perímetro de proteção de fonte instituído pelo órgão gestor de recursos minerais e às áreas de restrição e controle estabelecidas pelo órgão gestor de recurso hídrico competente ou previstas nos planos de recursos hídricos.

(continua)

Tabela 15 (continuação)

## Resoluções CNRH

Nº da norma	Trata ou estabelece	O que dispõe
<b>2008</b>		
<b>91</b>	Procedimentos gerais para o enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneos	<p>Para as águas subterrâneas de classe 4 é adotado o critério do uso menos restritivo</p> <p>A proposta de enquadramento deverá ser desenvolvida em conformidade com o Plano de Recursos Hídricos da bacia hidrográfica, preferencialmente durante a sua elaboração, devendo conter o seguinte: (1) diagnóstico; (2) prognóstico; (3) propostas de metas relativas às alternativas de enquadramento; e (4) programa para efetivação.</p> <p>O diagnóstico deverá abordar: (1) caracterização geral da bacia hidrográfica e do uso e ocupação do solo incluindo a identificação dos corpos de água superficiais e subterrâneos e suas interconexões hidráulicas, em escala compatível; (2) identificação e localização dos usos e interferências que alterem o regime, a quantidade ou a qualidade da água existente em um corpo de água, destacando os usos preponderantes; (3) identificação, localização e quantificação das cargas das fontes de poluição pontuais e difusas atuais, oriundas de efluentes domiciliares, industriais, de atividades agropecuárias e de outras fontes causadoras de degradação dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos; (4) disponibilidade, demanda e condições de qualidade das águas superficiais e subterrâneas; (5) potencialidade e qualidade natural das águas subterrâneas; (6) mapeamento das áreas vulneráveis e suscetíveis a riscos e efeitos de poluição, contaminação, superexploração, escassez de água, conflitos de uso, cheias, erosão e subsidência, entre outros; (7) identificação das áreas reguladas por legislação específica; (8) arcabouço legal e institucional pertinente; (9) políticas, planos e programas locais e regionais existentes, especialmente os planos setoriais, de desenvolvimento sócio-econômico, plurianuais governamentais, diretores dos municípios e ambientais e os zoneamentos ecológico-econômico, industrial e agrícola; (10) caracterização socioeconômica da bacia hidrográfica; e (11) capacidade de investimento em ações de gestão de recursos hídricos.</p> <p>No prognóstico deverão ser avaliados os impactos sobre os recursos hídricos superficiais e subterrâneos advindos da implementação dos planos e programas de desenvolvimento previstos, considerando a realidade regional com horizontes de curto, médio e longo prazos, e formuladas projeções consubstanciadas em estudos de simulação dos seguintes itens: (1) potencialidade, disponibilidade e demanda de água; (2) cargas poluidoras de origem urbana, industrial, agropecuária e de outras fontes causadoras de alteração, degradação ou contaminação dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos; (3) condições de quantidade e qualidade dos corpos hídricos; e (4) usos pretensos de recursos hídricos superficiais e subterrâneos, considerando as características específicas de cada bacia.</p>
<b>92</b>	Critérios e procedimentos gerais para proteção e conservação das águas subterrâneas no território brasileiro	<p>Os órgãos gestores deverão promover estudos hidrogeológicos para: delimitar as áreas de recarga dos aquíferos; definir suas zonas de proteção; identificar as potencialidades, disponibilidades e vulnerabilidades dos aquíferos para utilização das águas subterrâneas, em especial nas áreas com indícios de superexploração, poluição ou contaminação; e delimitar de perímetros de proteção de fontes de abastecimento.</p> <p>O órgão gestor de recursos hídricos competente, em articulação com os órgãos de meio ambiente, poderá instituir com aprovação dos Comitês de Bacias, onde houver, e do Conselho Estadual de Recursos Hídricos, áreas de restrição e controle de uso de águas subterrâneas</p> <p>No processo de análise e deferimento de outorga de direitos de uso das águas subterrâneas, devem ser considerados os estudos hidrogeológicos</p>

(continua)

Tabela 15 (continuação)

## Resoluções CNRH

Nº da norma	Trata ou estabelece	O que dispõe
<b>2008</b>		
<b>92</b>	Critérios e procedimentos gerais para proteção e conservação das águas subterrâneas no território brasileiro	<p>As captações de águas subterrâneas deverão ser dotadas de dispositivos que permitam a amostragem de água, medições de nível, vazão e volume captado visando o monitoramento quantitativo e qualitativo.</p> <p>As captações de água que apresentem indícios de superexploração, poluição ou contaminação das águas subterrâneas deverão ser monitoradas com vistas a detectar alterações de quantidade e qualidade da água. O monitoramento deverá obedecer a critérios técnicos e metodologias aceitas pelo órgão gestor de recursos hídricos competente e, caso sejam constatadas alterações de qualidade da água que prejudique seus múltiplos usos, o usuário deverá adotar medidas mitigadoras indicadas pelo órgão gestor de recursos hídricos competente.</p> <p>Programas de monitoramento qualitativo e quantitativo das águas subterrâneas devem ser implementados com ênfase nas áreas de: proteção; restrição e controle; influência de empreendimentos que apresentem potencial de poluição e risco de contaminação; risco geotécnico; superexploração; recarga e descarga; e recarga artificial.</p>
<b>2010</b>		
<b>107</b>	Diretrizes e critérios a serem adotados para o planejamento, a implantação e a operação de Rede Nacional de Monitoramento Integrado Qualitativo e Quantitativo de Águas Subterrâneas	<p>Programas de monitoramento qualitativo e quantitativo das águas subterrâneas devem ser implementados com ênfase nas áreas de: proteção; restrição e controle; influência de empreendimentos que apresentem potencial de poluição e risco de contaminação; risco geotécnico; superexploração; recarga e descarga; e recarga artificial.</p> <p>Estabelece critérios para: a escolha dos pontos de monitoramento; frequência e parâmetros de monitoramento e obriga especificações por aquífero e por poço de monitoramento.</p>
<b>2011</b>		
<b>126</b>	Diretrizes para o cadastro de usuários de recursos hídricos e para a integração das bases de dados referentes aos usos de recursos hídricos superficiais e subterrâneos	<p>O órgão gestor ou a autoridade outorgante de cada Unidade da Federação deverá aderir ao CNARH ou instituir seu sistema para armazenamento e integração dos dados de usuários de recursos hídricos.</p> <p>O órgão gestor ou autoridade outorgante deverá priorizar e fomentar o cadastro dos usuários de recursos hídricos, passíveis ou não de outorga, em bacias hidrográficas consideradas críticas em termos de disponibilidade quali-quantitativa de recursos hídricos superficiais e subterrâneos.</p>

## **APÊNDICE II - ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: ASPECTOS TEÓRICOS**

## ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: ASPECTOS TEÓRICOS

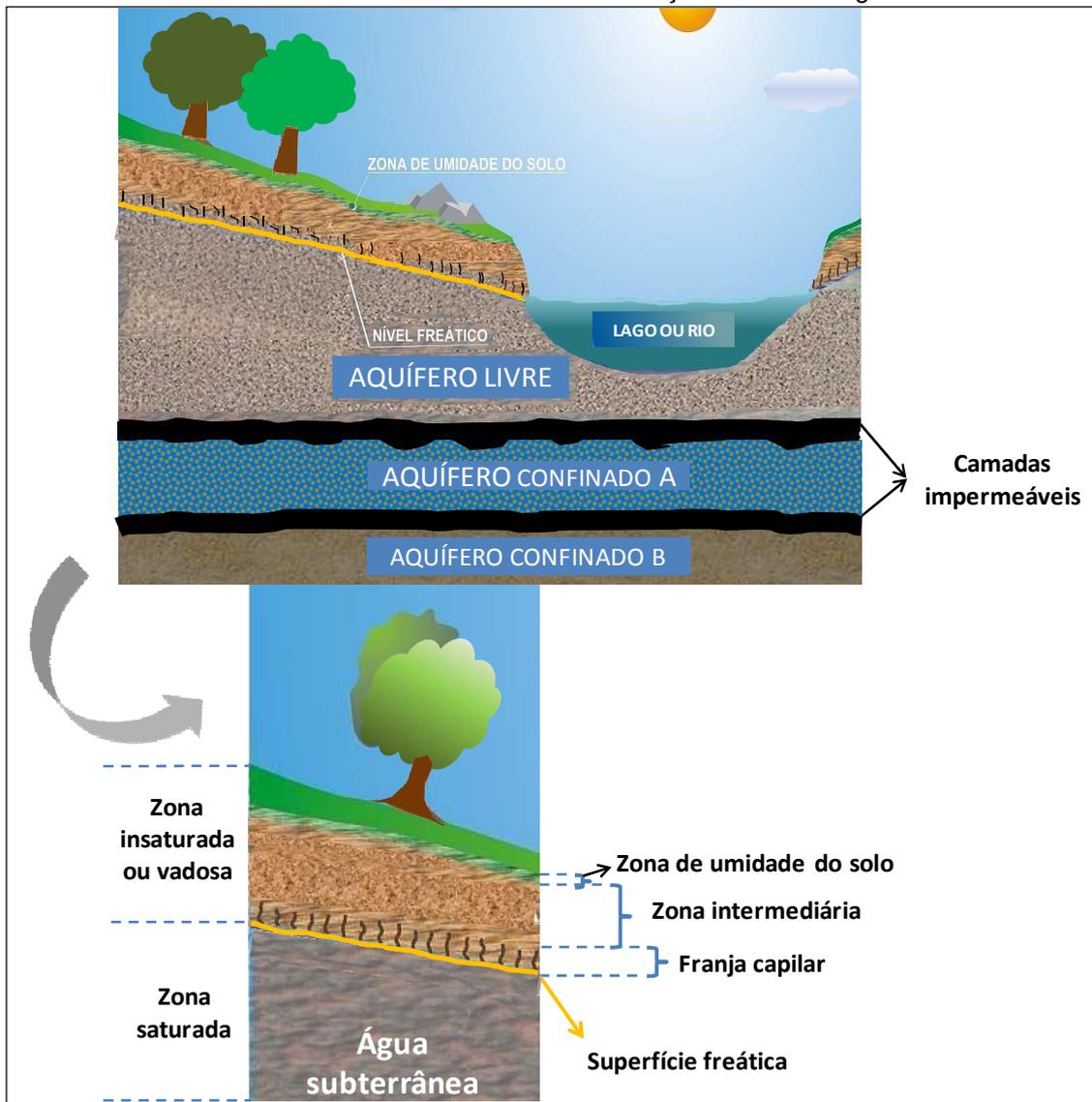
As águas subterrâneas são aquelas que ocorrem natural ou artificialmente no subsolo, armazenada nas rochas e sedimentos. Elas se acumulam ao longo de milhares de anos e se encontram em condições naturais, numa situação de quase equilíbrio, governado por mecanismo de recarga e descarga.

Já os aquíferos, podem ser definidos como corpos hidrogeológicos com capacidade de acumular e transmitir água através dos seus poros, fissuras ou espaços resultantes da dissolução e carreamento de materiais rochosos. Os aquíferos podem ser de vários tamanhos: com extensão de poucos km<sup>2</sup> a milhares de km<sup>2</sup>, ou, também, podem apresentar espessuras de poucos metros a centenas de metros. É bastante comum a sobreposição de diferentes aquíferos, havendo os aquíferos livres (lençol freático) e os aquíferos confinados, conforme esquematizado na Figura 50.

As águas subterrâneas estão em constante movimento, embora as velocidades do fluxo sejam muito menores que das águas superficiais em função das dificuldades impostas pelos interstícios – intrincada rede de passagens ou espaços livres na rocha. As águas subterrâneas ao infiltrarem se movem predominantemente para baixo, devido à força da gravidade – fluxo vertical na zona insaturada ou vadosa. Depois, se movimentam horizontalmente na zona saturada por diferença de potencial ou carga hidráulica, desde a região de recarga, até a região de descarga. O fluxo de água subterrânea é controlado pelas propriedades da rocha: porosidade e permeabilidade e, em geral, sua velocidade varia de cm a m/ano. A porosidade é a percentagem de volume de vazios (espaço dos poros) e que determina a quantidade de água que pode conter a rocha. Em sedimentos ou rochas sedimentares a porosidade depende do tamanho do grão, das formas dos grãos, do grau de separação e do grau de *cimentação*. A permeabilidade é uma medida do grau em que os poros estão interligados e da extensão das interligações. Baixa porosidade geralmente resulta em baixa permeabilidade, mas alta porosidade não implica necessariamente em alta permeabilidade. É possível ter uma rocha altamente porosa com pouca ou nenhuma interligação entre poros, o que é comum quando há fissuras não interligadas.

Além do abastecimento de água potável, a água subterrânea deve ser preservada pelo seu valor ambiental, uma vez que desempenha um papel essencial no ciclo hidrológico e é fundamental para a manutenção de zonas úmidas e caudais (fluxo de base) dos rios, funcionando como reguladora durante os períodos secos. Portanto, parcela importante da água que alimenta os sistemas de águas superficiais durante todo o ano, incluindo aquelas usadas para abastecimento e como zonas de lazer, provém dos aquíferos.

**Figura 50:** Corte mostrando três aquíferos sobrepostos – livre e confinados e detalhe mostrando zonas insaturada e saturada e a distribuição vertical da água.



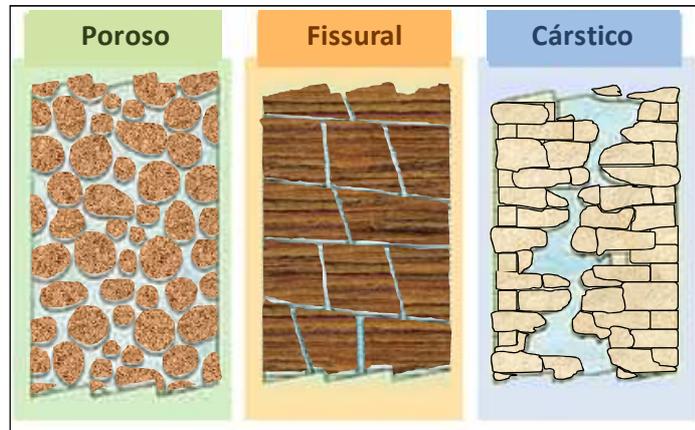
A proteção da camada de solo, as baixas velocidades de escoamento da água e a considerável capacidade de diluição e de depuração dos aquíferos, em relação a muitos contaminantes, fazem com que as contaminações mais extensas se manifestem muito lentamente e as localizadas normalmente sejam percebidas quando há exploração. Todavia, a recuperação dos aquíferos, dependendo do tipo de contaminante, pode levar anos e até mesmo tornar-se economicamente inviável. Por isso, a importância de se conhecer as quantidades disponíveis e da qualidade dessas águas e de tomar medidas preventivas em relação à poluição.

A composição dos aquíferos pode ser bastante variada, mas, de forma geral, podemos subdividi-lo em três grupos principais, cuja configuração pode ser aproximada pela representação da Figura 51:

- Aquíferos sedimentares ou porosos: formados por sedimentos de granulação variada, a água circula através dos poros formados entre os grãos de areia, silte e argila;
- Aquíferos cristalinos ou fissurais: formados por rochas duras e maciças, onde a circulação da água se faz nas fissuras e fraturas abertas devido ao movimento tectônico;
- Aquíferos cársticos: formados em rochas calcáreas ou carbonáticas, onde a circulação da água se faz nas fraturas e outras descontinuidades (diáclases) que resultaram da dissolução do carbonato pela água. Tais aberturas podem atingir grandes dimensões, criando, nesse

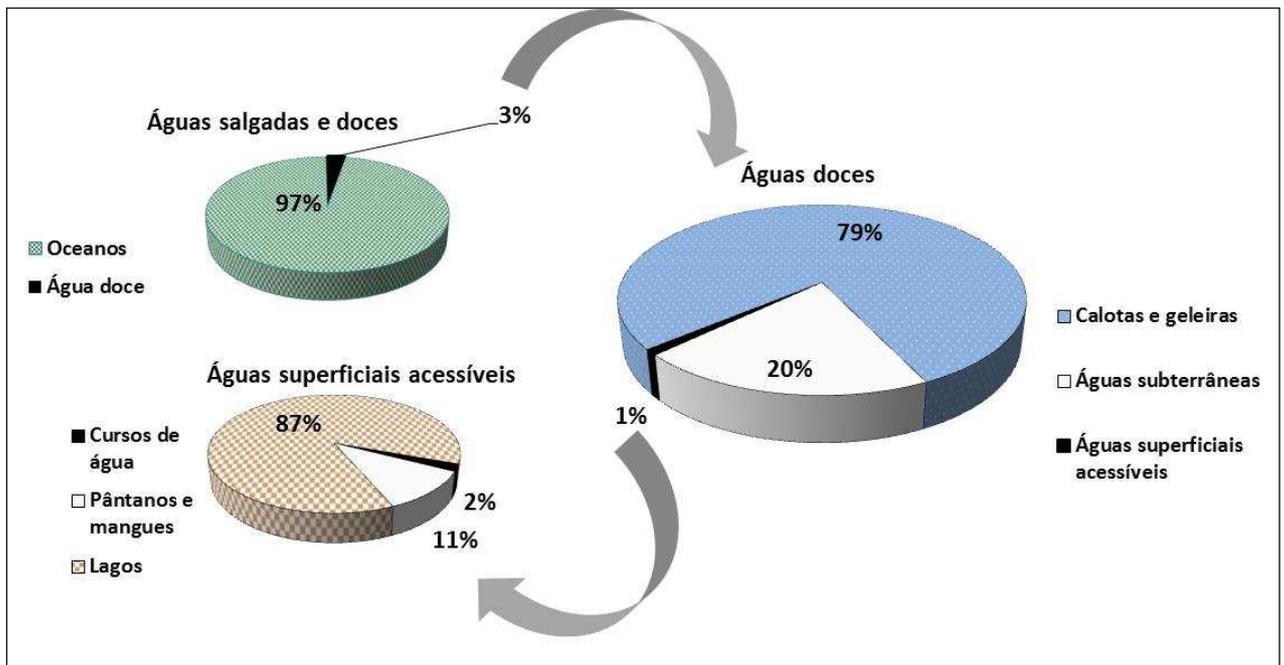
caso, verdadeiros rios subterrâneos. São aquíferos heterogêneos, descontínuos, com águas duras, e fluxo em canais. As rochas são os calcários, dolomitos e mármore.

**Figura 51:** Representação das configurações predominantes rochas-grãos e os interstícios ocupados pelas águas subterrâneas para os diferentes tipos de aquíferos.



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 estes recursos podem representar cerca de 20% da água doce (LIMA, 2001; Von SPERLING, 2006).

**Figura 52:** Distribuição percentual da água doce, bem como das águas subterrâneas e superficiais, mundialmente. Não estão incluídos: umidade e vapor d água, nem a água retida pelos organismos vivos.

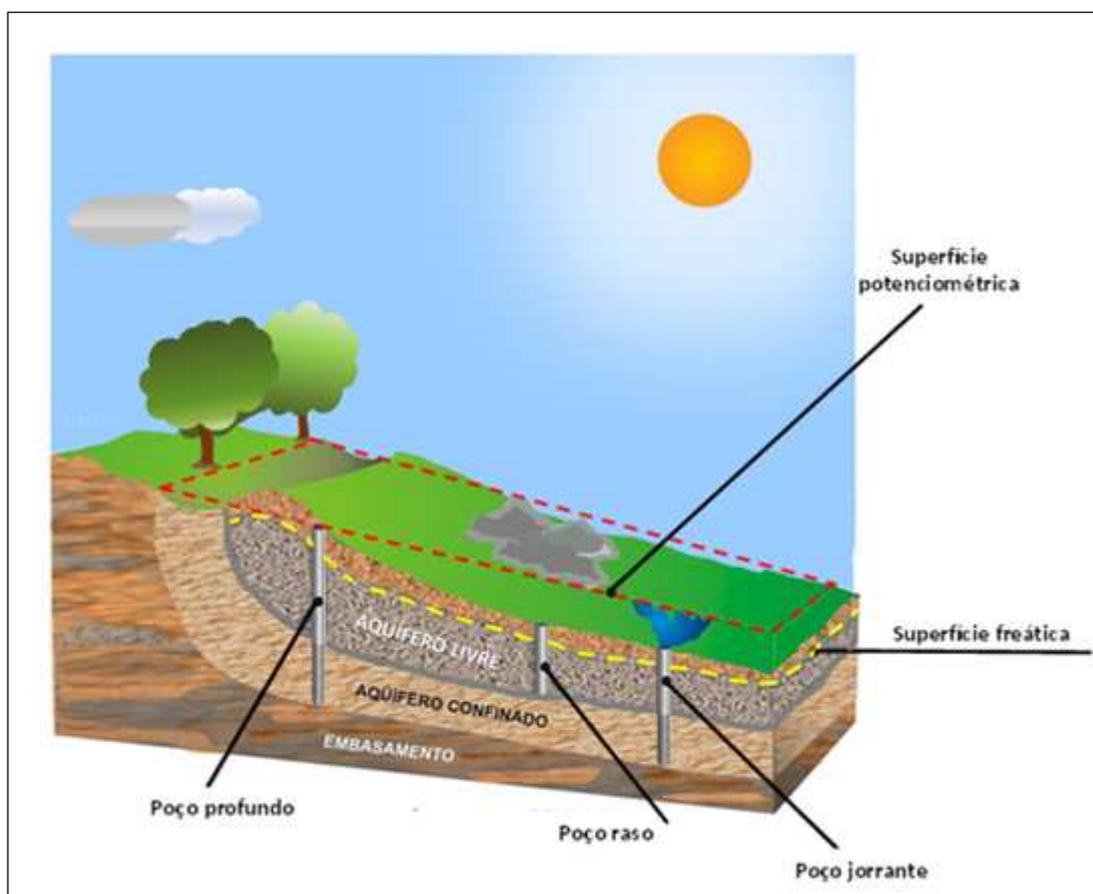


Os reservatórios subterrâneos têm potencial de destaque no equacionamento do problema de água e quase todos os países do mundo utilizam água subterrânea para suprir suas necessidades. Afinal, dentre as águas doces e em estado líquido, essas águas estão presentes na Terra em quantidade significativa quando comparada às águas superficiais acessíveis, embora com distribuição espacial bastante variável.

Embora o Brasil possua, em seu território, 8% de toda a reserva de água doce do mundo, aproximadamente 80% dessa água encontra-se na região Amazônica, ficando os restantes 20% circunscritos em áreas do território onde se concentram 95% da população (Zoby, 2008). Além disso, em diversas regiões há escassez ou seca, onde ocorre déficit hídrico médio anual de longo período - precipitação menos evapotranspiração tem resultado negativo. A escassez de água constitui entrave ao desenvolvimento socioeconômico e, até mesmo, à subsistência da população. Por isso, mesmo com grande potencial hídrico, a água é objeto de conflito em várias regiões do país. Exemplo dessas regiões é o Polígono das Secas, que inclui a região norte de Minas Gerais, com regime pluviométrico marcado por extrema irregularidade de chuvas, no tempo e no espaço. Cenários de escassez poderiam ser reduzidos em determinadas regiões, pela gestão integrada dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos. Para tanto, são fundamentais estudos de abrangência regional para a avaliação da ocorrência e da potencialidade desses recursos: localização de aquíferos, demandas (número e vazão de captações) e disponibilidades hídricas, vulnerabilidade, qualidade das águas para os diversos usos, dentre outros aspectos.

Na Figura 53, é ilustrado um exemplo teórico de aquíferos com diferentes tipos de poços de extração de águas subterrâneas e com indicação das superfícies freática e piezométrica ou potenciométrica. Esta última é a superfície delimitada pela altura dos níveis estáticos de um aquífero e é construída através de medidas obtidas no próprio aquífero através de poços existentes. Com uma malha destes pontos, constroem-se as curvas potencimétricas ou piezométricas, da mesma forma que se constroem curvas de nível em mapas topográficos. No caso de aquífero confinado, esta superfície é imaginária podendo estar situada em diferentes alturas, inclusive no espaço, sendo a soma de todos os pontos de igual valor do nível estático ou da pressão piezométrica. No caso de um aquífero freático a superfície freática se confunde com o lençol freático.

**Figura 53:** Corte mostrando: dois aquíferos sobrepostos – livre e sua superfície freática e confinado e sua superfície potenciométrica; além de exemplos de poços raso, profundo e jorrante (este último, cuja característica é apresentar o topo em nível inferior à superfície potenciométrica).



## QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

A qualidade da água subterrânea varia com as condições naturais ao longo do tempo e também com interferências antrópicas, ou seja, as características naturais das águas podem ser alteradas em função do uso e ocupação do meio físico. Além da contaminação, a dissolução de minerais, que ocorre naturalmente, também pode ser intensificada ou acelerada pela poluição ocasionada pela atividade humana ou por extração excessiva.

A composição natural e os indícios de poluição ou contaminação das águas podem ser avaliados por meio de parâmetros físicos, químicos e microbiológicos. Esta avaliação é fundamental para verificar a adequação das águas aos usos requeridos.

A composição natural das águas subterrâneas depende de diversos processos, os quais incluem: geológicos e pedológicos (espécies minerais, tipos de solos); químicos (solubilidade dos minerais, interação entre a água e o meio onde ela se armazena e circula – solo, rocha, gases presentes na zona não saturada.); geomorfológicos (variações de relevo), climáticos (temperatura, precipitação, evaporação) e biológicos (cobertura vegetal, presença de organismos).

Como as rochas apresentam condições de instabilidade na presença de água, o intemperismo químico pode ser interpretado como a tendência do sistema água/rocha de alcançar o equilíbrio físico-químico. Em águas subterrâneas, os solutos e suas concentrações dependem dos litotipos dos aquíferos, do tipo de alteração mineral, do fluxo e taxa de recarga do aquífero. Por sua vez, as reações químicas de alteração mineral dependem do tempo de contato água/rocha, da temperatura, do CO<sub>2</sub> disponível, da presença de ácidos inorgânicos e orgânicos e da mobilidade e solubilidade dos elementos envolvidos no processo de intemperismo. Comparativamente, os cátions Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> são móveis e tendem a ser liberados facilmente por intemperismo; o K<sup>+</sup> apresenta mobilidade intermediária; e o Al<sup>3+</sup> e Fe<sup>3+</sup> apresentam menor mobilidade e tendem a permanecer no solo. Os plagioclásios podem constituir fontes de Na<sup>+</sup> e Ca<sup>2+</sup> para o ambiente aquático, enquanto que biotita e feldspato potássico podem ser fontes de Mg<sup>2+</sup> e K<sup>+</sup>. Os fenômenos ácido-base e de solubilidade controlam o pH e as concentrações de íons inorgânicos dissolvidos na água, como o carbonato e o hidrogenocarbonato, enquanto o teor de matéria orgânica e o estado de oxidação de elementos como nitrogênio, enxofre e ferro, dentre outros, são dependentes da presença de oxigênio e das reações redox.

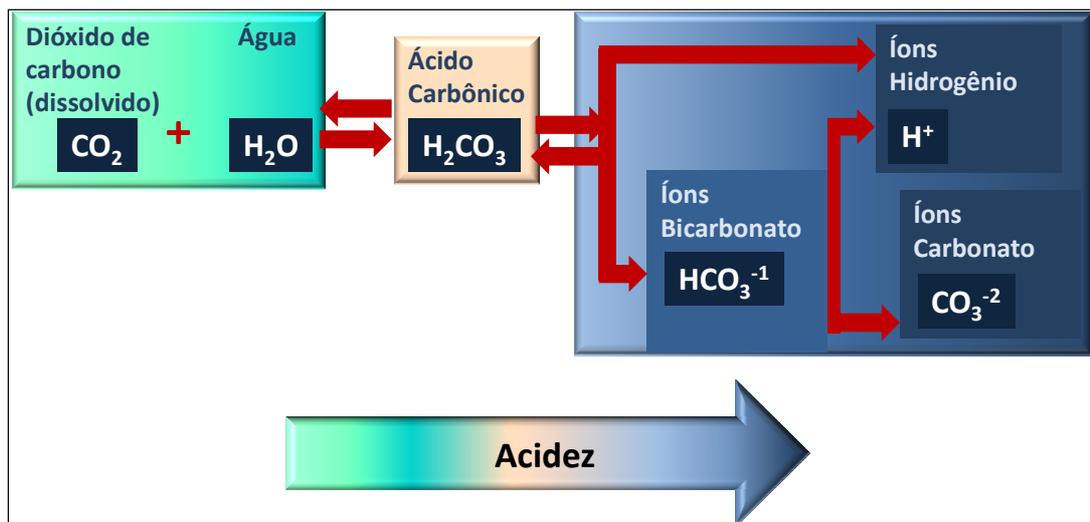
Todos esses fatores condicionam as reações que podem ocorrer e sua extensão, dentre as quais:

**Figura 54:** Principais tipos de reações que ocorrem naturalmente nas águas subterrâneas pela interação com o ar, o solo, e as rochas.

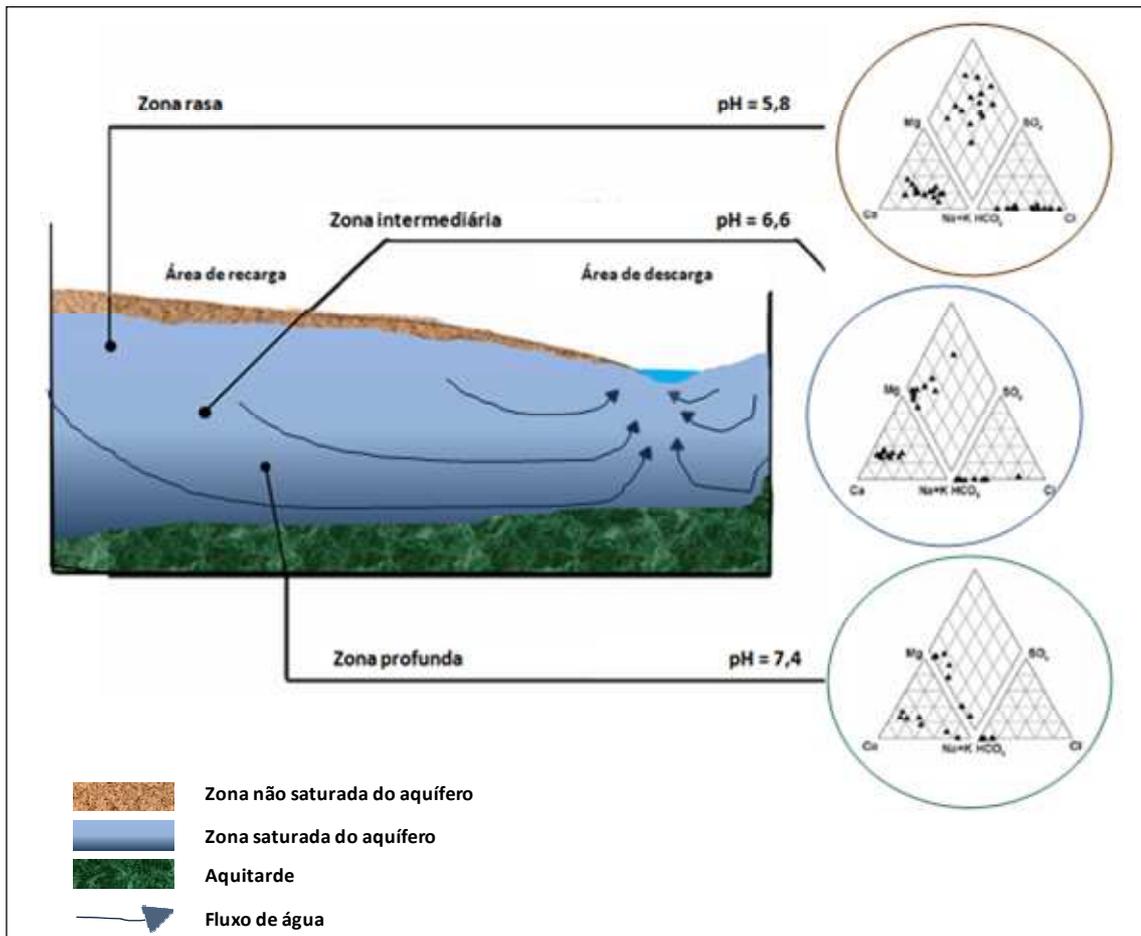


- Dissolução de gases: transferência de gases entre o solo e as águas subterrâneas. Os processos de dissolução de  $\text{CO}_2$  e do  $\text{O}_2$  são de particular importância. A dissolução do  $\text{CO}_2$  promove o aumento da alcalinidade e a da agressividade da água, já o oxigênio, medido pelo OD, tem concentração relativamente baixa, pelo consumo por microrganismos e reações de oxidação de minerais de ferro, enxofre e magnésio. Suas concentrações variam desde a superfície até as zonas mais profundas dos aquíferos. O  $\text{CO}_2$  tem origem na oxidação da matéria orgânica por microrganismos, na dissolução de bicarbonatos e nos fenômenos de origem magmáticos e metamórficos das águas juvenis. Ele predomina em águas mais ácidas, como algumas águas termais, vulcânicas ou contaminadas.
- Reações ácido-base: A decomposição da matéria orgânica dos solos promove a formação de ácidos orgânicos que se dissociam em íons carbonato e  $\text{H}^+$  que contribuem para a redução do pH da água de infiltração. De outro lado, a dissolução dos carbonatos, silicatos e aluminossilicatos proporciona reações ácido-base que promovem o aumento da concentração de cátions, da alcalinidade e do pH das águas subterrâneas (exemplificado na Figura 55). O predomínio de uma ou outra reação é determinante para o valor do pH na água subterrânea, cujo perfil varia com a profundidade, conforme exemplo ilustrado na Figura 56. Quando a água é mais ácida ( $\text{pH} < 5,7$ ) aumenta o ataque químico aos minerais e a mobilidade dos elementos tanto nas zonas não saturada, quanto nas saturadas. Em  $\text{pH} > 7$ , há precipitação de hidróxidos e diminuição da mobilidade dos elementos.

**Figura 55:** Exemplo de reações ácido base: esquema ilustrativo do equilíbrio químico do sistema carbonato.



**Figura 56:** Exemplo de variações hidrogeoquímicas em um aquífero: o pH aumenta com a profundidade e a composição da água varia – *diagramas de Piper*.



Fonte: Adaptado de BOUROTTE *et al.*, 2009 *apud* BERTOLO, *et al.*, 2009.

- Reações de dissolução/precipitação: o grau de solubilidade e a composição do mineral em contato com a água determinam quais são os íons que predominam no aquífero. A capacidade de dissolução da água aumenta com a presença de ácidos orgânicos ou inorgânicos, com a temperatura e com o tempo de residência da água no meio. Em relação à presença de outros íons na água, a solubilidade pode diminuir ou aumentar, dependendo das forças iônicas que se estabelecem. A precipitação ocorre pela saturação da água subterrânea, ainda que localizadamente, pelo soluto, a qual varia com o pH e o Eh do meio. Os íons variam muito em função dos minerais em interação com a água, mas de maneira geral, destacam-se: ferro, flúor, magnésio, sulfatos, arsênio, manganês e selênio.
- Reações de oxiredução: alteração do estado de oxidação de espécies químicas através da transferência de elétrons, com a troca de valência dos elementos químicos envolvidos. A espécie que ganha o elétron é o agente oxidante enquanto, aquela que perde é o agente redutor, sendo que o balanço do número de elétrons transferidos se mantém constante. O potencial de oxiredução (ou redox - Eh) mede a capacidade de oxidação ou de redução de uma amostra. Em geral, diferenças de potencial positivas entre 200 e 600 mV indicam meio fortemente oxidante e diferenças de potencial entre -200 e -100 são características de meios redutores. O potencial redox depende das espécies envolvidas e também do pH, sendo que a oxidação pode favorecer a dissolução de espécies químicas.
- Adsorção e dessorção: é a acumulação de uma substância em determinada interface fluido/sólido. Diversas espécies químicas, especialmente os íons, que se encontram

dissolvidos nas águas intersticiais (nos poros) do aquífero podem ser adsorvidos às superfícies das partículas sólidas (orgânicas e inorgânicas) do aquífero. A adsorção pode ser: (1) de natureza química - moléculas (ou átomos) unem-se à superfície do adsorvente através da formação de ligações covalentes, normalmente irreversíveis; (2) fenômeno de natureza física - moléculas do adsorvente e do adsorvato interagem por forças de van der Waal, normalmente reversível. Uma molécula fisicamente adsorvida retém sua identidade, embora possa ser deformada pela presença dos campos de força da superfície. A adsorção, em geral, condiciona a maior ou menor retenção de compostos ou de substâncias e contribui para a proteção do aquífero, quando ocorre na zona insaturada, ou para reduzir o espalhamento de contaminantes, reduzindo a concentração e a biodisponibilidade destes.

- **Complexação:** um exemplo de reação de complexação é a ligação de moléculas de água a íons de metais representada por  $M(H_2O)_x^{n+}$ . Um íon metálico também pode combinar-se com outro íon ou composto que contribua com pares de elétrons para o íon metálico (doador de elétrons ou base de Lewis), a exemplo do Cádmio e do cianeto que se complexam por coordenação para formar o complexo  $CdCN^+$ . A complexação pode tanto contribuir para a retirada de íons metálicos da água, ao formar complexos insolúveis, quanto alterar o estado de oxidação de um metal insolúvel torná-lo solubilizado a partir de um metal insolúvel.

Há de se considerar também os processos biológicos em que os microorganismos presentes na água promovem modificações nas características da mesma pela retirada de nutrientes dos sólidos dissolvidos ou em suspensão, bem como pela liberação de metabólitos. Os processos biológicos promovem o aumento das concentrações de sais solúveis e de  $CO_2$ .

## PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

### *Temperatura:*

As águas subterrâneas têm, normalmente, uma amplitude térmica menor quando comparadas com as águas superficiais em função de não sofrerem influência sazonal das temperaturas atmosféricas. Algumas exceções podem ocorrer em determinados aquíferos freáticos pouco profundos. Entretanto, embora haja pouca variação térmica motivada pelo clima, há grandes variações geográficas, sendo que a temperatura varia com a localização e também com do aquífero. Em aquíferos profundos, a temperatura da água é influenciada pelo grau geotérmico local (em média  $1^\circ C$  a cada 30 m). No aquífero Guarani, por exemplo, as temperaturas vão de  $22$  a  $59,7^\circ C$ . Além disso, existem as águas aquecidas localizadas em regiões vulcânicas ou de falhas profundas, as quais podem aflorar na superfície dando origem às fontes termais.

### *Cor*

A cor da água depende do conjunto de substâncias dissolvidas, sendo que, para ser potável, em geral, a água não deve apresentar cor maior do que 20 mg Pt/L. Embora tenda a se apresentar azulada em grandes volumes, as águas ricas em determinados minerais e húmus tendem a alterar sua coloração: Ferro, por exemplo, confere tom arroxeadado; Manganês escurece a água e ácidos húmicos dão tons amarelados. A cor tem intensidade aumentada com o pH e a quantidade de sólidos suspensos (turbidez) interfere na sua determinação. Por isso, é necessário padronizar o pH na sua determinação e remover os sólidos suspensos anteriormente. Em geral, as águas subterrâneas apresentam valores de cor inferiores a 5 mg de platina por litro.

### *Turbidez*

A turbidez é causada por matérias sólidas em suspensão – silte, argila, colóides, matéria orgânica, dentre outros. A turbidez é medida através do turbidímetro, comparando-se o espalhamento de um feixe de luz ao passar pela amostra com o espalhamento de um feixe de igual intensidade ao passar por uma suspensão padrão. Quanto maior o espalhamento maior será a turbidez. Os valores são expressos em Unidade Nefelométrica de Turbidez (UNT). A cor da água interfere negativamente na medida da turbidez devido à sua propriedade de absorver luz e necessita ser descontada. Segundo a OMS, o limite máximo de turbidez em água potável deve ser de 5 UNT. Normalmente, as águas subterrâneas não apresentam problemas devido ao excesso de turbidez, com exceção de alguns

aquíferos cársticos. Algumas águas ricas em íons Fe podem apresentar uma elevação de sua turbidez quando entram em contato com o oxigênio do ar.

Este parâmetro está correlacionado aos sólidos em suspensão (que podem ser determinados pela porção do resíduo total retida no filtro de porosidade de 1,2 µm). As águas subterrâneas em geral possuem teores muito baixos de sólidos em suspensão e quando um poço está produzindo água com significativo teor destes é, geralmente, em função do filtro ou do pré-filtro ter sido mal dimensionado ou por completação insuficiente do aquífero ao redor do filtro. Em aquíferos cársticos e fissurais as aberturas das fendas podem permitir a passagem das partículas mais finas (argila, silte) aumentando assim o conteúdo dos sólidos em suspensão.

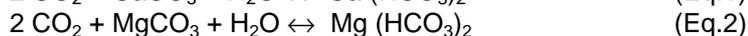
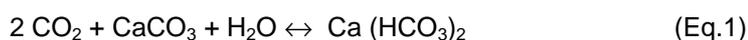
### *Condutividade Elétrica*

Determinada pela presença de substâncias dissolvidas que se separam em ânions e cátions, este parâmetro revela a capacidade da água em transmitir a corrente elétrica. Devido à relação proporcional de sólidos totais dissolvidos e a condutividade elétrica pode-se, através deste parâmetro, estipular o teor de sais da água. A medida é feita através de condutímetro, sendo sua unidade expressa em µS/cm – micro Siemens por centímetro. A condutividade aumenta com a temperatura, sendo necessário fazer sua correção ou ajuste para a temperatura da medição. A condutividade elétrica das águas subterrâneas é relativamente constante, mas varia em diferentes aquíferos em função da variabilidade dos íons dissolvidos. Normalmente, essas águas apresentam valores bem maiores do que aqueles encontrados nas águas superficiais, ainda que na mesma área, em função da interação rocha-água.

### *Dureza*

A dureza de uma água é a medida da sua capacidade de dissolver sabão, isto é, nas águas com elevado teor deste parâmetro, os sabões transformam-se em complexos insolúveis, não formando espuma. É causada, principalmente, pela presença de cálcio e magnésio, além de outros cátions como Ferro, Manganês, Cobre, Bário, etc., associados a ânions Carbonato (mais propriamente Bicarbonato, que é mais solúvel) ou Sulfato. Secundariamente, a dureza também é causada por outros ânions como Nitrato, Silicato e Cloreto. Entretanto, destacam-se quatro principais compostos que conferem dureza às águas: Bicarbonato de cálcio, Bicarbonato de magnésio, Sulfato de cálcio e Sulfato de magnésio.

A principal fonte de dureza nas águas é a sua passagem pelo solo (dissolução da rocha calcárea pelo gás carbônico da água), conforme as reações:



Por isso, é muito mais frequente encontrar-se águas subterrâneas com dureza elevada do que as águas superficiais. A dureza da água varia consideravelmente de local para local, sendo que há muitos aquíferos com características de dureza elevada como no nordeste, centro-oeste e sudeste, mas o problema é muito mais grave em outros países, onde muitas regiões estão sujeitas a graus bastante elevados de dureza nas águas devido à composição do solo.

Para o abastecimento público de água, o problema se refere inicialmente ao consumo excessivo de sabão nas lavagens domésticas. Há também indícios da possibilidade de um aumento na incidência de cálculo renal em cidades abastecidas com águas duras, o que traduz um efetivo problema de saúde pública. A Portaria N° 2914/2011 do Ministério da Saúde, limita a dureza em 500 mg/L CaCO<sub>3</sub> como padrão organoléptico de potabilidade. Este padrão não é muito restritivo, já que leva à classificada da água como “muito dura”, mas, por outro lado, uma restrição mais severa poderia inviabilizar muitos abastecimentos públicos que utilizam água dura, por não disporem dos recursos necessários para a remoção da dureza ou abrandamento da água. Nas águas naturais, a dureza é uma condição importante, por formar complexos com outros compostos, modificando seus efeitos sobre os constituintes daquele ecossistema. Por isso, ela é um parâmetro tradicionalmente utilizado no controle de bioensaios de avaliação de toxicidade de substâncias ou de efluentes.

Quanto ao cátion, a dureza é classificada em dureza de cálcio e dureza de magnésio. A dureza total é a soma de ambas. Não se trata de uma simples soma, pois a dureza é expressa em mg/L CaCO<sub>3</sub>, havendo necessidade de transformação de equivalentes por estequiometria. Logo, uma amostra de água com x mg/L de cálcio e y mg/L de magnésio apresentará dureza de  $x \cdot \frac{5}{2} + y \cdot \frac{25}{6}$  mg/L de CaCO<sub>3</sub>.

Quanto ao ânion associado, a dureza é classificada como dureza temporária e dureza permanente. A dureza temporária é aquela em que o cálcio ou o magnésio encontram-se associados a carbonatos (ou bicarbonatos). É assim chamada por ser removível por fervura, incrustando-se em chuveiros, destiladores e outros sistemas de água quente. A dureza é dita permanente quando o cálcio e o magnésio encontram-se associados a sulfatos, cloretos, nitratos e outros, dando origem a compostos solúveis que não podem ser retirados pelo aquecimento. A dureza total é a soma da dureza temporária e da permanente.

A dureza pode ser expressa como: (1) dureza temporária – devida aos íons de cálcio e de magnésio que, sob aquecimento, se combinam com íons bicarbonato e carbonatos, podendo ser eliminada por fervura, (2) dureza permanente – íons de cálcio e magnésio combinados com sulfato, cloretos, nitratos e outros, dando origem a compostos solúveis que não podem ser retirados pelo aquecimento; ou (3) dureza total – soma da dureza temporária e da permanente. A dureza é expressa em miligrama por litro (mg/L) ou miliequivalente por litro (meq/L) de CaCO<sub>3</sub> (carbonato de cálcio), independentemente dos íons que a estejam causando. A classificação da água em relação à dureza é expressa em termos de concentração do carbonato de cálcio e é mostrada na tabela a seguir.

**Tabela 16:** Graus de dureza da água por faixa de concentração de Cálcio e de Magnésio expressos em mg/L de CaCO<sub>3</sub>.

mg/L de CaCO <sub>3</sub>	Grau de Dureza da água
0 - 75	Branda
75-150	Moderadamente dura
150 - 300	Dura
> 300	Muito dura

A determinação da dureza pode ser feita por espectrofotometria de absorção atômica ou através de titulometria. Utilizando-se o espectrofotômetro de absorção atômica, obtêm-se diretamente as concentrações de cálcio e magnésio na amostra, somando-se os resultados após transformação dos equivalentes-grama para a composição da dureza total. É o método mais preciso, porém este equipamento é caro e geralmente não disponível em todos os laboratórios. O método titulométrico mais utilizado é a complexometria com EDTA sódico 0,01 mol/L sendo que a amostra tem seu pH ajustado previamente por adição de solução tampão. Para determinar a dureza total o pH é elevado para 10 e o indicador metalocrômico comumente usado é o negro de Eriocromo T (NET), que apresenta viragem de vermelho (ou vinho) para azul (escuro), quando a reação de complexação se completa. Para determinar a dureza de Cálcio, o pH é elevado a 13 (para precipitação do Magnésio na forma de Hidróxido) e a titulação é feita com Azul Preto de Eriocromo R (viragem de vermelho para azul) ou o Murexida (purpurato de amônio - viragem de rosa para púrpura). A dureza de Magnésio é determinada por diferença (dureza total subtraída da dureza de Cálcio).

Deve-se atentar para possível interferência da chamada pseudo-dureza provocada pela presença de íons sódio, através do efeito de “íon comum”, especialmente em águas salobras.

### Alcalinidade

É a medida da capacidade da água de neutralizar ácidos e é proporcional à concentração de sais de ácidos fracos e de bases fortes. Elevada alcalinidade associada a altas concentrações de sais dissolvidos, traz sabor desagradável (amargo) à água. Em águas subterrâneas, a alcalinidade é

devida, principalmente e em termos práticos, à soma das concentrações de substâncias carbônicas inorgânicas dissolvidas – bicarbonatos e carbonatos – e, secundariamente, aos íons hidróxidos, silicatos, boratos, fosfatos e amônia. Águas que percolam rochas calcáreas (calcita =  $\text{CaCO}_3$ ) geralmente possuem alcalinidade elevada, sendo que água altamente alcalina pode apresentar valores superiores a 2.000 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ . Já os granitos e os gnaiesses possuem poucos minerais que contribuem para a alcalinidade das águas subterrâneas, sendo que águas com baixa alcalinidade pode apresentar valores menores que 20 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ . Em águas naturais, a alcalinidade das águas está correlacionada à dureza, podendo ser utilizada como parâmetro complementar desta.

Normalmente, sua determinação pode ser feita por titulação com solução aferida de um ácido forte, sendo muito comum o uso de solução a 0,01 mol/L de ácido sulfúrico. A titulação, neste caso, pode ser acompanhada potenciométricamente ou com o emprego de indicadores ácido-base. Os limites de pH ou as soluções indicadoras são os mesmos utilizados para a determinação da acidez da água.

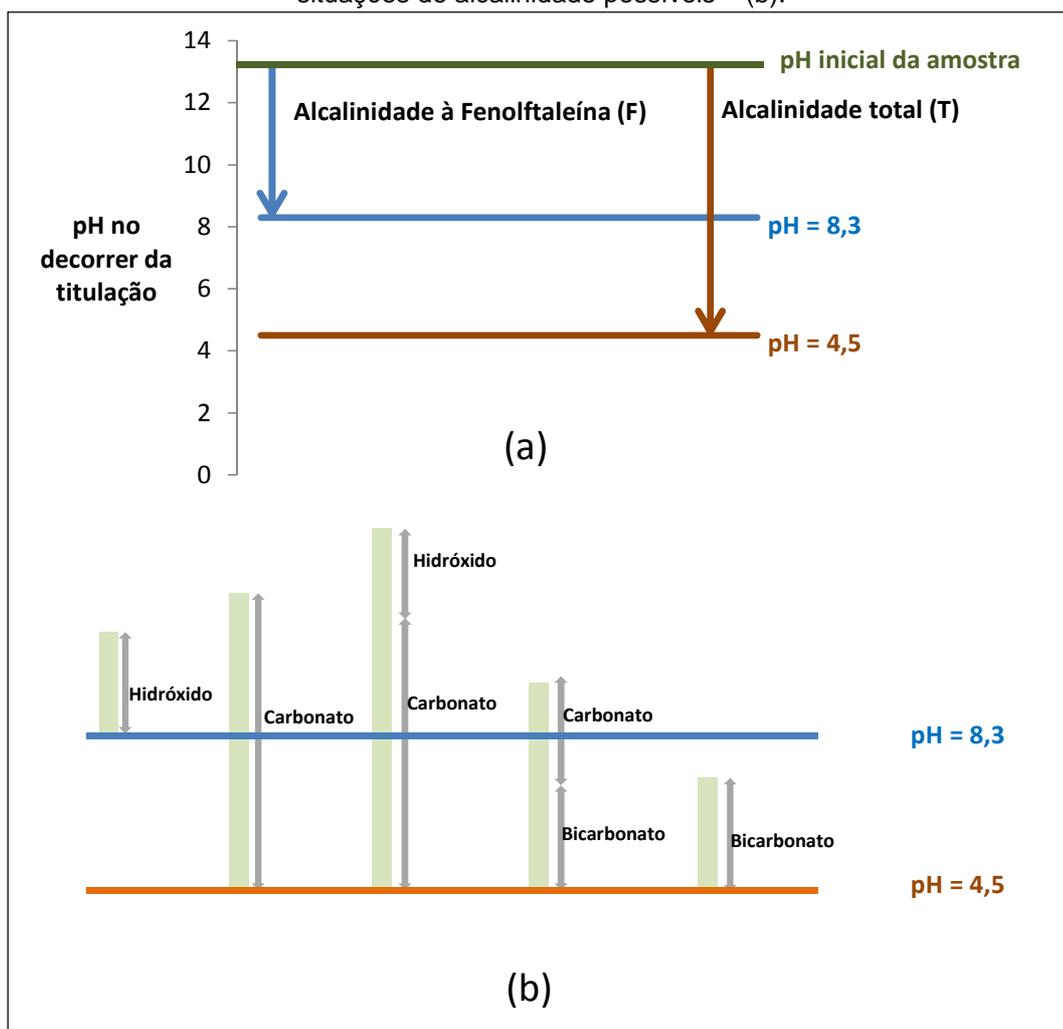
Entretanto, trata-se do processo inverso, ou seja, a água apresenta alcalinidade até o valor inferior de pH de 4,5, que corresponde ao limite da conversão de bicarbonatos em gás carbônico. Desta forma, a água pode possuir acidez e alcalinidade simultaneamente na faixa de pH entre 4,5 e 8,3 devido ao equilíbrio gás carbônico/bicarbonato/carbonato, podendo neutralizar uma ação externa através do deslocamento deste equilíbrio de dois estágios, sem que o pH varie demasiadamente (efeito tampão).

Portanto, podem ser determinados dois valores, F (alcalinidade à Fenolftaleína) e T (alcalinidade total), e com estes resultados existem procedimentos para que se possa calcular os três componentes da alcalinidade, hidróxidos, carbonatos e bicarbonatos, individualmente. Tais determinações e as relações com o pH estão resumidas na Figura 57 e na Tabela 17.

Alcalinidade de hidróxido e alcalinidade de bicarbonato não podem coexistir em uma amostra, pois a alcalinidade devida a hidróxido é típica de meio com pH superior a 10, situação em que prevalece a forma de carbonato e não bicarbonato. Logo, são possíveis as seguintes situações: (a) somente alcalinidade de hidróxido ( $\text{pH} \geq 10$  até 8,3); (b) somente alcalinidade de carbonato pH inicial  $> 8,3$  sendo que a titulação ao ponto da fenolftaleína é exatamente igual à metade da titulação total; (c) alcalinidade de hidróxido e carbonato ( $\text{pH} \geq 10$ ), em que a titulação entre os pontos 8,3 e 4,5 representa metade da alcalinidade de carbonato; (d) alcalinidade de carbonato e bicarbonato ( $8,3 \leq \text{pH} \leq 11$ ), em que a titulação ao pH 8,3 representa metade da alcalinidade de carbonato; e (e) somente alcalinidade de bicarbonato ( $\text{pH} \leq 8,3$ ), a alcalinidade de bicarbonato é a alcalinidade total.

Outro aspecto importante na titulação é o fato de que os carbonatos são 50% neutralizados até pH igual a 8,3. Isto porque até o pH 8,3 ocorre apenas a transformação em bicarbonatos, necessitando-se de igual quantidade do titulante para a conversão final dos bicarbonatos em gás carbônico.

**Figura 57:** Diagramas esquemáticos de Alcalinidade Total (T) e à Fenolftaleína (F) – (a); e das situações de alcalinidade possíveis – (b).



Interpretando-se estes diagramas, obtém-se a Tabela 17 utilizada para o cálculo dos componentes da alcalinidade.

**Tabela 17:** Cálculo dos componentes da alcalinidade.

RESULTADO DA TITULAÇÃO	HIDRÓXIDO	CARBONATO	BICARBONATO
$F = 0$	0	0	T
$F < \frac{1}{2} T$	0	2 F	T - 2 F
$F = \frac{1}{2} T$	0	2 F	0
$F > \frac{1}{2} T$	2 F - T	2 (T - F)	0
$F = T$	T	0	0

### Potencial Hidrogeniônico - pH:

É a medida da concentração de íons  $H^+$  na água. Na água quimicamente pura os íons  $H^+$  estão em equilíbrio com os íons  $OH^-$  e seu pH é neutro, ou seja, igual a 7. O equilíbrio entre os íons de hidrogênio e hidróxido determina se a água apresenta caráter ácido ou básico.

O primeiro equilíbrio químico de interesse que ocorre na água é a dissociação de sua própria molécula, que pode ser representada através da seguinte Equação 3. Mais propriamente, íon hidrogênio,  $H^+$ , permanece associado à própria molécula de água na forma do íon hidrônio, mostrado na Equação 4.



A constante de equilíbrio da reação,  $K_{eq}$ , é baseada na Eq. 3, mais simplificada e é mostrada na Equação 5. Todavia, como a concentração molar de água  $[H_2O]$  é constante e igual a  $1000g/18 = 55,5 \text{ mol / L}$ , define-se uma nova constante de equilíbrio,  $K_w$ , que é o produto iônico da água, Equação 6.

$$K_{eq} = [H] \cdot [OH^-] / [H_2O] \quad (\text{Eq.3})$$

$$K_w = [H^+].[OH^-] \quad (\text{Eq.4})$$

O valor de  $K_w$ , medido a  $25^\circ\text{C}$ , é  $1,1 \times 10^{-14}$ . Em decorrência da dificuldade de se trabalhar com números muito pequenos, tanto para se expressar concentrações molares como constantes de equilíbrio, introduziu-se a notação  $p(x) = -\log x$  e foi criada a escala de pH, que se baseia no antilogaritmo das concentrações de  $H^+$ , em que:  $pH = -\log [H^+]$

$$-\log K_w = -\log [H^+] - \log[OH^-] \quad (\text{Eq.5})$$

$$\therefore pK_w = pH + pOH \quad (\text{Eq.6})$$

$$\therefore \text{a } 25^\circ\text{C} \Rightarrow pH + pOH = 14 \quad (\text{Eq.7})$$

De onde se deduz que o ponto neutro correspondente ao valor de  $pH = 7$  pois teríamos, para  $pK_w = 14$ ,  $pOH = 7$  e portanto  $pH = pOH$ . Note-se que para outros valores de temperatura, o valor de  $pK_w$  varia e a neutralidade não corresponde ao  $pH = 7,0$ . Para  $0^\circ\text{C}$ , por exemplo, o ponto neutro ocorre em  $pH = 6,5$  e, a  $60^\circ\text{C}$ , corresponde ao  $pH = 7,5$ .

Portanto, o pH representa a atividade do íon hidrogênio na água, de forma logaritmizada, resultante inicialmente da dissociação da própria molécula da água e posteriormente acrescida pelo hidrogênio proveniente de outras fontes como efluentes industriais (ácido sulfúrico, clorídrico, nítrico, etc.), dissociação de ácidos orgânicos como o ácido acético, que resulta da "fase ácida" da decomposição anaeróbia da matéria orgânica, bem como outras substâncias que venham a apresentar reação ácida com o solvente (água).

A influência do pH sobre os ecossistemas aquáticos naturais dá-se diretamente devido a seus efeitos que incluem a precipitação ou a solubilização de determinados compostos. Nas águas subterrâneas, os principais fatores que determinam o pH da água são o gás carbônico dissolvido e a alcalinidade. Nestas águas, o pH varia geralmente entre 5,5 e 8,5.

O pH é padrão de potabilidade, recomendando-se que as águas para abastecimento público apresentem valores entre 6,0 e 9,5, de acordo com a Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde. Processos físico-químicos de tratamento da água, como o abrandamento pela cal, são dependentes do pH.

Para a determinação de pH são disponíveis os seguintes métodos:

- Método eletrométrico (peagâmetro – pH-metro ou eletrodo de pH) mais preciso e, portanto, mais recomendável para as aplicações em laboratório e para o controle dos sistemas de uma maneira geral. O pH-metro consiste de um potenciômetro;
- Método comparativo utilizando-se o papel indicador universal de pH ou "kits" de indicadores colorimétricos em solução líquida.

### Potencial de redução - Eh ou pE:

Também chamado por: potencial eletroquímico, potencial de oxiredução, potencial redox, potencial de oxidação/redução, potencial de eletrodo ou ORP (Oxidation Reduction Potential), representa a espontaneidade, ou a tendência de uma espécie química de adquirir elétrons e, desse modo, sofrer redução. Cada espécie tem seu potencial intrínseco de redução, sendo que quanto mais positivo for este valor maior sua tendência para adquirir elétrons e ser reduzida. O valor é medido em volts (V) ou milivolts (mV).

Em soluções aquosas, o potencial de redução é uma medida da tendência da solução de ganhar ou perder elétrons com a inserção de novas espécies. Uma solução com potencial de redução maior que o das novas espécies a serem inseridas apresenta uma tendência a ganhar elétrons das novas espécies.

Para se determinar potenciais de eletrodos se atribui um valor arbitrário a um deles, que se toma referência. Os demais são medidos verificando-se a diferença de potencial que adquirem quando ligados ao eletrodo de referência. O sinal depende do sentido em que ocorre a reação do eletrodo. Por convenção, os potenciais de eletrodo se referem à semi-reação de redução. O potencial é considerado positivo quando a reação que ocorre no eletrodo (em relação ao de referência) é a redução, e negativo quando é a oxidação. O eletrodo mais comum que se toma como referência para tabular os potenciais de eletrodo é o par  $H^+_{(aq, 1M)}/H_{2(1 atm)}$ , que se denomina eletrodo de referência ou normal de hidrogênio, o qual possui valor = 0 volt.

Os eletrodos combinados de ORP já possuem internamente um eletrodo de referência, sendo que, atualmente, o mais utilizado é o Ag/AgCl. O eletrodo padrão de hidrogênio (SHE – standard hydrogen electrode) foi escolhido arbitrariamente para ser 0 mV. Assim, as tabelas de potencial de redução são todas construídas tendo como referência o eletrodo padrão de hidrogênio. Porém, como é muito difícil utilizar esse tipo de eletrodo em laboratórios, normalmente são utilizados os eletrodos Ag/AgCl ou de calomelano como referência (SCE – saturated calomel electrode). Para realizar a correção dos valores de ORP para que os valores sejam dados em relação ao eletrodo de hidrogênio, é preciso usar dados de potencial de redução tabelados em relação à temperatura e à concentração da espécie medida para realizar a correção do valor medido. Assim, se a leitura de ORP foi realizada e obteve-se um valor de 100 mV tendo como referência um eletrodo Ag/AgCl utilizando uma solução saturada de KCl a 30°C, deve ser somado 194 mV ao valor medido, da seguinte forma:

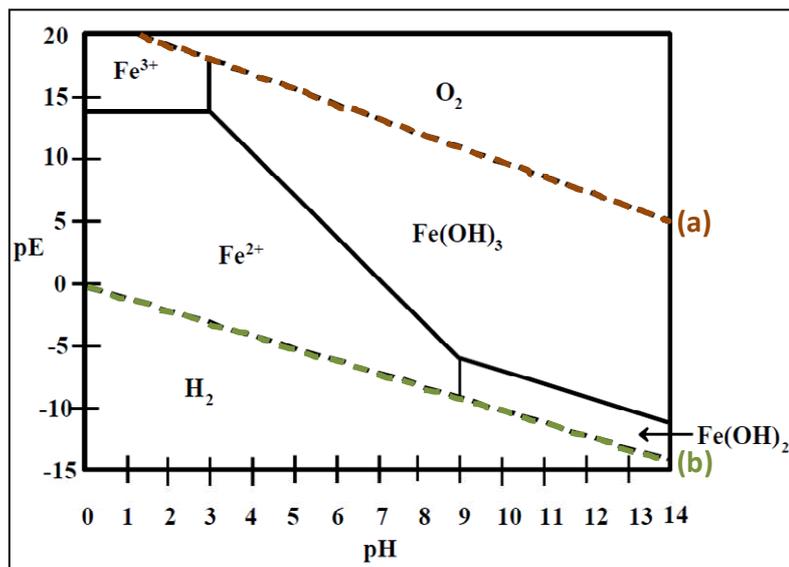
$$Eh = E_{obs} + E_{ref} \Rightarrow Eh = 100 \text{ mV} + 194 \text{ mV} = 294 \text{ mV}$$

Dessa forma, inclusive a solução padrão redox utilizada, denominada solução Zobell ( $KCl + K_3[Fe(CN)_6] + K_4[Fe(CN)_6].3H_2O$ ) tem o seu valor de potencial de redução estimado em relação ao eletrodo Ag/AgCl em ~228mV e em relação ao eletrodo de hidrogênio, a concentração estimada dessa solução é ~430 mV.

Geralmente, a natureza das espécies químicas presentes nas águas depende, tanto dos pE, quanto do pH do meio. Um bom exemplo disto é mostrado por um diagrama simplificado pE x pH para o ferro em água. O ferro pode assumir, neste caso, quatro formas de íons:  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Fe(OH)_3$  (sólido), ou  $Fe(OH)_2$  (sólido) como mostrado na Figura 58.

Na região em que a pE é superior aos valores limitados pela linha tracejada identificada por (a) – em vermelho – a água é termodinamicamente desfavorável à oxidação e na região em que a pE é inferior aos valores limitados pela linha tracejada identificada por (b) – em verde – a água é termodinamicamente desfavorável à redução. Entre as linhas tracejadas, observa-se que quando o meio tem pE mais elevado, ele tende a ganhar elétrons das espécies e, portanto, prevalece o  $Fe^{3+}$  (forma mais oxidada que cedeu elétrons para o meio), tanto como íon livre, quanto combinado  $Fe(OH)_3$  (sólido). À medida que o pE do meio diminui, ele tende a ceder elétrons para as espécies e, portanto, prevalece o  $Fe^{2+}$  (forma menos oxidada que ganhou elétrons do meio), tanto como íon livre, quanto combinado  $Fe(OH)_2$  (sólido). Nas águas subterrâneas, com pH próximo da neutralidade (ligeiramente menor que 7) e devido à deficiência de oxigênio, há prevalência de  $Fe^{2+}$  em solução. Observa-se também que a forma  $Fe(OH)_3$  (sólido), altamente insolúvel, é a espécie predominante de ferro ao longo de um intervalo amplo de valores de pE e de pH.

**Figura 58:** Um diagrama simplificado pE X pH para Ferro na água (concentração total máxima de ferro solúvel de  $1,0 \times 10^{-5}$  M).



Fonte: Adaptado de MANAHAN, 2001.

### Sólidos Totais Dissolvidos (STD)

É a soma dos teores de todos os constituintes minerais presentes como matéria sólida em suspensão na água e que pode ser separada por decantação ou filtração. Os altos níveis deste parâmetro podem ocasionar problemas de sabor, efeitos fisiológicos e corrosão. Nas águas naturais os valores mais comuns são de até 500 mg/L.

A medida de condutividade elétrica expressa em ( $\mu S/cm$ ) e multiplicada por um fator que varia entre 0,55 e 0,75 (normalmente 0,65) fornece uma boa estimativa do STD de uma água subterrânea, resultando numa concentração em (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 Nº 396/2008 e pela Portaria do Ministério da Saúde Nº 2914/2011.

### Fenóis

Os fenóis não ocorrem naturalmente nas águas subterrâneas e sua presença ou de seus derivados está associada ao lançamento de efluentes industriais, originados do processamento da borracha, bem como da produção de colas e adesivos, de resinas impregnantes, de componentes elétricos (plásticos) e as siderúrgicas, dentre outras. Também podem ser produzidos a partir da biodegradação de compostos orgânicos mais complexos, a exemplo de agrotóxicos. Eles estão entre as 25 substâncias mais encontradas em águas subterrâneas da Alemanha e entre as cinco mais encontradas nos EUA (WHO, 1995). Quando se clora água contendo compostos fenólicos em geral, são gerados os clorofenóis que têm efeitos adversos à saúde e geram problemas organolépticos na água.

### Sílica

A sílica encontra-se num vasto número de minerais que constituem as rochas – os silicatos – desempenhando estes um papel importante na química da água, embora menos pronunciado se comparado com o efeito dos carbonatos, em função do processo de meteorização dos silicatos ser muito mais lento. Há variações dependendo da origem dos silicatos. Assim, a olivina e as plagioclases cálcicas, por exemplo, sofrem meteorização mais facilmente e se alteram, enquanto o quartzo, que apresenta maior resistência, será o último mineral a sofrer dissolução.

O efeito da meteorização dos silicatos reflete-se na composição química das águas principalmente através do aumento das concentrações de cátions e de sílica. Esta, geralmente, encontra-se sob a

forma de  $H_4SiO_4$ , estando dissolvida e em estado coloidal, predominantemente. Há pequena parcela encontrada na forma ionizada,  $H_3SiO_4^-$ . As águas com grandes quantidades de sílica ionizada podem-se tornar fortemente básicas, no entanto, estas são muito raras na natureza. Em condições normais, o dióxido de carbono é a principal fonte de prótons, produzindo bicarbonato ao longo do processo de meteorização dos silicatos. No caso das rochas não possuírem carbonatos na sua constituição, a meteorização dos silicatos passa a ser o principal processo tampão na água subterrânea. A maioria das águas naturais tem entre 1 e 40 ppm de  $SiO_2$ , podendo atingir os 100 ppm, especialmente nas águas carbonatadas sódicas. Águas mais básicas podem atingir 1.000 ppm de  $SiO_2$ .

### Constituintes Iônicos

Como já foi dito, as águas subterrâneas tendem a ser mais ricas em sais dissolvidos do que as águas superficiais. As quantidades presentes refletem não somente os substratos rochosos percolados, mas variam também em função do comportamento geoquímico dos compostos químicos envolvidos.

Como existem amplas variações nas composições químicas das rochas, é de se esperar certa correlação entre a composição da água e das rochas preponderantes. Entretanto a concentração de elementos e compostos nas águas depende também do comportamento geoquímico (equilíbrio das reações envolvidas). Assim, por exemplo, o sódio e o potássio, embora apresentem concentrações muito próximas na crosta continental têm concentrações variáveis nas águas subterrâneas.

### Bário (Ba)

O Bário é um elemento raro nas águas naturais, em teores de 0,0007 a 0,9 mg/L. É um elemento muito tóxico acima de determinado teor, sendo que sua ingestão provoca elevação da pressão sanguínea, por vasoconstrição e bloqueio do sistema nervoso. As principais fontes naturais são: intemperismo e erosão de depósitos naturais, normalmente vênios, onde ocorre na forma de barita –  $BaSO_{4(cristal)}$ , ou feldspatos ricos em Ba. Raramente é encontrado livre na natureza devido a sua elevada reatividade – o elemento é facilmente oxidado pelo ar.

O bário na forma pura é produzido comercialmente pela eletrólise do cloreto de bário fundido ( $BaCl_2$ ). Dentre as atividades humanas que introduzem bário no meio ambiente, podemos citar: perfuração de poços, em que seja empregado em lamas de perfuração; produção de pigmentos; fogos de artifício; fabricação de vidros e produção de defensivos agrícolas. De acordo com a Resolução Conama nº 396/2008, o limite permitido de Ba em águas de abastecimento, é de 0,7 mg/L, mesmo valor adotado pela Portaria MS Nº 2914/2011.

### Cádmio (Cd)

Normalmente está presente nas águas naturais em pequenas concentrações, geralmente inferiores a 0,001 mg/L. É um dos metais mais tóxicos, apesar de ser um elemento químico essencial, necessário em quantidades muito pequenas, entretanto, sua função biológica não é muito clara. Além do elevado potencial tóxico, este metal se acumula em organismos aquáticos, o que possibilita sua entrada na cadeia alimentar. Sua ingestão provoca disfunção renal, hipertensão, arteriosclerose, inibição no crescimento, doenças crônicas em idosos e câncer. Normalmente é encontrado em minas de zinco, sendo empregado principalmente na fabricação de pilhas. Outras fontes antrópicas de liberação de cádmio são: combustíveis fósseis, pigmentos, soldas, equipamentos eletrônicos, lubrificantes, acessórios fotográficos, defensivos químicos, e tratamento de minérios. Segundo a Resolução Conama nº 396/2008, o limite permitido de Cd em águas de abastecimento, é de 0,005 mg/L, mesmo valor adotado pela Portaria MS Nº 2914/2011. A mesma Resolução estabelece limites de 0,01 e 0,05 mg/L para irrigação e para dessedentação animal, respectivamente.

### Cálcio ( $Ca^{2+}$ )

O cálcio é um dos principais elementos responsáveis pela dureza nas águas, sendo amplamente distribuído em rochas e solos e constituindo-se no quinto elemento em abundância na crosta terrestre. A concentração de cálcio nas águas subterrâneas varia, de uma forma geral, de 10 a 100 mg/L. É essencial para a transmissão nervosa, coagulação do sangue e contração muscular; atua também na respiração celular, além de garantir uma boa formação e manutenção de ossos e dentes

e auxiliar na produção dos líquidos linfáticos. As fontes geológicas são muitas, tendo como exemplos: calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), anortita ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ), plagioclásios cálcicos ( $(\text{Ca}, \text{Na})\text{Al}(\text{Al}, \text{Si})\text{Si}_2\text{O}_8$ ), dolomita ( $\text{Ca}, \text{Mg}(\text{CO}_3)_2$ ), apatita ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})$ ), e gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).

O carbonato de cálcio é muito pouco solúvel em água pura, estando em equilíbrio químico com o bicarbonato (mais solúvel). A solubilização/precipitação do carbonato de cálcio varia em função da quantidade de gás carbônico dissolvido que, por sua vez, depende da temperatura e da pressão. Estes dois fatores é que determinam a concentração do carbonato e do bicarbonato de cálcio na solução aquosa. Partindo da água pura, a concentração de carbonato de cálcio dissolvido aumenta com o aumento do gás carbônico, até o limite de solubilidade, quando passa a ocorrer a precipitação de  $\text{CaCO}_3(\text{s})$ . O excesso de gás carbônico leva à formação de bicarbonato solúvel. Em geral, ocorre o decréscimo da presença de gases ( $\text{CO}_2$ ) na massa líquida, com a elevação da temperatura (maior agitação das moléculas, faz com que o gás tenda a passar para a fase gasosa, sendo liberado) e com a diminuição da pressão (menor capacidade do gás se dissolver na água e permanecer nela). Os íons envolvidos no equilíbrio químico do cálcio não sofrem oxidação e nem redução nas águas naturais. O bicarbonato ( $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ) predomina sobre o carbonato ( $\text{CaCO}_3$ ) na faixa de pH de 6 a 10.

### *Chumbo (Pb)*

Nas águas naturais, não é comum a presença de chumbo, sendo que a introdução deste metal tóxico nas águas ocorre por diversas fontes antrópicas: produção de acumuladores elétricos, aplicação em revestimentos de cabos elétricos, uso na construção civil (em função da resistência à corrosão), na manipulação de ácidos em escala industrial, na indústria de munição, de pigmentos, em EPIs para raios-X e em forma de ligas metálicas para a produção de soldas, materiais antifricção, metais de tipografia, dentre outros. Além disso, compostos organoplúmbicos são usados como: catalisadores na fabricação de espumas de poliuretano, agentes tóxicos para as pinturas navais (inibição de incrustações), agentes biocidas (em madeira, algodão, etc.), agentes auxiliares em lubrificantes, e inibidores da corrosão do aço. A fabricação de chumbo tetra etílico vem diminuindo em função de regulamentações ambientais cada vez mais restritivas no mundo, no que se diz respeito à aplicação deste como aditivo na gasolina. No caso do Brasil, desde 1978 este aditivo deixou de ser usado como antidetonante.

O chumbo não apresenta nenhuma função essencial conhecida no corpo humano, sendo danoso, especialmente ao sistema nervoso central (SNC). Sua toxicidade engloba: alteração de enzimas e proteínas estruturais; danos à integridade da barreira hematoencefálica, à síntese de colágeno e à permeabilidade vascular; edema e hemorragia cerebrais (em intoxicações graves); alterações no transporte membranar; prejuízos à transmissão sináptica; perturbação da biossíntese da hemoglobina e anemia; aumento da pressão sanguínea; danos aos rins; abortos e diminuição da fertilidade; prejuízos à aprendizagem em crianças; e modificações no comportamento – impulsividade e hipersensibilidade.

O mineral de chumbo mais comum é a galena ( $\text{PbS}$ ), havendo outros minerais de importância comercial como a cerusita ( $\text{PbCO}_3$ ) e a anglesita ( $\text{PbSO}_4$ ). Geralmente é encontrado associado com minerais de cobre, zinco, prata e, também com os radioisótopos de urânio e de tório, uma vez que é obtido pela desintegração radioativa destes. Os minerais comerciais contêm entre 3 e 10% de chumbo.

Segundo a Resolução Conama nº 396/2008, o limite permitido de Pb em águas de abastecimento, é de 0,01 mg/L, mesmo valor adotado pela Portaria MS Nº 2914/2011. A Resolução estabelece limites também limites de 0,1, 5 e 0,5 mg/L para dessedentação animal, irrigação e para recreação, respectivamente.

### *Cloreto (Cl<sup>-</sup>)*

O cloreto ocorre em todas as águas naturais, sendo que nas águas subterrâneas, sua origem natural associa-se à percolação da água através de solos e rochas e a concentração mais usual é de até 200 mg/L. Acima dos 250 mg/L, os cloretos produzem sabor desagradável mas não chegam a ser prejudiciais para a saúde humana, mesmo em valores superiores. O cloreto afeta ecossistemas aquáticos naturais, provocando alterações na pressão osmótica em células de microrganismos. São estáveis em solução e dificilmente formam precipitados. Os mares e os oceanos têm elevada

concentração em cloretos e as águas de montanhas e de terras altas apresentam as menores concentrações destes íons, indicando que as águas tendem a se enriquecer de cloretos, juntamente com o sódio, a partir das zonas de recarga das águas subterrâneas. Teores anômalos são indicadores de contaminação por água do mar (intrusão da cunha salina) ou por fontes antrópicas, a exemplo de lixões e aterros. Altas concentrações de cloretos são encontradas nos efluentes da indústria petroquímica, certas indústrias farmacêuticas, curtumes, papel e celulose, dentre outros. Os minerais fontes mais comuns são a halita (NaCl) e a silvita (KCl).

Segundo a Resolução Conama nº 396/2008, o limite permitido de Cl<sup>-</sup> em águas de abastecimento, é de 250 mg/L, mesmo valor adotado pela Portaria MS Nº 2914/2011, como limite de padrão organoléptico de potabilidade. 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.

### **Cobre (Cu)**

Por apresentar baixa solubilidade, as concentrações de cobre nas águas subterrâneas, em condições naturais, são bastante baixas, cerca de 0,001 mg/L. O cobre é um oligoelemento essencial à vida, em geral, participando, no caso do organismo humano, da síntese da hemoglobina e está presente normalmente no cérebro e no fígado. A recomendação é de uma absorção individual diária de cerca de 2 mg/dia. Todavia, em altas concentrações, o metal torna-se tóxico, sendo que os sintomas associados são: danos à mucosa, problemas hepáticos, renais, irritação do sistema nervoso e depressão, vômitos, febre, diminuição de apetite, fraqueza muscular, dores epigástricas, patologia pulmonar e renal, e cirrose do fígado. Os portadores da Doença de Wilson (doença genética em que o metal se acumula no fígado desde o nascimento) podem ser seriamente afetados pela presença de cobre na água, podendo ocorrer hemólise, cirrose, necrose maciça do fígado, além de distúrbios neurológicos.

Exemplos de minerais que dão origem ao cobre são: bornita (Cu<sub>5</sub>FeS<sub>4</sub>), calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>), enargita (Cu<sub>3</sub>As<sub>5</sub>S<sub>4</sub>), cuprita (Cu<sub>2</sub>O), malaquita (CuCO<sub>3</sub>.Cu(OH)<sub>2</sub>), azurita (2CuCO<sub>3</sub>.Cu(OH)<sub>2</sub>) e crisocola (CuSiO<sub>3</sub>.2H<sub>2</sub>O), calcocita (Cu<sub>2</sub>S) e covelita (CuS).

As atividades mineiras podem provocar a contaminação de rios e águas subterrâneas com cobre e outros metais, tanto durante a exploração como depois de exaurida. Outras atividades humanas responsáveis pela introdução de cobre na água são: corrosão de tubos de cobre e de latão, algicidas, fungicidas, indústria de fundição e galvanoplastia.

Além disso, a água com conteúdo em cobre superior a 5 mg/L torna-se colorida e com sabor desagradável. A Organização Mundial da Saúde (OMS) no *Guia para a qualidade da água potável* recomenda um nível máximo de 2 mg/L, mesmo valor adotado na União Européia; e a USEPA limitou a 1,3 mg/L a concentração máxima para a água potável nos Estados Unidos. No Brasil, a Portaria MS Nº 2914/2011 fixou limite em águas de abastecimento de 2 mg/L. A Resolução Conama nº 396/2008, estabelece os seguintes limites nas águas: 2 mg/L para consumo humano; 0,5 mg/L para dessedentação animal; 0,2 mg/L para irrigação; e 1 mg/L para recreação.

### **Ferro (Fe)**

O ferro aparece principalmente em águas subterrâneas devido à dissolução do minério pelo gás carbônico da água, conforme a reação:  $Fe + CO_2 + \frac{1}{2} O_2 \leftrightarrow FeCO_3$ , sendo comum em, praticamente, todas as águas subterrâneas com concentrações variáveis, de 0,1 a 2 mg/L ou mais. Apesar de não se constituir em um tóxico e do organismo humano necessitar de cerca de 6 mg de ferro por dia, este elemento ocasiona problemas se a água é utilizada no abastecimento público: confere cor e sabor metálico desagradáveis à água, causa manchas em roupas e utensílios sanitários, provoca incrustações resultantes da atividade das ferro-bactérias em canalizações e em poços, provoca contaminação biológica da água na própria rede de distribuição, prejudica a preparação de café e chás, interfere nos processos industriais (fabricação de papel, tecidos, tinturaria e cervejarias), possibilita o desenvolvimento de bactérias ferruginosas nocivas.

Suas fontes são alguns minerais escuros tais como a magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), biotita (K(Mg,Fe)<sub>3</sub>(AlSi<sub>3</sub>O<sub>10</sub>)(OH)<sub>2</sub>), pirita (FeS<sub>2</sub>), piroxênios (Fe(Si,Al)<sub>2</sub>O<sub>6</sub>), e anfibólios ((Si<sub>4-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>11</sub>OH)<sub>2</sub>(Fe<sub>14+2x</sub>)). Em virtude de afinidades geoquímicas quase sempre é acompanhado pelo

Manganês. O metal no estado ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) forma compostos solúveis, principalmente hidróxidos. Em ambientes oxidantes o  $\text{Fe}^{2+}$  passa a  $\text{Fe}^{3+}$  dando origem ao hidróxido férrico, que é insolúvel e se precipita.

A Portaria MS Nº 2914/2011 fixa um limite máximo de 0,3 mg/L de ferro para água potável, todavia prevê em seu artigo 39, § 4º, algumas exceções, ou seja, para o ferro e o manganês são permitidos valores superiores ao VMPs estabelecidos desde que sejam observados os seguintes critérios: (1) os elementos ferro e manganês estejam complexados com produtos químicos comprovadamente de baixo risco à saúde, conforme preconizado no art. 13 e nas normas da ABNT; (2) os VMPs dos demais parâmetros do padrão de potabilidade não sejam violados; e (3) as concentrações de ferro não ultrapassem 2,4 mg/L.

De forma semelhante, a Resolução Conama nº 396/2008, fixa limite de 0,3 mg/L para consumo humano e para recreação e de 5 mg/L para irrigação.

### *Flúor (F)*

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 1,5 mg/L, que podem variar ligeiramente em função da quantidade de água ingerida diariamente e da idade do consumidor. Concentrações menores do que 0,75 mg/L acarretam a subdosagem que não traz o benefício anticárie; e concentrações maiores que 0,93 mg/L podem resultar em sobredosagem, associada à fluorose. Esta última caracteriza-se pelo escurecimento dos dentes e pela perda de resistência dos dentes e ossos.

A origem do flúor nas águas subterrâneas está associada ao intemperismo de minerais, dentre os quais: fluorita ( $\text{CaF}_2$ ), fluorapatita ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ ) e criolita ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ). O flúor liberado dos minerais passa a íon fluoreto, de alta mobilidade. É o elemento mais eletronegativo e o mais reativo dos ametais e forma compostos com praticamente todos os demais elementos, incluindo os gases nobres e, diferentemente dos outros halogênios, forma complexos estáveis, os fosfatos, com Al, Fe, B e Ca.

O flúor de fonte antrópica pode atingir as águas subterrâneas a partir do seu lançamento na atmosfera ou em corpos hídricos superficiais por indústrias siderúrgicas, fundições, fábricas de alumínio, de louças e esmaltados, vidro, teflon, dentre outras. Na atmosfera, um dos compostos de flúor é o clorofluorcarbono (CFC) que foi amplamente utilizado como propelente de aerossóis, refrigerante, agente espumante e isolante. Este uso está em declínio devido a restrições legais ao CFC que contribui para a destruição da camada de ozônio.

A Portaria MS Nº 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 nº 396/2008, fixa limite de 1,5 mg/L para consumo humano. Esta Resolução fixa 2 mg/L para dessedentação animal e de 1 mg/L para irrigação.

### *Magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ )*

O magnésio é um elemento cujo comportamento geoquímico é semelhante ao do cálcio e, de forma geral, acompanha este elemento, sendo também responsável pela dureza nas águas. Entretanto, diferentemente do cálcio, seus sais são mais solúveis e apresenta menor tendência a se precipitar. A alta solubilidade dos íons de magnésio na água assegura-lhe a posição como terceiro elemento mais abundante na água do mar (cerca de 1400 mg/L).

Este metal alcalino-terroso está presente em mais de 60 minerais, sendo os mais importantes: dolomita ( $\text{Ca, Mg}(\text{CO}_3)_2$ ), magnesita ( $\text{MgCO}_3$ ), brucita ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ), carnallita ( $\text{KMgCl}_3 \cdot 6(\text{H}_2\text{O})$ ), serpentina ( $(\text{Mg, Fe})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), kainita ( $\text{KCl} \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) e olivina ( $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$ ). Estes minerais são menos susceptíveis ao intemperismo químico se comparados aos minerais de cálcio, e, por isso, o teor de Mg nas águas subterrâneas é significativamente menor do que o de Ca, sendo que as concentrações nos aquíferos varia entre 1 e 50 mg/L. Sendo elemento químico essencial para o homem, o magnésio encontra-se nos ossos, desempenha papel importante na atuação de diversas

coenzimas e nas reações que dependem da ATP; e tem função estabilizadora para a estrutura de cadeias de ADN e ARN.

### *Manganês (Mn)*

É um elemento que acompanha o ferro, com relação ao seu comportamento geoquímico. Ocorre em teores abaixo de 0,2 mg/L, quase sempre como óxido de manganês bivalente, que se oxida em presença do ar, dando origem a precipitados negros. Seus principais minérios são a pirolusita ( $MnO_2$ ) e a rodocrosita ( $MnCO_3$ ).

Embora seja um oligoelemento essencial – tem funções tanto estruturais, quanto enzimáticas, apresenta efeitos tóxicos quando ingerido acima de determinadas concentrações, tais como disfunção hepática, dores abdominais e pancreatite.

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 VMPs 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.

### *Níquel (Ni)*

O metal é estável, praticamente inoxidável e insolúvel. As concentrações naturais de níquel nas águas subterrâneas varia de 0 a 1 mg/L, sendo que os valores mais comuns estão em torno de 0,1 mg/L. Este elemento é encontrado combinado em diversos minerais como garnierita ( $[(Mg,Ni)_6(Si_4O_{10})]$ ), millerita ( $NiS$ ), nicolita ( $NiAs$ ) e pentlandita ( $(Fe,Ni)_9S_8$ ). Concentrações superiores a 11 mg/L podem ser encontradas em áreas de mineração, sendo que as principais fontes antropogênicas de níquel são: queima de combustíveis fósseis, fundição e ligas, galvanoplastia.

Muitas enzimas hidrogenases contêm níquel, e há indicações de que o níquel é a parte ativa da enzima. Embora seja um oligoelemento essencial, em altas concentrações pode levar a alergias (dermatite) em contato com a pele de pessoas sensíveis e a intoxicação por ingestão pode causar sintomas como dores, febre, insônia e náuseas, afetando o sistema nervoso, além de riscos cardíacos.

A Portaria MS Nº 2914/2011 fixa um limite máximo de 0,07 mg/L de níquel para água potável. De forma mais restritiva, a Resolução Conama nº 396/2008, fixou limite de 0,02 mg/L para consumo humano. Esta Resolução limita também os níveis de níquel nas águas subterrâneas em: 1 mg/L para dessedentação animal, 0,2 mg/L para irrigação e 0,1 mg/L para recreação.

### *Nitrato ( $NO_3^-$ )*

Normalmente, o nitrogênio e seus compostos não são encontrados nas rochas da crosta terrestre, sendo que o mineral-fonte são as rochas denominadas evaporitos, de ocorrência muito rara. Portanto, em sua grande parte, o nitrogênio atinge, naturalmente, as águas subterrâneas em decorrência do seu ciclo biogeoquímico que faz com que este elemento circule continuamente entre águas, solo e ar, mediante ação das plantas e dos animais, o que pode ser intensificado nos lençóis freáticos em função do aporte de águas de chuva. O nitrato é um dos íons mais encontrados em águas naturais, e se, geralmente, ocorre em baixos teores nas águas superficiais, pode atingir altas concentrações em águas profundas. O nitrato ocorre em águas naturais subterrâneas em concentrações que variam de 0,1 a 5 mg/L, sendo que as maiores concentrações ocorrem principalmente em áreas densamente florestadas.

As principais fontes antrópicas de contaminação por nitrato são a infiltração de esgotos, principalmente em ambiente urbano, e de fertilizantes inorgânicos e orgânicos em ambiente rural. Há relatos, no Brasil, de aquíferos com mais de 100 mg/L de nitrato. Em função disso, este composto é um bom indicador da contaminação das águas subterrâneas, principalmente porque apresenta alta

mobilidade (muito solúvel) e persistência, podendo contaminar extensas áreas. Estudos alertam que a ingestão de água proveniente de poços que contêm uma alta concentração de nitrato está relacionada com a incidência do câncer de estômago, provavelmente associados à transformação do nitrato em nitrosaminas no sistema digestivo. O composto contribui para o aumento da corrosividade das águas.

Já o nitrito e a amônia raramente são encontrados em águas naturais, sendo praticamente ausentes, pois se convertem rapidamente a nitrato pela ação de bactérias. Portanto, concentrações de nitrito e amônia nas águas subterrâneas são indicativas de poluição orgânica recente.

Para avaliar se a concentração de nitrato realmente mostra contaminação antrópica, é necessário estabelecer o valor de fundo (*background*) 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.

O nitrato encontrado em águas minerais é associado ao risco de duas doenças graves: a metemoglobinemia, conhecida como síndrome do bebê azul, especialmente em bebês até os três meses de idade, e o câncer gástrico. Estudos alertam que a ingestão de água proveniente de poços que contêm uma alta concentração de nitrato está relacionada com a incidência do câncer de estômago, provavelmente associados à transformação do nitrato em nitrosaminas no sistema digestivo. Também provoca: hipotensão (devido à vasodilatação) e dores de cabeça.

Diversos autores relatam algumas dificuldades metodológicas na determinação dos nitratos nas águas. A quantificação de nitrato pode ser feita por colorimetria, destilação, potenciometria, espectrofotometria na região ultravioleta, cromatografia gasosa e cromatografia líquida. Na espectrofotometria UV, por exemplo, pode haver interferência nos resultados pela presença de cloreto, do íon nitrito, e de surfactantes. Uma alternativa é a determinação indireta do nitrato que apresenta vantagens em relação à direta: maior sensibilidade, maior precisão e melhor seletividade, ou seja, é menos sujeita à interferência de outros íons.

Tanto a Portaria MS Nº 2914/2011, quanto a Resolução Conama nº 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.

### **Potássio (K<sup>+</sup>)**

O potássio, embora abundante na crosta terrestre, ocorre em pequenas quantidades nas águas subterrâneas, comparado ao cálcio e ao magnésio. Isso ocorre devido a: sua intensa participação em processos de troca iônica e sua tendência de ser adsorvido pelos minerais de argila, e pelo fato de ser bastante utilizado pelos vegetais. Seus principais minerais fonte são os feldspatos potássicos, podendo ser destacados: potassa (KOH), muscovita ( $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$ ), microclina e ortoclásio ( $KAlSi_3O_8$ ) e biotita ( $K(Mg,Fe^{2+})(Al,Fe^{3+})_2Si_3O_{10}(OH,F)_2$ ). Nas águas subterrâneas, a concentração de potássio é, em geral, menor do que 10 mg/L, sendo mais frequentes valores entre 1 e 5 mg/L.

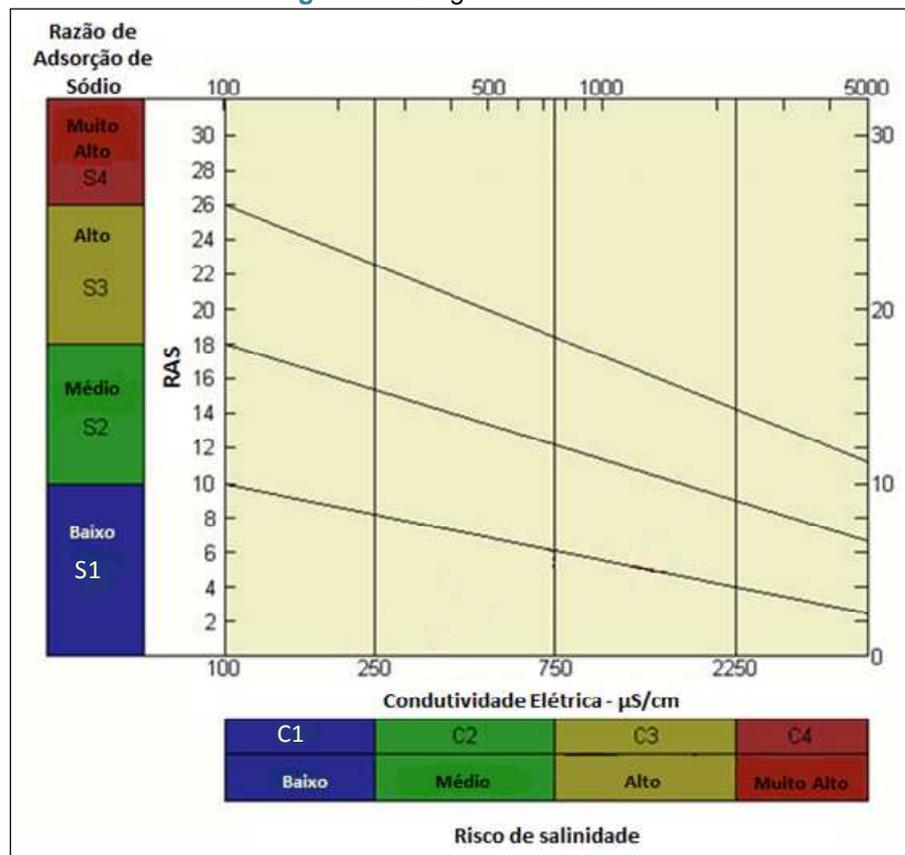
O íon K<sup>+</sup> está presente nas extremidades dos cromossomos estabilizando sua estrutura, bem como do ADN e do ARN (igual ao correspondente íon magnésio), compensando a carga negativa dos grupos fosfatos, além de intervir na respiração. A bomba de sódio é um mecanismo pelo qual se conseguem as concentrações requeridas de íons K<sup>+</sup> e Na<sup>+</sup> dentro e fora da célula - concentrações de íons K<sup>+</sup> mais altas dentro da célula do que no exterior - para possibilitar a transmissão dos impulsos nervosos. A diminuição do nível de potássio no sangue provoca hipopotassemia, além dos seguintes sintomas: acne, prisão de ventre, depressão, cansaço, problemas de crescimento, insônia, fraqueza muscular, nervosismo, dificuldades respiratórias, retenção de sal e batimentos cardíacos fracos. Todavia, o excesso provoca a hipercalemia ou hiperpotassemia, associada à fraqueza e à dificuldade na articulação das palavras.

### Sódio (Na<sup>+</sup>)

O sódio é um elemento frequentemente presente nas águas subterrâneas e sua ocorrência está associada a: ampla distribuição em minerais fontes; baixa estabilidade química dos minerais que o contém; solubilidade elevada e difícil precipitação dos seus compostos químicos em solução. Seus principais minerais fonte, os feldspatos plagioclásios, são pouco resistentes aos processos intempéricos, principalmente os químicos. Exemplo deles é a albita (NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>).

Nas águas subterrâneas, as concentrações de sódio variam entre 0,1 e 100 mg/L, sendo que há um enriquecimento gradativo deste metal a partir das zonas de recarga. A quantidade de sódio presente na água é um elemento limitante de seu uso na agricultura. 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 pela CE. A RAS indica a porcentagem de sódio contida na água que pode ser adsorvida 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 ou teor absoluto de sais nas águas, que pode ser medida indiretamente pela CE, também é um fator limitante ao uso na agricultura, impactando os solos e o desenvolvimento das plantas. Portanto, para se avaliar o potencial de determinada água para a irrigação é feita sua classificação de acordo com os critérios de Richards (1969) do *United States Salinity Laboratory*, por meio do diagrama de Wilcox, apresentado na Figura 59.

Figura 59: Diagrama de Wilcox.



Fonte: VARGAS, 2001.

Tanto a Portaria MS N° 2914/2011, quanto a Resolução Conama n° 396/2008, fixam um limite máximo de 200 mg/L de sódio para a potabilidade da água. A Resolução Conama limita também os níveis de sódio nas águas subterrâneas em 300 mg/L para a recreação.

### *Sulfato ( $SO_4^{2-}$ )*

A presença de sulfato nas águas está relacionada à oxidação de sulfetos nas rochas e à lixiviação de compostos sulfatados como gipsita ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) e anidrita ( $CaSO_4$ ), ocorrendo em quantidades variáveis nas águas subterrâneas naturais. A concentração deste ânion pode atingir 200 mg/L. Dependendo do sal, o sulfato varia de moderadamente a muito solúveis, excetuando os sulfatos de estrôncio e de bário, que são pouco solúveis.

Tanto a Portaria MS Nº 2914/2011, quanto a Resolução Conama nº 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 para dessedentação animal e 400 mg/L para recreação.

### *Alumínio (Al)*

Este cátion apresenta-se frequentemente como um constituinte da maior parte das rochas, surgindo, normalmente, sob a forma de alumino-silicatos, em particular nas argilas, podendo ser originado a partir do feldspato (constituente da areia) por dissolução em condições ácidas. Portanto, sua concentração nas águas está, normalmente, correlacionada com as concentrações de sílica dissolvida. As rochas são, assim, a principal origem do alumínio presente nas águas. Elevadas concentrações de alumínio na água podem estar relacionadas com o uso de matéria-prima como a alumina, estabilizante usado na produção de vidro, na forma de anortita ( $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ), ou bauxita ( $Al_2O_3 \cdot 2H_2O$ ). A solubilidade do alumínio é fortemente dependente do pH e concentrações significativas são encontradas somente em pH inferiores a 5.5. Além do pH, sua solubilização é influenciada pela temperatura e pela presença de fluoretos e sulfatos (que aumentam a solubilidade do metal), matéria orgânica e outros ligantes.

### *Zinco (Zn)*

Na água, este cátion encontra-se em pequenas concentrações, sendo, geralmente, os íons mais frequentes o  $Zn^{2+}$ ,  $Zn(OH)^+$  e  $Zn(Cl_3)^-$ . Em condições aeróbias,  $Zn^{+2}$  é a espécie predominante em pH ácido. Em condições anaeróbias, forma ZnS entre pH 1 a 14. O zinco se adere rapidamente a muitos ligantes orgânicos, principalmente na presença de compostos de nitrogênio e enxofre doadores de átomos.

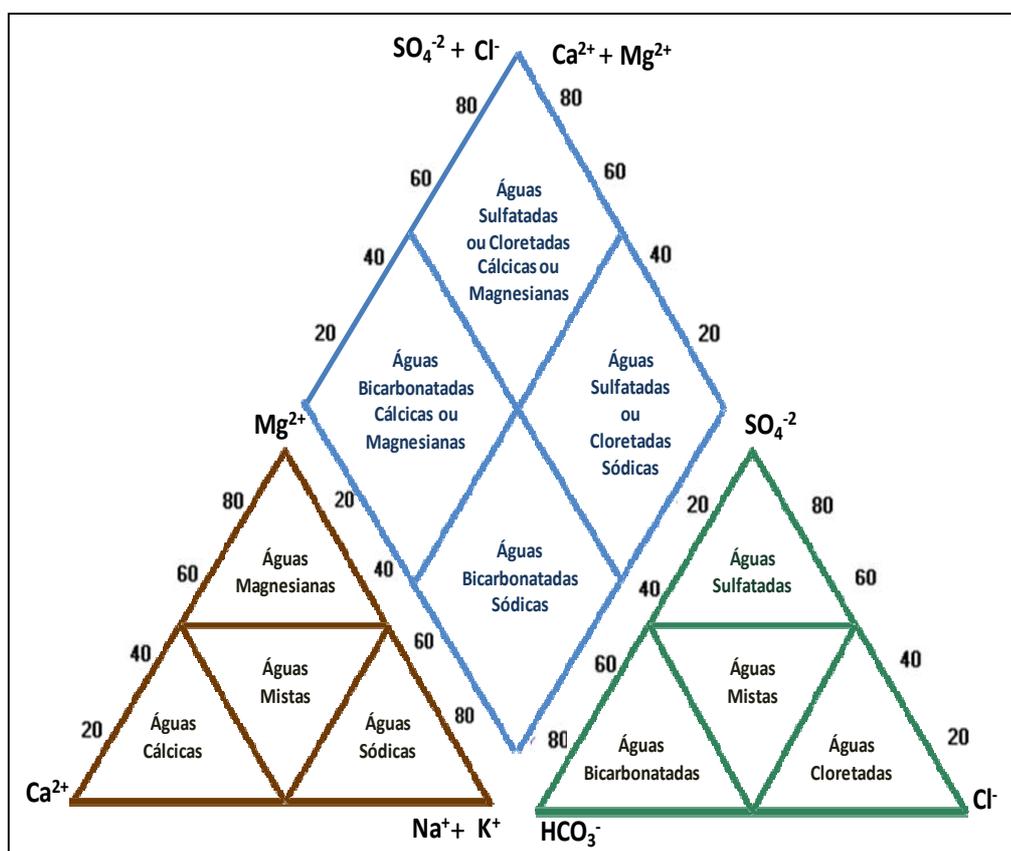
Os minerais-fonte do zinco são: esfalerita e blenda (sulfetos), smithsonita (carbonato), hemimorfita (silicato) e franklinita (óxido) e o elemento é comum nas associações com sulfuretos (ZnS), carbonatos ( $ZnCO_3$ ) e silicatos ( $Zn_2SiO_4 \cdot H_2O$ ). Raramente surge em elevadas concentrações nas águas naturais subterrâneas, sendo geralmente mais frequentes como  $Zn^{2+}$ ,  $Zn(OH)^+$  e  $Zn(Cl_3)^-$ . Em concentrações superiores, em torno de 30 mg/L, este elemento confere à água um forte sabor adstringente desagradável e a partir de 40-50 mg/L apresenta elevada toxicidade.

## Classificação das Águas

Em relação às águas naturais subterrâneas, sua classificação hidroquímica é feita com base nas espécies mais abundantes dentre os íons principais –  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{CO}_3^{2-}$  - que representam mais de 90% dos sólidos dissolvidos nas águas subterrâneas.

Os diagramas de Piper ou trilineares são obtidos plotando as proporções dos cátions principais e dos ânions principais em dois diagramas triangulares respectivos, e projetando os pontos obtidos no losângulo situado entre os mesmos – ver Figura 60. As proporções são traçadas nos gráficos triangulares e suas escalas, para a soma das variáveis correspondam a 100%. Assim, são computadas as proporções relativas dos íons principais, e não suas concentrações absolutas. Se algum cátion ou ânion perfizer mais de 50% do conteúdo iônico total, a água é classificada por esta espécie predominante. Quando isto não acontece, a água é classificada pelos dois mais abundantes. Outro íon de menor interesse, quando em concentração alta também pode entrar na denominação. Esta ferramenta deve ser usada para um grupo representativo de amostras de determinado poço de observação.

**Figura 60:** Diagrama de *Piper* ou trilinear aplicado para comparar e para classificar diferentes grupos de águas naturais.



Para amostragens pequenas, outros diagramas podem ser utilizados, como o diagrama de Stiff e, no caso das águas subterrâneas, é mais adequada a utilização do Diagrama de Stiff Modificado, com apenas três retas, correspondentes aos cátions  $\text{Na}+\text{K}$ ,  $\text{Ca}$ , e  $\text{Mg}$  e aos ânions  $\text{Cl}$ ,  $\text{HCO}_3$  e  $\text{SO}_4$ .

## Água e Saúde

O excesso ou a deficiência de determinados constituintes nas águas estão diretamente associados à incidência de doenças no homem e nos animais, como ilustram alguns exemplos da Tabela 18.

**Tabela 18:** Doenças associadas à qualidade da água.

ELEMENTO	DOENÇAS CORRELACIONADAS
Iodo - deficiência	Bócio (hipertrofia da tireóide)
Zinco - deficiência	Anemias severas, nanismo e hiperpigmentação da pele
Flúor - deficiência	Maior incidência de cáries dentárias
Flúor - excesso	Fluorose esquelética e dentária
Mercúrio - excesso	Anencefalia
Selênio - excesso	Inapetência
Chumbo - excesso	Esclerose múltipla
Cádmio - excesso	Hipertensão e arteriosclerose
Mercúrio - excesso	Anencefalia

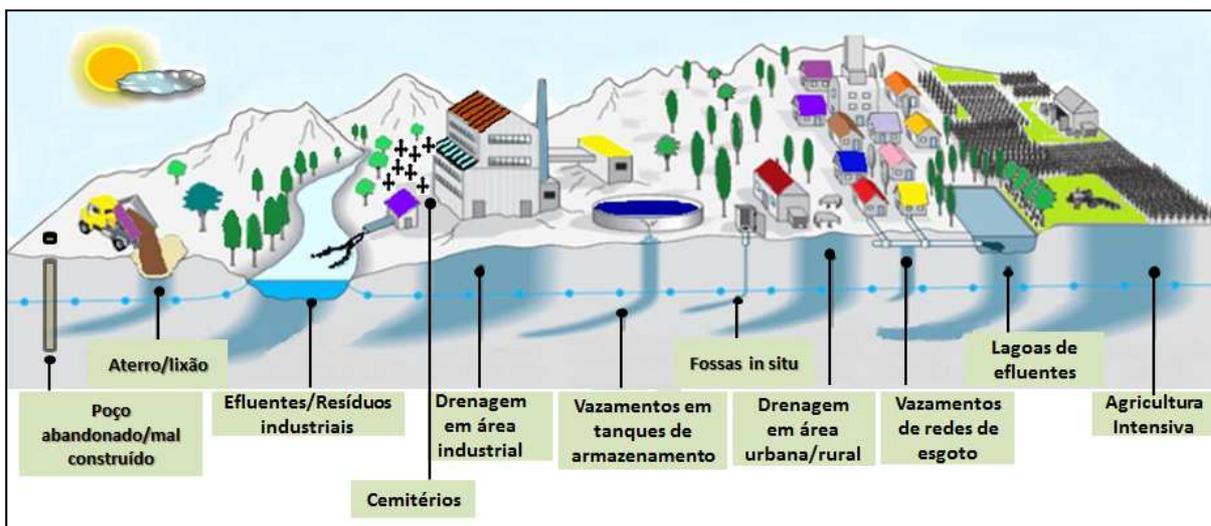
O estabelecimento das relações entre concentrações de elementos ou de compostos e a saúde podem ser dificultados por questões relativas à mobilidade e à dispersão destes elementos e substâncias, governadas pelos princípios da geoquímica e da dinâmica das águas superficiais e subterrâneas. Fatores como o pH, tipo e abundância de argilo-minerais, teor de matéria orgânica, hidróxidos de ferro, manganês e alumínio, reatividade química, gradientes hidráulicos, porosidade e permeabilidade devem ser considerados nestes tipos de estudo. Muitas vezes, os efeitos tóxicos de uma substância manifestam-se distante de sua introdução no meio ambiente, podendo dar-se em áreas pontuais ou ao longo de estruturas geológicas lineares, como falhas. Em alguns casos, a manifestação da enfermidade só é correlacionada à presença do elemento ou composto quando ocorrem manifestações clínicas evidentes por exposições anormais a produtos, normalmente resultantes de atividades humanas. Em outros casos, o desequilíbrio em elementos traços se manifesta em debilitações sub-clínicas, sendo de difícil diagnose. Muitas vezes, o produto da degradação de uma substância é mais tóxico e mais persistente do que a substância original.

## IMPACTOS ANTRÓPICOS

As características químicas das águas subterrâneas refletem os meios por onde percolam, guardando uma estreita relação com os tipos de rochas drenados e com possíveis poluentes das atividades antrópicas adquiridos no decorrer de seu trajeto. Nas proximidades dos grandes centros urbanos há problemas associados às descargas de efluentes líquidos industriais e esgotos, vazamentos de depósitos de combustíveis, chorumes provenientes de depósitos de lixo doméstico, descargas gasosas e de material particulado lançado na atmosfera pelas indústrias e veículos. Nas áreas onde se desenvolve algum tipo de agricultura, a química da água pode estar fortemente influenciada pela aplicação de agrotóxicos, fertilizantes e corretivos de solo.

As principais atividades antrópicas que representam risco aos aquíferos e à qualidade das águas subterrâneas estão esquematizadas na Figura 61.

**Figura 61:** Desenho esquemático com as principais fontes de poluição antrópica das águas subterrâneas.



Fonte: Adaptado de BANCO MUNDIAL, 2002.

Em geral, aquíferos não confinados e pouco profundos e permeáveis são mais susceptíveis de sofrerem contaminação. A tendência de qualquer aquífero à contaminação depende de características mais amplas tais como:

- A distância da fonte poluidora.
- O tempo de residência da água na zona insaturada.
- A presença de argila e de matéria orgânica na matriz da zona insaturada.
- O potencial de decomposição e de biodegradação do contaminante ou da mistura de contaminantes.
- Velocidade de recarga e movimento dos contaminantes, que dependem das taxas de precipitação.
- Evapotranspiração.
- Propriedades do solo, incluindo textura e permeabilidade.

Dentre as atividades antrópicas que podem impactar a qualidade das águas subterrâneas destacam-se:

### Poços

Poços, tanto de extração, quanto de monitoramento, mal construídos ou abandonados constituem caminhos preferenciais para a contaminação dos aquíferos e, em alguns casos, praticamente, anulam a proteção natural oferecida pela zona insaturada do solo.

Critérios técnicos adequados na construção e na operação de poços são fundamentais para assegurar a qualidade da água captada e maximizar a eficiência da exploração do aquífero. Erros de perfuração de poços e localizações impróprias colocam em risco a qualidade das águas subterrâneas, quando se cria uma conexão entre águas mais rasas e, portanto, mais suscetíveis à contaminação, com águas mais profundas.

Entre os principais fatores construtivos dos poços tubulares que devem ser observados para reduzir o risco de contaminação das águas subterrâneas estão:

- Isolamento das camadas indesejáveis durante a perfuração, especialmente das rochas alteradas mais superficiais;
- Laje de proteção sanitária e altura inadequada da boca do poço;

- Distância em relação a pontos potencialmente contaminantes da água como fossas, postos de gasolina, lixões;
- Desinfecção do poço após a construção;
- Cimentação no espaço anelar entre o furo e o poço, que facilita a entrada de águas superficiais.

No caso mais específico dos poços rasos, que normalmente apresentam diâmetros maiores (de 1 a 2 m), além dos pontos anteriormente elencados, é importante também:

- Acabamento da parte superior para vedar o poço e proteger o aquífero;
- Colocação do revestimento interno do poço, que evita o desmoronamento das paredes da escavação, proporcionando a proteção de infiltrações superficiais e a limpeza.

Estas questões, dentre outras, são tratadas nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT):

- NBR 12212 - Projeto de poço tubular profundo para captação de água subterrânea.
- NBR 12244 - Construção de poço tubular profundo para captação de água subterrânea.
- NBR 13604/13605/13606/130607/13608, que dispõem sobre tubos de PVC para poços tubulares profundos.
- NBR 13895 – Poços de Monitoramento.

Além dos critérios técnicos a serem observados durante a construção e ao longo da operação, atenção deve ser dada ao tamponamento de poços abertos que serão desativados por qualquer razão.

O tamponamento de um poço deve ser feito por profissionais habilitados ou empresas qualificadas e de modo a melhor adaptá-lo às condições geológicas e hidrogeológicas locais, incluindo as etapas de:

1. Remoção de equipamentos de bombeamento, tubulações de recalque ou qualquer obstáculo (material desmoronado) que obstrua o poço;
2. Determinação do volume total do poço e da coluna d'água para cálculo do volume dos materiais necessários;
3. Determinação do método e dos materiais de tamponamento a serem empregados (em função do tipo de aquífero e do perfil construtivo do poço);
4. Remoção da primeira barra de revestimento, sempre que possível ou, caso o revestimento seja mantido, execução de cimentação sanitária adequada;
5. Desinfecção do poço;
6. Preenchimento do poço com o material de tamponamento selecionado - cimento, bentonita, brita ou outros materiais inertes - cuidadosamente para não causar obstruções e restabelecer as condições originais do aquífero.

### *Esgotos*

Apesar de avanços reconhecidos, o Brasil ainda é deficitário na drenagem e no tratamento dos esgotos. A cobertura da rede de esgotamento é de 50%, em média, e menos de um terço dos municípios tratam os esgotos, segundo dados do IBGE. Este quadro gera impacto na qualidade da água subterrânea, especialmente em áreas urbanas e de elevada densidade populacional. Tal impacto é decorrente da infiltração dos esgotos no solo, direta ou indiretamente (fossas negras, vazamento de redes de esgoto). De modo geral, aquíferos mais profundos, por estarem mais protegidos, são menos susceptíveis à contaminação por fossas e vazamentos de redes de esgoto.

O impacto do lançamento de esgotos sobre a qualidade das águas subterrâneas pode ser observado pelo aumento nas concentrações de nitrato e pela presença de bactérias patogênicas e vírus. Normalmente, a qualidade microbiológica é avaliada por meio da contagem de coliformes fecais e de estreptococos. Atualmente a espécie *Escherichia coli* é considerada o melhor indicador de contaminação fecal, visto que algumas espécies de bactérias do grupo dos coliformes fecais podem

não ter origem de fontes fecais. As principais enfermidades relacionadas à contaminação das águas subterrâneas por esgotos são causadas por agentes biológicos, particularmente bactérias e vírus causadores de doenças como a cólera, a febre tifóide e outras.

Além dos esgotos, devem ser considerados também os riscos associados ao lançamento no ambiente de efluentes líquidos industriais e de mineração.

### *Resíduos sólidos*

No Brasil, de 2010 a 2011, a geração de resíduos sólidos urbanos – RSU – cresceu (1,8%) duas vezes mais do que a população e estima-se que a geração seja de 61,9 milhões de toneladas/ano, enquanto que a amostragem é de 55,5 milhões de toneladas/ano. Portanto, 6,4 milhões de toneladas de RSU deixaram de ser coletadas no ano de 2011 e, por consequência, tiveram destino impróprio. Além disso, tanto a correta destinação destes resíduos – em aterros sanitários, quanto os programas de amostragem seletiva visando à reciclagem, não avançaram na mesma proporção. Dentre os resíduos coletados, estima-se que, em 2011, cerca de 40% deles não tiveram o destino adequado, ou seja, foram enviados a lixões (17,7%) ou destinados a aterros controlados (24,2%) (ABRELPE, 2011).

Do ponto de vista da preservação das águas subterrâneas, o aspecto mais importante é a questão do chorume produzido a partir do lixo. A decomposição anaeróbica da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos produz gases – sulfídrico, dióxido de carbono, metano, e mercaptano – e chorume. Este, um líquido escuro formado por compostos orgânicos e inorgânicos, que apresenta concentrações elevadas de matéria orgânica e de metais pesados (Ba, Cd, Cr, Ni, Pb, Hg, Ag), contamina as águas subterrâneas e fontes de água próximas, por percolação através do solo.

Os principais microorganismos encontrados nos resíduos sólidos urbanos são bactérias, fungos, protozoários, actinomicetos, algas e vírus. Em função da grande heterogeneidade do lixo e dos processos bioquímicos envolvidos, a inter-relação das populações microbianas é variável e complexa. Os metais pesados encontrados no chorume estão associados a sérios problemas à saúde tais como câncer, mutagenicidade, teratogenicidade ou toxicidade aguda.

Além dos RSU comuns, deve ser considerada também como fonte de poluição de aquíferos a disposição inadequada de resíduos de serviços de saúde e resíduos especiais.

### *Agricultura*

A agricultura, especialmente a intensiva, faz uso de quantidades consideráveis de fertilizantes (adubos/corretivos) e de agrotóxicos, os quais alteram as características e a composição natural do solo, sendo que estes compostos e seus metabólitos (derivados da biodegradação) podem atingir parcialmente as águas subterrâneas. A contaminação das águas subterrâneas pela agricultura ocorre de forma difusa, o que dificulta sua identificação e controle. O risco dos fertilizantes e agrotóxicos atingirem os mananciais hídricos subterrâneos pode ser determinado pelo transporte descendente, o qual é dependente de fatores climáticos, propriedades do solo, práticas de manejo das lavouras, profundidade do manancial e propriedades físico-químicas dos produtos aplicados. Uma preocupação adicional em relação à presença de agrotóxicos nas águas subterrâneas é a tendência à acumulação, uma vez que esse ambiente é considerado recalcitrante, isto é, não apresenta condições favoráveis à degradação das moléculas em função de baixas temperaturas, ausência de oxigênio, pouca atividade dos microorganismos e ausência de luminosidade. Soma-se a isso o fato dessas águas serem utilizadas para consumo humano, o que pode acarretar sérios problemas de saúde pública.

De acordo com o IBGE, o Brasil é o maior consumidor de agrotóxicos no cenário mundial e responde, na América Latina, por 86% destes produtos. Dentre eles, os mais utilizados no país são os herbicidas (58% do total), que apresentam elevada persistência, ou seja, são degradados mais lentamente que os demais. Monitoramento, em países europeus, mostrou contaminação de águas subterrâneas por herbicidas, após mais de uma década de proibição de seu uso.

Em relação aos fertilizantes, o país é, atualmente, o quarto maior consumidor de fertilizantes. O consumo, em 2010, foi de 24,6 milhões de toneladas, o equivalente a 6% do mercado mundial (CETEM, 2010). Os três principais nutrientes exigidos pelas culturas são o nitrogênio (N), potássio (K<sub>2</sub>O) e fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Entre estes elementos, o nitrogênio é aquele que apresenta maior impacto sobre a água subterrânea, ocorrendo principalmente na forma de nitrato. Este composto apresenta alta mobilidade na água subterrânea e é conservativo.

No Brasil, limites para agrotóxicos estão estabelecidos na Resolução do CONAMA nº 396/2008 e na Portaria do MS nº 2914/2011. Ambas contemplam 29 compostos ou misturas de agrotóxicos e os limites máximos variam com o composto. Na Comunidade Européia os padrões de potabilidade estabelecidos são mais gerais, sendo de 0,1 µg/L para cada agrotóxico individualmente e 0,5 µg/L para a soma de todos os agrotóxicos presentes, incluindo seus metabólitos.

O Brasil ainda carece de estudos de avaliação da presença e de quantificação de fertilizantes e de agrotóxicos em águas subterrâneas, especialmente em áreas de agricultura intensiva localizadas em zonas de recarga, mais susceptíveis.

Além da aplicação direta de agrotóxicos e de fertilizantes pela agricultura, devem ser consideradas também outras atividades agropecuárias que constituem fontes de poluição de aquíferos, tais como: lançamento de efluentes líquidos da atividade agropecuária intensiva (suinoculturas, por exemplo), lançamento de efluentes líquidos do beneficiamento de culturas como a cana-de-açúcar (vinhoto), arroz (efluentes da parboilização), café (resíduos e efluentes da lavagem), além da destinação inadequada de embalagens de agrotóxicos.

### *Indústria*

Normalmente os contaminantes produzidos pelas indústrias atingem os solos e rios, e posteriormente, dependendo das condições de vulnerabilidade do aquífero (tipo de solo, profundidade do nível de água, entre outros) podem atingir as águas subterrâneas.

Após a revolução industrial, os problemas ambientais se agravaram. O desenvolvimento que ela trouxe se contradiz com o atraso que causou ao meio ambiente. O crescimento exacerbado e descuidado com os aspectos ambientais, especialmente no século XX, fez com que a natureza fosse afetada em todos os sentidos:

- Extração dos recursos naturais para a fabricação dos produtos;
- O próprio processo de produção e seus impactos, emitindo materiais e gases no ambiente;
- Descarte dos produtos utilizados, sendo que alguns processos de decomposição podem levar muito tempo;
- O consumo e sua estimulação, que mantém o ciclo e amplia os impactos negativos.

Os resíduos e efluentes líquidos industriais apresentam grande variedade na composição dependendo do tipo da indústria (produtos) e das tecnologias de produção e, em casos específicos, podem apresentar elevadas concentrações de poluentes bastante agressivos ao meio ambiente e aos recursos hídricos. Dentre estes, estão incluídos resíduos perigosos e produtos químicos, a exemplo de:

- POPs – poluentes orgânicos persistentes: agrotóxicos como aldrina, clordano, DDT, dieldrina, endrina, heptacloro, mirex e toxafeno, PCBs, hexaclorobenzeno, dioxinas e furanos;
- Combustíveis líquidos;
- Solventes aromáticos;
- Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs);
- Metais – como mercúrio, cádmio e chumbo; e
- Solventes halogenados.
- Fenóis;
- Cianeto.

Além do lançamento de efluentes e da disposição de resíduos, a indústria pode gerar poluição que atinge solo, subsolo e a água subterrânea provocada por acidentes no armazenamento, no transporte ou na produção. Alguns compostos químicos apresentam elevada mobilidade e são pouco filtrados pelo solo, mesmo em condições favoráveis. Exemplos destes compostos são: nitratos, sais, atrazina (herbicida), gasolina, tricloroetileno (solvente), percloroetileno (produto de limpeza), dentre outros.

No caso de resíduos industriais, o gerenciamento cabe ao gerador. A situação agrava-se quando o descarte no solo não segue critérios adequados ambientalmente, e particularmente na fase de desativação de unidades industriais, em que se geram os chamados *brownfields* (termo que designa instalações industriais e comerciais abandonadas, ociosas ou subutilizadas, potencialmente contaminadas), podendo dar origem a passivos ambientais.

Embora existam cadastros estaduais de áreas contaminadas, o Brasil ainda carece de um mapeamento integrado e mais abrangente e de uma política para substâncias químicas, em geral. Em Minas Gerais, até 2011, o cadastro da FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente – apontou 490 áreas contaminadas, além de outras 472 suspeitas de contaminação. As indústrias são o segundo grupo que mais contamina no Estado, respondendo por 15% destas áreas, sendo que as principais atividades responsáveis são indústria metalúrgica e siderúrgica, petroquímica e química.

### *Armazenamento de combustíveis*

Os hidrocarbonetos que compõem o petróleo são amplamente utilizados na indústria e no transporte. A produção, manuseio e transporte de combustíveis envolvem o uso de tanques de armazenamento que são suscetíveis a vazamentos e acidentes e, assim, representam risco ambiental. No caso das águas subterrâneas, os riscos ampliam-se nos casos de tanques enterrados, caso de algumas bases e dos postos de combustíveis.

Em muitos países, o vazamento dos tanques de combustível é reconhecido como a principal fonte de contaminação da água subterrânea. Os hidrocarbonetos apresentam, dentre seus componentes, depressores do sistema nervoso central e carcinogênicos, como é o caso do benzeno.

Existem poucas informações, em nível nacional, acerca de diagnóstico da situação e de impactos por vazamentos de tanques sobre as águas subterrâneas. Todavia, sabe-se que o problema é significativo, especialmente nos ambientes urbanos, a partir de dados internacionais e de alguns Estados, no Brasil. Segundo a FEAM, em 2011, registrou-se 208 áreas de contaminação em postos de combustíveis, excluída a região metropolitana de Belo Horizonte, sendo que esta atividade é a que responde pelo maior percentual de áreas contaminadas no Estado, 71% do total. As bases de combustíveis são responsáveis por cerca de 3% das áreas contaminadas em Minas Gerais.

### *Mineração*

A mineração, em geral, impacta as águas subterrâneas quantitativa e qualitativamente. As principais lavras, como ferro, fosfato e manganês ocorrem abaixo do nível d'água. Portanto, para lavar, é feito um sistema de bombeamento de água do lençol freático, ou mesmo de aquíferos mais profundos, e esta operação de rebaixamento de nível d'água permanece ao longo do tempo em que a lavra se desenvolve. Dentre os impactos, além de alterações no regime hidrológicos dos aquíferos (fluxo e a quantidade natural das águas subterrâneas), o rebaixamento altera a qualidade das águas subterrâneas, quando, por exemplo, as águas ou uma parcela delas são usadas em operações de desmonte hidráulico, no beneficiamento ou no transporte do minério; quando há geração de drenagem ácida (decorrente da oxidação de sulfetos, anteriormente imersos em água, ao entrarem em contato com o oxigênio, e da solubilização de metais pesados), ou havendo bombeamento de águas salinas ou naturalmente fora dos padrões ambientais. Devem-se considerar acidentes que ponham em risco os aquíferos, tais como: vazamentos de combustíveis ou de redes de esgotamento sanitário, depósito de materiais perigosos, disposição de resíduos, e outros.

De modo geral, a qualidade das águas superficiais, na bacia e a jusante do empreendimento, pode ser prejudicada em razão do aumento da turbidez, provocada por sólidos em suspensão, e da contaminação por substâncias lixiviadas e carregadas ou contidas nos efluentes das áreas de mineração, tais como óleos e graxas, e metais pesados. Com exceção dos sedimentos, os demais poluentes das águas superficiais podem também atingir as águas subterrâneas.

Há ainda o problema de acidente com as barragens de contenção de rejeitos e, havendo rompimentos, as águas subterrâneas podem ser atingidas por poluentes presentes nas barragens. Deve ser destacado que, dependendo das características hidrogeológicas e das medidas adotadas durante a extração mineral, podem haver impactos de características mais regionais e também, em algumas situações, pode haver irreversibilidade, quando a degradação pode ser apenas minimizada, sem que se volte à condição inicial anterior à lavra.

Outro impacto que pode ocorrer é aquele resultante de desestabilização do terreno: por fragilidades naturais pode haver recalques, que danificam edificações ou submergem a fauna e a flora, ou por superexploração com zonas de depressão e afundamento no solo (a exemplo do acidente em Vazante – MG, na década de 90). Nestes casos, pode haver desaparecimento de lagoas, extinção de nascentes e comprometimento do abastecimento de água potável.

Dentre impactos já constatados no Brasil, podem ser citados: a exploração de carvão nos Estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, em que a percolação das águas pluviais nos rejeitos gerados nas atividades de lavra e beneficiamento atingiu os corpos hídricos superficiais e subterrâneos, resultando em redução do pH (menor que 3), altos valores de ferro total, sulfato total e outros elementos; e a degradação da qualidade da água subterrânea em Araxá (MG), por Bário e Cloreto.

### *Cemitérios*

Os cemitérios são considerados fontes potenciais de contaminação, devido à decomposição de cadáveres durante a qual há enorme proliferação de microorganismos, entre os quais podem estar presentes os responsáveis pela “causa mortis”, isto é, bactérias e vírus que transmitem doenças. Como exemplo tem-se a *Salmonella Typhi* agente causador da Febre Tifóide e os Enterovírus, transmissores da Hepatite Infecciosa e Meningite. Estes microorganismos podem atingir o aquífero freático livre, através dos líquidos - necrochorume, sendo que as águas pluviais são fatores preponderantes neste processo. A extração de águas subterrâneas a jusante das áreas dos cemitérios ou sob sua influência resulta em sérios riscos de saúde às populações que fizerem uso dessas águas.

Estudos mostram casos em que houve proliferação de bactérias heterotróficas e proteolíticas, e de clostrídios sulfitorredutores, além de aumento nas concentrações de sais minerais (bicarbonato, cloreto, sódio e cálcio), nitratos e nitrogenados, e de metais (ferro, alumínio, chumbo e zinco).

**CODEVASF**



**IGAM**

INSTITUTO MINEIRO  
DE GESTÃO DAS ÁGUAS



**GOVERNO  
DE MINAS**

MEIO AMBIENTE  
E DESENVOLVIMENTO  
SUSTENTÁVEL