



AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS

◀ Hidrogeologia dos Ambientes Cársticos da Bacia do  
São Francisco para a Gestão de Recursos Hídricos



Relatório Final  
Volume IV - Gestão Integrada de Recursos Hídricos  
TOMO 1 - Balanço Hídrico

**República Federativa do Brasil**

Michel Miguel Elias Temer Lulia

Presidente da República

**Ministério do Meio Ambiente**

Edson Duarte

Ministro

**Agência Nacional de Águas**

**Diretoria Colegiada**

Christianne Dias Ferreira - Diretora-Presidente

Ricardo Medeiros de Andrade

Ney Maranhão

Oscar de Moraes Cordeiro Netto

Marcelo Cruz

**Superintendência de Implementação de Programas e Projetos - SIP**

Tibério Magalhães Pinheiro

Victor Sucupira

**Coordenação de Águas Subterrâneas - COSUB**

Fernando Roberto de Oliveira (Coordenador)

Leonardo de Almeida (Gestor do Contrato)

Márcia Tereza Pantoja Gaspar

Adriana Niemeyer Pires Ferreira

Fabício Bueno da Fonseca Cardoso

Letícia Lemos de Moraes

---

***Hidrogeologia dos Ambientes Cársticos da Bacia do São Francisco para a  
Gestão de Recursos Hídricos***

---

***RELATÓRIO FINAL***

***VOLUME IV - GESTÃO INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS***

***TOMO 1 - BALANÇO HÍDRICO***

2018

© 2018 Agência Nacional de Águas – ANA  
Setor Policial, Área 5, Quadra 3, Blocos B, L, M, N, O e T  
CEP: 70610-200, Brasília – DF  
PABX: 2109-5400 / 2109-5252  
Endereço eletrônico: <http://www.ana.gov.br>

Capa:

Local da Foto: Gruta da Toca da Boa Vista, Campo Formoso, BA, sub-bacia do rio Salitre.

Fotografia – Rangel Carvalho

Equipe:

**Comissão Técnica de Acompanhamento e Fiscalização – CTAF:**

Leonardo de Almeida (ANA)	Márcia Tereza Pantoja Gaspar (ANA)
Zoltan Romero C. Rodrigues (SEMA-BA)	Maricene Menezes de O. M. Paixão (IGAM – MG)

**Elaboração e Execução - Consórcio TPF/TECHNE**

**Direção Geral e Coordenação do Contrato**

João Guimarães Recena – Direção Geral  
Luiz Alberto Teixeira – Direção Geral  
Antônio Carlos de Almeida Vidon – Direção Geral  
Maria Ângela Capdeville Duarte Ulmann – Direção Geral  
Fábio Chaffin Barbosa – Direção Geral  
Roberta de Mello Guedes Alcoforado - Coordenação Geral do Contrato  
Marcelo Casiuch – Coordenação Adjunta do Contrato

**Membros da Equipe Chave**

Edilton Feitosa – Coordenação Técnica  
João Manoel Filho – Coordenação Técnica Adjunta  
Natalina Maria Tinôco Cabral – Hidrogeoquímica  
Paula Stein – Hidrogeoquímica  
Paulo Fernando P. Pessoa – Geólogo especialista em Carste

**Membros da Equipe Técnica Executora**

Alerson Falieri Suarez	Gustavo Grillo	Paulo de M. da Cunha Pedrosa
Alípio Agra	Gustavo Sobral	Rinaldo Fernandes
Ana Nery Cadete	Joanderson J. O. Morais	Sandro Barbosa Figueira
Bruno Marcionilo	José Augusto Vieira Filho	Thiago Franklin S. de Almeida
Daniel Quintino	Ludmilla de Oliveira Calado	Vanessa Costa
Dora Atman	Marcondes Assis	Walter Lucena
Fabianny Bezerra	Marcos A. Barbosa S. Jr.	Bruna Duarte (estagiária)
Flávia Azevedo Pedrosa	Mário Nascimento S. Filho	Gadadhara Figueiredo (estagiária)
Ginaldo A. da Cruz Campanha	Nelson da Franca dos Anjos	Geraldo M. Junior (estagiário)
Giseli Kimura	Patrícia Celeste L. Jesuíno	

Todos os direitos reservados

É permitida a reprodução de dados e de informações, desde que citada à fonte.

**A265h** Agência Nacional de Águas (Brasil).  
Hidrogeologia dos ambientes cársticos da Bacia do São Francisco para a Gestão de Recursos Hídricos. Relatório Final – Volume IV – Gestão Integrada de Recursos Hídricos / Tomo 1 – Balanço Hídrico / Agência Nacional de Águas; Elaboração e Execução: Consórcio TPF - Techne. - Brasília: ANA, 2018.  
204p.  
1. Hidrogeologia. 2. Bacias Hidrográficas. 3. São Francisco, Rio  
I. Título.

**CDU 556.51**

## APRESENTAÇÃO

O Relatório Final da “*Hidrogeologia dos Ambientes Cársticos da Bacia do Rio São Francisco para a Gestão de Recursos Hídricos*” apresenta os resultados dos trabalhos desenvolvidos no âmbito do Contrato nº 037/ANA/2013, adjudicado pela Agência Nacional de Águas – ANA – ao Consórcio TPF / Techne, em agosto de 2014.

Consolida os estudos realizados, apresentados em oito Relatórios Parciais, além de algumas notas técnicas, elaborados de acordo com o Termo de Referência elaborado pela Agência Nacional de Águas.

Tais estudos tem como objetivo a geração de conhecimento hidrogeológico sobre os Sistemas Aquíferos Cársticos e Físsuro-Cársticos da região hidrográfica do São Francisco, suas relações com o Sistema Aquífero Urucuia e suas contribuições para o fluxo de base do rio São Francisco. Os estudos subsidiaram a elaboração de uma Proposta de Plano de Gestão Integrada e Compartilhada dos Recursos Hídricos Superficiais e Subterrâneos da Região Hidrográfica do São Francisco.

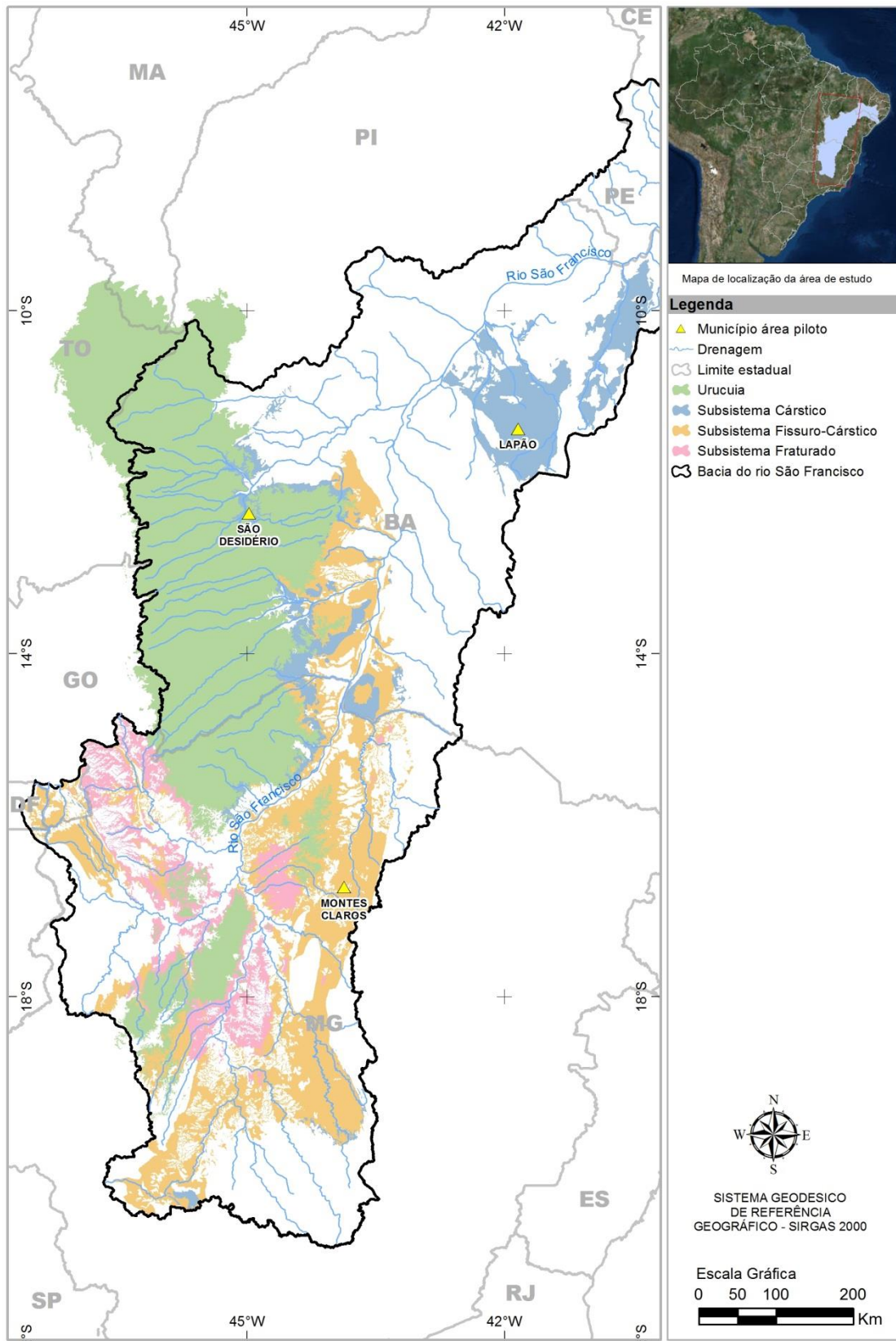
Os Sistemas Aquíferos Cársticos e Físsuro-Cársticos abordados no presente estudo apresentam uma área de exposição de 110.951,4 km<sup>2</sup>. Nessa área foi dada ênfase a 3 pilotos localizados nas bacias do Rio do Vieira (Montes Claros/MG), Rio São Desidério (São Desidério/BA) e Riacho do Juá (Lapão/BA) (Figura 1).

O Relatório Final é estruturado em quatro volumes e um Resumo Executivo, conforme mostrado a seguir.

- Volume I – Diagnóstico dos Meios Físico e Socioeconômico
- Volume II - Hidrogeologia
- Volume III – Áreas Piloto
  - Tomos 1 – Área Piloto do rio São Desidério/BA
  - Tomos 2 - Área Piloto do rio do Vieira/MG
  - Tomos 3 - Área Piloto do riacho do Juá/BA
- Volume IV – Gestão Integrada de Recursos Hídricos
  - Tomos 1 – Balanço Hídrico
  - Tomos 2 – Cenários e Propostas de Gestão
- Resumo Executivo

E ainda três Relatórios Técnicos Temáticos:

- Relatório Técnico Temático de Hidroquímica
- Relatório Técnico Temático dos Domínios e Subdomínios Hidrogeológicos
- Relatório Técnico Temático de Cartografia/SIG



**Figura 1: Área de estudo, destacando os sistemas cársticos e fissuro cársticos, e as Áreas Piloto**

Os estudos envolveram trabalhos de campo e de escritório cujos detalhamentos são apresentados e discutidos nos volumes e tomos indicados.

Os trabalhos de campo consistiram de cadastramento de pontos d'água e de fontes de contaminação, sendo cadastrados 351 novos poços. Foram realizadas duas campanhas de medição de níveis e de coleta de água para estudos hidroquímicos, 203 poços amostrados no período seco entre agosto e setembro de 2014, e 206 poços no período chuvoso entre março e abril de 2015. Nas áreas Piloto foram realizados mapeamento geológico, estudos geofísicos, ensaios de traçadores (com Rodamina WT e Fluoresceína), testes de aquífero. Para os estudos geofísicos utilizou-se o método gravimétrico e da eletrorresistividade (sondagens elétricas verticais e caminhamentos elétricos). Em alguns poços selecionados realizou-se perfilagem ótica e geofísicas.

Os trabalhos de escritório consistiram nas interpretações de dados obtidos com a formatação de banco de dados com mais de 20.000 poços tubulares, elaboração de relatórios e geoprocessamento, secundados por programações, elaboração de notas técnicas e participação em cerca de 22 reuniões de trabalho ocorridas nas cidades de Recife, Brasília, Belo Horizonte, Montes Claros, Salvador e Juazeiro, em conjunto com a CTAF - Comissão Técnica de Acompanhamento e Fiscalização – CTAF, composta por técnicos, representantes indicados pelos estados abrangidos pelos estudos (Minas Gerais e Bahia). A CTAF procedeu o acompanhamento e avaliação de todas as fases dos estudos, juntamente com representantes da ANA.

Os conhecimentos obtidos subsidiaram a elaboração de uma proposta de Plano de Gestão Integrada e Compartilhada das Águas Superficiais e Subterrâneas da Região Hidrográfica do São Francisco, que pretende contribuir ao manejo adequado dos recursos hídricos dos estados de Minas Gerais e Bahia.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2. A BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO – ASPECTOS HIDROGRÁFICOS, GEOTECTÔNICOS E HIDROGEOLÓGICOS .....</b>	<b>18</b>
2.1 ATRIBUTOS FUNDAMENTAIS.....	24
2.1.1 Hidrografia e limites da bacia .....	24
2.1.2 Regiões climáticas e pluviometria da bacia do rio São Francisco .....	33
2.1.3 Geologia e o contexto hidrogeológico da Bacia .....	41
2.2 O CARSTE NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO .....	59
2.3 BALANÇO HÍDRICO .....	78
2.3.1 Balanço Hídrico no Domínio Isoietal I .....	84
2.3.2 Balanço Hídrico no Domínio Isoietal II .....	90
2.3.3 Balanço Hídrico no Domínio Isoietal III .....	98
2.3.4 Análise Comparativa entre os Domínios .....	105
2.3.5 Escoamento subterrâneo calculado x vazões de permanência e de referência.....	109
<b>3. PROPOSTA DE DIVISÃO EM UNIDADES DE GESTÃO DAS ÁGUAS - UGAS .....</b>	<b>118</b>
3.1 UGA 1 – RIO SÃO FRANCISCO .....	124
3.2 UGA 2 – RIO PARAOPEBA.....	131
3.3 UGA 3 – RIO DAS VELHAS .....	136
3.4 UGA 4 – RIO PARACATU.....	141
3.5 UGA 5 – BAIXO VELHAS – VERDE GRANDE.....	146
3.6 UGA 6 – RIO URUCUIA .....	151
3.7 UGA 7 – MARGEM ESQUERDA SF .....	155
3.8 UGA 8 – MARGEM DIREITA SF.....	159
3.9 UGA 9 – CHAPADÃO URUCUIA .....	163
3.10 UGA 10 – IRECÊ .....	169
<b>4. CONTRIBUIÇÃO SUBTERRÂNEA DOS CALCÁRIOS PARA OS RIOS – ANÁLISE DA DESCARGA SUBTERRÂNEA ESPECÍFICA .....</b>	<b>173</b>
4.1 UGA 1 – RIO SÃO FRANCISCO .....	184
4.2 UGA 2 – PARAOPEBA .....	184
4.3 UGA 3 – RIO DAS VELHAS .....	186
4.4 UGA 4 – RIO PARACATU.....	186
4.5 UGA 5 – BAIXO VELHAS – VERDE GRANDE.....	188
4.6 UGA 6 – RIO URUCUIA .....	188
4.7 UGA 7 – MARGEM ESQUERDA SF .....	188
4.8 UGA 8 – MARGEM DIREITA SF.....	189
4.9 UGA 9 – CHAPADÃO URUCUIA .....	189



4.10	UGA 10 – IRECÊ .....	189
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	190
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	200

**ANEXO I - HIDROGRAMAS DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DA UGA 1- RIO SÃO FRANCISCO**

**ANEXO II - HIDROGRAMAS DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DA UGA 2- PARAOPEBA**

**ANEXO III - HIDROGRAMAS DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DA UGA 3- RIO DAS VELHAS**

**ANEXO IV - HIDROGRAMAS DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DA UGA 4- PARACATU**

**ANEXO V - HIDROGRAMAS DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DA UGA 5- BAIXO VELHAS/VERDE GRANDE**

**ANEXO VI - HIDROGRAMAS DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DA UGA 6- RIO URUCUIA**

**ANEXO VII - HIDROGRAMAS DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DA UGA 7- MARGEM ESQUERDA**

**ANEXO VIII - HIDROGRAMAS DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DA UGA 8- CHAPADÃO URUCUIA**

**ANEXO IX - HIDROGRAMAS DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DA UGA 9- IRECÊ**

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Bloco diagrama esquemático ilustrativo da dinâmica hídrica na bacia do Rio São Francisco na porção norte de Minas Gerais. ....	22
Figura 2.2 - Sub-bacias da região hidrográfica do rio São Francisco. Fonte: CBHSF (2016). ....	25
Figura 2.3 - Modelo Digital de Elevação da bacia do rio São Francisco e as unidades de relevo que a delimitam. Fonte: SRTM, resolução 30 m, EMBRAPA. Disponível em: <a href="https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr/download/">https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr/download/</a> .....	28
Figura 2.4 - Perfis topográficos nas bordas da bacia do rio São Francisco, na região da Serra da Canastra e na região do Chapadão Urucuia.....	31
Figura 2.5 - Domínios Isoietais na bacia do rio São Francisco. Base de dados: registros pluviométricos das estações selecionadas no cadastro do Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas. Disponível em: < <a href="http://www.snirh.gov.br/hidroweb/">http://www.snirh.gov.br/hidroweb/</a> >.....	38
Figura 2.6 - Média histórica mensal de pluviosidade nos Domínios Isoietais I, II e III. Base de dados: Hidroweb. Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas. ....	39
Figura 2.7 - Principais unidades geológicas que configuram o espaço geográfico da bacia do rio São Francisco (CPRM/CBPM, 2003). ....	44
Figura 2.8 - Tipologias aquíferas .....	46
Figura 2.9 - Tipologias aquíferas na área de interesse ao estudo dos sistemas hidrogeológicos cársticos e cárstico-fissural na bacia do rio São Francisco (Base geológica: Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, CPRM) .....	48
Figura 2.10 - Domínio I - Vazante .....	66
Figura 2.11 - Domínio II – Grupo Bambuí Deformado Oeste .....	68
Figura 2.12 - Domínio III – Grupo Bambuí indeformado a parcialmente deformado ..	70
Figura 2.13 - Domínio IV– Grupo Bambuí indeformado a parcialmente deformado ..	72
Figura 2.14 - Bacia de Irecê Sul .....	75
Figura 2.15 - Bacia de Irecê Norte.....	76
Figura 2.16 - Bacia Salitre .....	77
Figura 2.17 - Resultado do balanço hídrico por bacia dado em mm/ano .....	83
Figura 2.18 - Domínio Isoietal I.....	85
Figura 2.19 - Escoamento superficial, escoamento subterrâneo e vazão total obtidos	

a partir dos hidrogramas das estações situadas no Domínio Isoietal I .....	87
Figura 2.20 - Vazão específica total e descarga subterrânea específica por bacia no Domínio Isoietal I.....	87
Figura 2.21 - Balanço Hídrico no Domínio Isoietal I .....	89
Figura 2.22 - Domínio Isoietal II.....	91
Figura 2.23 - escoamento superficial, escoamento subterrâneo e vazão total obtidos a partir dos hidrogramas das 40 estações situadas no Domínio Isoietal II .....	93
Figura 2.24 - Descarga subterrânea específica e vazão total específica por bacia no Domínio Isoietal II .....	94
Figura 2.25 - Balanço hídrico no Domínio Isoietal II .....	96
Figura 2.26 - Domínio Isoietal III.....	102
Figura 2.27 - escoamento superficial, escoamento subterrâneo e vazão total obtidos a partir dos hidrogramas das três estações situadas no Domínio Isoietal III .....	103
Figura 2.28 - Descarga subterrânea específica e vazão específica total por bacia no Domínio Isoietal III .....	103
Figura 2.29 - Balanço Hídrico completo no Domínio Isoietal III .....	104
Figura 2.30 - Vazão total, escoamento superficial e subterrâneo nos Domínios Isoietais I, II e III .....	106
Figura 2.31 - Vazão total específica e descarga subterrânea específica nos Domínios Isoietais I, II e III .....	106
Figura 2.32 - Parcelas do Balanço Hídrico nos Domínios Isoietais I, II e III dadas em percentual, tendo como comparação os valores médios históricos de chuva .....	108
Figura 2.33 - Gráfico box-plot com a relação percentual entre os valores de Q50, Q90, Q7 e Q7,10 e o escoamento subterrâneo.....	114
Figura 2.34 - Gráfico comparativo dos valores de vazão do escoamento subterrâneo e as vazões de referência Q50, Q90, Q7 e Q7,10 de cada bacia avaliada. ....	116
Figura 2.35 - Gráfico box plot com a relação percentual entre Q50 e o valor do escoamento subterrâneo.....	117
Figura 3.1 - UGAs – Unidades de gestão das águas na bacia do rio São Francisco .....	120
Figura 3.2 - UGA 1 – Rio São Francisco .....	127
Figura 3.3 - Dados do balanço hídrico e principais litologias nas estações localizadas dentro da UGA 1 – Rio São Francisco .....	128
Figura 3.4 - UGA 2 – Paraopeba .....	133

Figura 3.5 - Dados do balanço hídrico e principais litologias nas estações localizadas dentro da UGA 2 – Paraopeba .....	134
Figura 3.6 - UGA 3 – Rio das Velhas .....	139
Figura 3.7 - Dados do balanço hídrico e principais litologias nas estações localizadas dentro da UGA 3 – Rio das Velhas.....	140
Figura 3.8 - UGA 4 – Rio Paracatu.....	144
Figura 3.9 - Dados do balanço hídrico e principais litologias nas estações localizadas dentro da UGA 4 – Rio Paracatu .....	145
Figura 3.10 - UGA 5 – Baixo Velhas – Verde Grande .....	149
Figura 3.11 - Dados do balanço hídrico e principais litologias nas estações localizadas dentro da UGA 5 – Baixo Velhas – Verde Grande.....	150
Figura 3.12 - UGA 6 – Rio Urucuia.....	153
Figura 3.13 - Dados do balanço hídrico e principais litologias nas estações localizadas dentro da UGA 6 – Rio Urucuia .....	154
Figura 3.14 - UGA 7 – Margem Esquerda .....	157
Figura 3.15 - Dados do balanço hídrico e principais litologias nas estações localizadas dentro da UGA 7 – Margem Esquerda.....	158
Figura 3.16 - UGA 8 – Margem Direita .....	162
Figura 3.17 - UGA 9 – Chapadão Urucuia.....	167
Figura 3.18 - Dados do balanço hídrico e principais litologias nas estações localizadas dentro da UGA 9 – Chapadão Urucuia .....	168
Figura 3.19 - UGA 10 – Irecê.....	171
Figura 3.20 - Dados do balanço hídrico e principais litologias nas estações localizadas dentro da UGA 10- Irecê.....	172
Figura 4.1 - Distribuição de calcários que configuram aquíferos cársticos e fissuro-cársticos na bacia do rio São Francisco. ....	174
Figura 4.2 - Porosidade efetiva (Pe) calibrada para os litotipos carbonáticos na bacia do rio São Francisco.....	177
Figura 4.3 - Descarga subterrânea específica média dos litotipos carbonáticos na bacia do rio São Francisco .....	180
Figura 4.4 - Descarga subterrânea específica média das sub-bacias estudadas e os valores de precipitação e evapotranspiração médios.....	183
Figura 4.5 - Área e média da porosidade efetiva para fluxo dos litotipos carbonáticos aflorantes nas UGAs - Unidade de Gestão das Águas na bacia do rio São Francisco	

.....	185
Figura 4.6 - Descarga subterrânea específica e descarga subterrânea média dos litotipos carbonáticos aflorantes nas UGAs - Unidade de Gestão das Águas na bacia do rio São Francisco.....	187
Figura 5.1 - Mapa de descarga subterrânea específica média na bacia do rio São Francisco.....	192
Figura 5.2 - Contribuição subterrânea estimada das UGAs. ....	199

## ÍNDICE DE TABELA

Tabela 2.1 - Características morfológicas das regiões fisiográficas da bacia do rio São Francisco. Fonte: CBHSF (2004).....	26
Tabela 2.2 - Estações pluviométricas utilizadas para o cálculo das médias históricas mensais nos Domínios Isoietais I, II e III .....	40
Tabela 2.3 - Resultados do cálculo do balanço hídrico para as bacias selecionadas. Valores dados em mm/ano e % anual.....	82
Tabela 2.4 - Parcelas do balanço hídrico no Domínio Isoietal I.....	86
Tabela 2.5 - Parcelas do balanço hídrico no Domínio Isoietal II.....	92
Tabela 2.6 - Parcelas do balanço hídrico no Domínio Isoietal III.....	101
Tabela 2.7 - Resultado das vazões de referência para cada estação fluviométrica. ....	110
Tabela 2.10 - Estatística descritiva dos valores amostrais de $Q_{50}$ , $Q_{90}$ , $Q_7$ e $Q_{7,10}$ ..	115
Tabela 2.11 - Estatística descritiva dos valores amostrais de $Q_{50}$ inferiores e superiores ao escoamento subterrâneo .....	117
Tabela 3.1 - Classificação das zonas de recarga utilizando os critérios geologia, altimetria e porosidade efetiva para fluxo. ....	122
Tabela 4.1 - Litotipos carbonáticos presentes na área de estudo (Parte marrom da tabela incompleta, cárstico/fissuro-cárstico) .....	175

## **1. INTRODUÇÃO**

Na região hidrográfica do rio São Francisco uma ampla superfície é constituída por rochas carbonáticas que configuram importantes reservatórios subterrâneos de água. Dadas as suas propriedades naturais e seu papel como recurso estratégico para abastecimento rural e urbano na bacia, os aquíferos cársticos tem ganhado destaque nos estudos para consolidação dos programas de gestão dos recursos hídricos. Dentre os diversos aspectos de interesse aos estudos que dão subsídios à gestão, estão a determinação dos valores de recarga dos aquíferos e a delimitação no espaço geográfico das áreas que efetivamente contribuem para os fluxos hídricos superficiais.

Conhecer os volumes de armazenamento da água em seus distintos reservatórios e os processos que comandam a transferência hídrica no meio natural representa o desafio de integrar o conhecimento produzido para a caracterização do clima, do espaço geográfico, da constituição do subsolo e das distintas propriedades hidráulicas das rochas e das coberturas sedimentares.

Um sistema hidrogeodinâmico das dimensões da bacia do rio São Francisco revela através de suas características hidrográficas e morfológicas uma multiplicidade de interações entre a dinâmica das chuvas (e demais variáveis climáticas) e os maciços rochosos de propriedades distintas que compõem a superfície e a subsuperfície da bacia.

Dados históricos de precipitação pluviométrica e das descargas líquidas em seções fluviais específicas foram analisados para quantificar as parcelas que compõem o ciclo hidrológico nos terrenos onde estão constituídos os sistemas cársticos e físsuro-cársticos e os demais sistemas hidrogeológicos vizinhos. Os dados hidrológicos foram associados à caracterização hidrogeológica e morfoestrutural, possibilitando o entendimento da bacia do rio São Francisco como um conjunto de interações hidráulicas, onde é possível definir setores hidrogeologicamente homogêneos e ao mesmo tempo distintos entre si, e que expressam potencialidades e restrições próprias que devem ser compreendidos para o sucesso da gestão dos recursos hídricos.

Esse conhecimento é fundamental para a gestão de recursos hídricos, tendo em vista que os aquíferos existentes nos ambientes de rochas carbonáticas apresentam-se ao longo da bacia do São Francisco, não raras vezes, como a única forma de exploração

de água para todos os tipos de abastecimento: público, industrial e rural. Os sistemas de abastecimento são constituídos, predominantemente, por vários poços tubulares profundos, ou mesmo, por captações em nascentes ou em surgências cársticas.

No entanto, o crescimento populacional e as formas de uso e ocupação inadequadas elevam o grau de incerteza sobre o que os efeitos ao atendimento desta demanda, em escala regional, representam em termos de comprometimento ao equilíbrio do sistema hídrico cárstico, refletindo os principais motivos de se levantar dados qualitativos e quantitativos que possam auxiliar no entendimento da dinâmica hídrica subterrânea, ressaltando-se suas características peculiares de escoamento por condutos de dissolução do material carbonático e a sua intrínseca vulnerabilidade natural (Pessoa, 1996).

Estudos realizados em várias regiões do mundo (RAUCH & WHITE, 1977; PALMER, 1991; LIU & DREYBRODT, 1997) revelam que os calcários que melhor desenvolvem zonas carstificadas exibem composição superior a 70% de  $\text{CaCO}_3$ , tal como se observa nos calcários dos Grupos Bambuí, em Minas Gerais e Goiás (Pessoa, 2005), e do Grupo Una, na Bahia. Apesar de certas similaridades ao longo da evolução geotectônica dessas unidades, as características do carste são diferentes, bem como a capacidade de produção de água e as relações de conexão hidráulica com sistemas vizinhos.

A estimativa do potencial hídrico dos aquíferos cársticos envolve técnicas específicas e uma construção detalhada do modelo conceitual do sistema em questão. Dada à heterogeneidade dos maciços e as formas de recarga e descargas pontuais, a quantificação da água que circula em um ambiente cárstico é extremamente difícil, e pode variar muito ao longo de setores dentro de um mesmo maciço carbonático.

Por outro lado, existem alguns fatores importantes para o regime dos fluxos hídricos no carste que são claros e passíveis de análise em uma escala regional, como o aporte de chuvas, existência de gradiente hidráulico, possibilidade de interação entre unidades hidrogeologicamente distintas. Desse modo, em uma primeira análise, a dinâmica hídrica nos maciços carbonáticos pode ser bem compreendida quando esses atributos são analisados em um contorno maior, que envolve rochas em um contexto geológico-estrutural e morfológico semelhante.



Assim, tendo em vista a complexidade do carste e o caráter regional desse estudo, os esforços de quantificação das parcelas hídricas e espacialização das recargas visando à gestão dos recursos hídricos foram desenvolvidos com três enfoques distintos:

**Bacia do rio São Francisco** – definida como limite da área de estudo regional, incluindo para a caracterização de seus atributos físicos as unidades morfológicas que configuram suas bordas.

**Domínio de estudo dos sistemas hidrogeológicos cársticos e cárstico-fissurais** – consiste nos terrenos que englobam unidades carbonáticas onde se configuram sistemas hidrogeológicos com porosidade cárstica e cárstico-fissural.

**Unidades de Gestão das Águas – UGAs** - unidades de estudo regional, definidas em áreas que compartilham similaridades climáticas, morfológicas e geotectônicas, como compartimentos que incluem sistemas hidrogeológicos cársticos e fissuro-cársticos e sistemas não cársticos vizinhos.

## **2. A BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO – ASPECTOS HIDROGRÁFICOS, GEOTECTÔNICOS E HIDROGEOLOGÍCOS**

Inicialmente, é importante ressaltar que embora a bacia hidrográfica tenha sido tomada como unidade de gestão das águas, é reconhecido que esse limite não pode ser sempre adotado como referência para se compreender a dinâmica hídrica e o potencial de recarga subterrânea dos sistemas aquíferos, uma vez que as rochas transmissoras de água podem situar-se em domínios subterrâneos que ultrapassam aos divisores topográficos que definem a bacia hidrográfica.

Essa discussão é extremamente válida para os aquíferos cársticos, que dificilmente têm seus limites hidrogeológicos vinculados às irregularidades do relevo que marcam as bacias hidrológicas. Assim, a bacia será analisada além de seus limites hidrográficos, tendo em vista a importante interação hídrica existente com os ambientes adjacentes.

O conhecimento do armazenamento da água em seus distintos reservatórios e os processos que comandam a transferência hídrica no meio natural representa o desafio de integrar o conhecimento produzido para a caracterização do clima, do espaço geográfico, da constituição do subsolo e das distintas propriedades hidráulicas das rochas e dos solos. Na análise da dinâmica da água em um sistema hidrogeodinâmico das dimensões da bacia do rio São Francisco é ainda mais importante compreender as diferenças naturais que regulam o volume hídrico dos reservatórios dentro da bacia. Essas diferenças naturais se manifestam na própria distribuição das parcelas hídricas no meio em estudo, tendo em vista o movimento contínuo da água no ciclo hidrológico.

Considerando o ciclo hidrológico em grande escala, a água se move para a atmosfera pelo aquecimento dos oceanos pela constante exposição das águas à radiação solar. O vapor d'água é transportado pelos ventos em grandes massas de ar que chegam aos continentes. As águas condensadas na atmosfera precipitam e interagem com a superfície, sendo parte interceptada e absorvida pela vegetação e aproveitada pelas diferentes formas de vida, parte retornada pela evapotranspiração, e parte dirigida aos reservatórios superficiais (rios e lagos). A parcela que infiltra e flui pelos vazios dos solos e rochas é dirigida aos reservatórios subterrâneos. Finalmente, as águas retornam aos oceanos pelos sistemas fluviais e pelo aporte das águas subterrâneas em longos e vagarosos ciclos. A energia do sol e a energia gravitacional permitem o

movimento da água, criando ao longo do ciclo hidrológico os grandes reservatórios: atmosférico, oceânico, lacustre, fluvial e subterrâneo.

Os sistemas fluviais são responsáveis pela devolução ao oceano de parte das águas precipitadas nos continentes e também são os grandes responsáveis pelo aporte de sedimentos que chegam aos mares. A quantidade de água e o volume de sedimentos transportados pelos rios dependem do aporte pluviométrico e das características físicas de toda a área da bacia hidrográfica, como relevo, declividade, vegetação, constituição dos solos e do substrato rochoso.

Nesse contexto, as águas subterrâneas têm um fluxo mais lento quando comparado aos fluxos superficiais. Devido à porosidade e permeabilidade dos solos e rochas, a água é parcialmente retida por forças capilares, diminuindo a velocidade de retorno para as águas continentais de superfície e para os oceanos, fluxo que se processa em um período de tempo muito mais longo do que o fluxo de retorno das águas fluviais. A velocidade desse processo relaciona-se diretamente à capacidade de infiltração dos solos e ao gradiente hidráulico no aquífero, já que as águas se movem lentamente no sistema de poros, fraturas e/ou condutos saturados do maciço rochoso. De modo geral, esse movimento é anisotrópico e heterogêneo, sujeito à força gravitacional, na maior parte dos trechos.

As rotas de fluxos subterrâneos com percursos menores têm papel extremamente importante no sistema fluvial, uma vez que muitos rios, assim como o rio São Francisco, recebem em suas calhas um montante de água subterrânea significativo. A descarga subterrânea, em muitos casos, mantém a perenidade dos rios, mesmo em zonas climáticas de aporte pluviométrico reduzido, fazendo com que mesmo nos períodos de estiagem as principais calhas fluviais permaneçam ativas.

Todo o ciclo hidrológico em nível continental pode ser entendido como o resultado da dispersão das parcelas do ciclo hidrológico em sistemas menores interligados ao longo do tempo e do espaço. Por seu caráter dinâmico, os ganhos e perdas nos reservatórios hídricos variam muito ao longo da história da bacia, já que dependem primariamente das variações climáticas.

O balanço hídrico decorre das variações sazonais dos volumes de água contidos em suas parcelas integrantes, distribuídas espacialmente de acordo com as condições

geográficas e climáticas preponderantes no globo terrestre. Contudo, existem grandes diferenças entre as condições em que se encontram armazenados e disponibilizados os volumes de água doce: as águas subterrâneas do subsolo e as águas superficiais nos rios e lagos.

Considerando-se que os volumes de água doce (96%) se encontram majoritariamente armazenados abaixo do nível do solo, o desafio maior a ser vencido recai exatamente na busca do entendimento acerca dos princípios que regem o controle de integração entre os volumes precipitados, escoados e infiltrados num dado ambiente. Ressaltam-se as formas de interconexão hidráulica dos sistemas aquíferos, a sua capacidade intrínseca de armazenamento, bem como os atributos responsáveis pela maior ou menor condutividade hidráulica.

A evolução geomorfológica dos terrenos, com a formação dos divisores topográficos e aprofundamento das calhas das drenagens, além de depender dos parâmetros temperatura e pluviometria, relaciona-se também aos eventos geológicos pretéritos que moldaram o substrato rochoso e suas descontinuidades. Sobre esse substrato diverso, as águas precipitadas participam dos processos de denudação e construção do relevo, formando as bacias hidrográficas e os reservatórios subterrâneos.

Os diversos terrenos geológicos são moldados de forma distinta pelos agentes intempéricos, dependendo das fragilidades químicas e estruturais que os caracterizam. Na medida em que as rochas são expostas e os processos intempéricos se intensificam, inicia-se o desenvolvimento do perfil de solo e da modificação da porosidade e permeabilidade dos maciços. As rochas com diferentes tipos de porosidade (granular, fissural e cárstico) configuram os reservatórios subterrâneos, que podem apresentar alta capacidade de armazenamento e transmissão de água ou mesmo funcionar como barreiras ao fluxo hídrico.

Interessante ressaltar que ao longo do tempo geológico desenvolvem-se rotas de fluxos subterrâneos que interconectam rochas de distintas porosidades e propriedades hidráulicas, formando zonas saturadas heterogêneas, mas contíguas nos maciços. Essas rotas não ocorrem necessariamente dentro de um limite de uma bacia hidrográfica, mas dependem da geometria das conexões, do posicionamento dessas conexões em um contexto topográfico que manifeste um gradiente hidráulico e, principalmente, do aporte pluviométrico em um substrato que permita a recarga efetiva.

Portanto, para analisar a dinâmica das águas e a sua capacidade de produção dentro da bacia do rio São Francisco, por exemplo, faz-se necessário compreender sua configuração natural (pluviometria, relevo, rede de drenagem, rochas e suas propriedades hidráulicas), em seu interior como no entorno da bacia.

A Figura 2.1 é um desenho esquemático mostrando a dinâmica hídrica na bacia do rio São Francisco na região norte de Minas Gerais, onde na porção oeste o contexto hidrogeológico inclui o Sistema Aquífero Urucuia aflorante e sobrejacente aos Sistemas Aquíferos Cársticos. Na Figura representa-se o movimento da água entre os reservatórios superficiais e subterrâneos.

Parte das águas que precipitam sobre a bacia retorna à atmosfera pela evapotranspiração. As águas restantes abastecem as calhas fluviais, através do escoamento superficial, e os aquíferos por meio da infiltração nos solos.

O Sistema Aquífero Urucuia e o Bambuí contribuem para a manutenção do fluxo na calha do Rio São Francisco, a partir da contribuição indiretas dos afluentes como diretamente por linhas fluxos subterrâneos mais regionais. Apesar de ser uma seção geológica hipotética, estão representados elementos geológicos que, de fato, contribuem para a complexidade dos fluxos subterrâneos em grande parte dos aquíferos cársticos e cárstico-fissurais na bacia do Rio São Francisco. Dentre esses elementos podem ser destacadas as variações composicionais das rochas aquíferas, espessura da seção aquífera, diferentes níveis de carstificação nos calcários, presença das coberturas granulares e espessura variável dessas coberturas.

Nesse edifício geológico heterogêneo as águas infiltram e podem seguir caminhos distintos. Existem fluxos superficiais, intermediários e profundos, que desaguam em pontos específicos dependendo do entalhamento do relevo, do gradiente hidráulico e das variações geológicas que podem materializar divisores de fluxo subterrâneo.

Na superfície as águas da bacia circulam por diferentes trechos fluviais até chegarem à calha do rio São Francisco, que constitui o nível de base regional. Embora também seja este o destino da maior parte das águas que circulam em subsuperfície, existem fluxos que seguem para fora dos limites da bacia hidrográfica do rio São Francisco, como ilustrado esquematicamente na porção oeste da seção da Figura 3.1, onde o Sistema Aquífero Urucuia contribui para os afluentes da margem direita do Alto Tocantins.

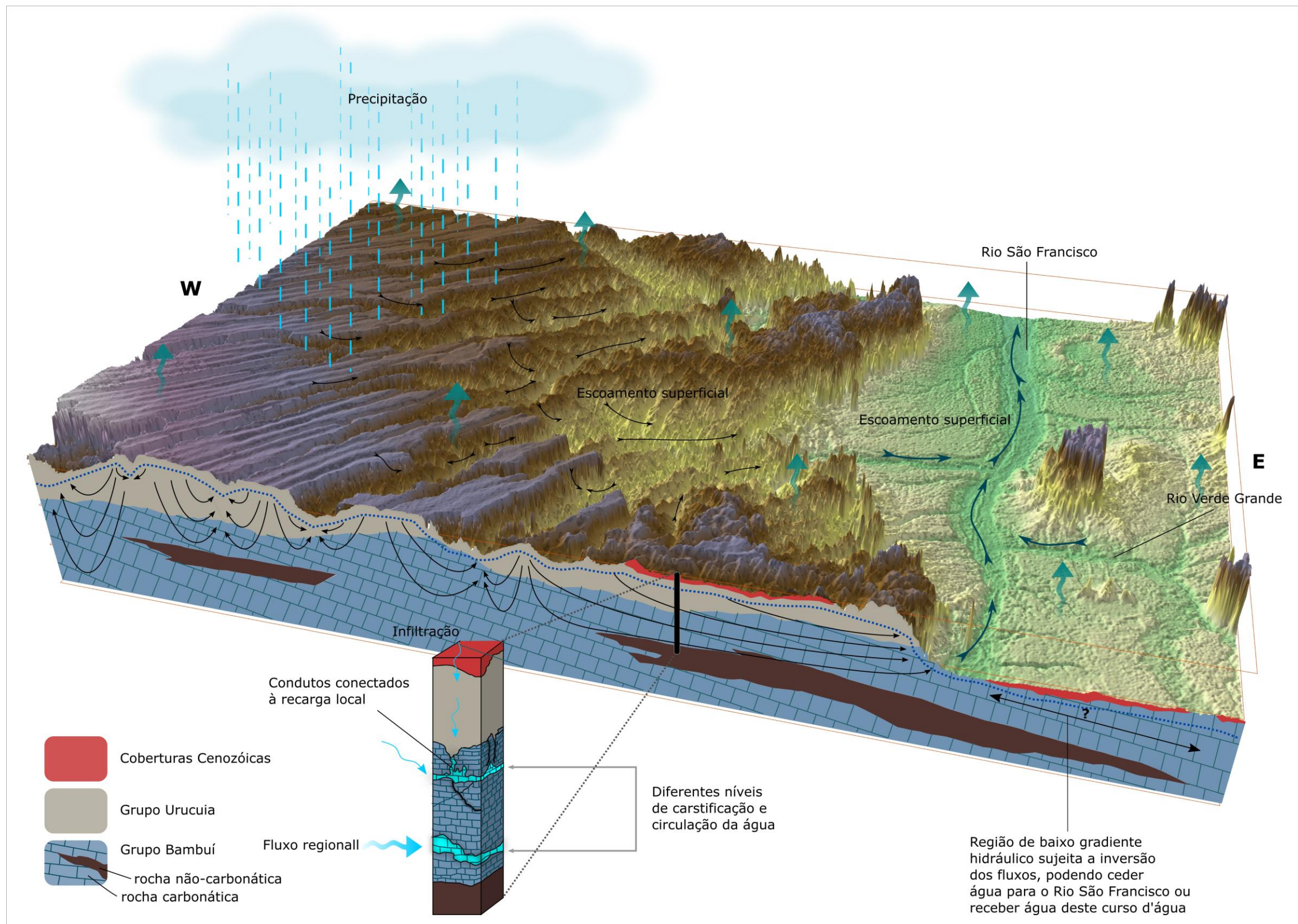


Figura 2.1 - Bloco diagrama esquemático ilustrativo da dinâmica hídrica na bacia do Rio São Francisco na porção norte de Minas Gerais.

Na seção é marcante a variação do relevo na margem esquerda e na margem direita do rio São Francisco. Na margem esquerda as unidades aquíferas do Urucuia estão alçadas em superfície, permitindo que exista energia potenciométrica para que as águas se movam em direção ao vale do rio São Francisco. Por outro lado, a diferença entre a cota do rio São Francisco e as cotas de superfície em sua margem direita é muito pequena, o que configura um gradiente hidráulico baixo.

Essa configuração, aliada às taxas elevadas de recarga que estão associadas aos arenitos do Grupo Urucuia na margem esquerda e a recarga reduzida ocasionada principalmente pelo aumento da aridez e baixo gradiente topográfico na margem direita, permite que o rio São Francisco possa perder água, ainda que sazonalmente, para o aquífero Bambuí na margem direita.

Os sistemas aquíferos cársticos e fissuro-cársticos ocupam uma área mapeada de aproximadamente 13% da bacia do rio São Francisco e estão distribuídos em contextos fisiográficos, climáticos e geo-estruturais distintos. Esses contextos diferentes estabelecem um potencial de produção de água também distinto. Nos aquíferos cársticos a evolução da porosidade cárstica depende dos atributos composicionais e estruturais da rocha carbonática e das zonas de recarga, muitas vezes posicionadas sobre as rochas não cársticas.

A proposta desse capítulo é analisar a bacia do rio São Francisco em seu contexto regional ressaltando os atributos fundamentais que controlam a dinâmica hídrica superficial e subterrânea nas zonas de interesse para a análise dos aquíferos cársticos e fissuro-cársticos.

Assim, será possível apontar zonas de distintos potenciais hidrológicos, cuja estrutura física e o contexto climático definem fragilidades ou potencialidades específicas que devem ser levadas em conta para a gestão de recursos hídricos, para o sucesso dos programas de preservação ambiental e o planejamento da ocupação na bacia.

O capítulo se divide em três itens: 1.1 - Atributos fundamentais - onde se discute a distribuição da rede hidrográfica, distribuição da precipitação, as unidades geológicas e as propriedades hidrogeológicas dos maciços; 1.2 - O carste na bacia do rio São Francisco – onde são destacadas as principais unidades carbonáticas que constituem os sistemas hidrogeológicos cársticos e fissuro-cársticos e seu contexto geológico-

estrutural; 1.3 – *Balanço Hídrico* – quantificação das parcelas de fluxo no balanço hídrico integrado nas sub-bacias que se desenvolvem sobre sistemas hidrogeológicos cársticos e fissuro-cársticos e áreas adjacentes.

## **2.1 ATRIBUTOS FUNDAMENTAIS**

Os atributos fundamentais para o desenvolvimento da abordagem integrada da dinâmica hídrica na bacia do rio São Francisco, de um balanço hídrico integrado, são a hidrografia, a precipitação pluviométrica, a geologia e as propriedades hidráulicas das rochas que constituem os aquíferos, os quais serão apresentados a seguir.

### **2.1.1 Hidrografia e limites da bacia**

A bacia do rio São Francisco tem uma área de cerca de 640 mil km<sup>2</sup> e abrange sete unidades da federação e 503 municípios. A mais importante nascente localiza-se na serra da Canastra, no município de São Roque de Minas, centro-oeste de Minas Gerais. O rio atravessa Minas Gerais e Bahia, delimita a divisa sul do estado de Pernambuco e os limites entre os estados de Sergipe e Alagoas, desaguando no oceano Atlântico, após percorrer aproximadamente 2.800 km de extensão.

O rio da Integração Nacional atravessa distintos biomas e suas transições, como a Mata Atlântica, o Cerrado e a Caatinga, e representa a principal drenagem do semiárido nordestino. O território do semiárido abrange 65% da bacia, segundo os novos limites do polígono do semiárido definidos pela SUDENE em 2017.

A bacia é subdividida em quatro zonas ou regiões fisiográficas: Alto, Médio, SubMédio e Baixo São Francisco. Segundo a nova subdivisão aprovada pela Câmara Técnica de Planos, Programas e Projetos do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, em janeiro de 2016, a região do Alto São Francisco foi ampliada para norte até a bacia do rio Carinhanha, na divisa entre Minas Gerais e Bahia.

A bacia do rio São Francisco foi dividida em 34 sub-bacias (CBHSF, 2016), conforme mostra o mapa da Figura 2.2. Destacam-se na margem direita os rios Paraopeba, das Velhas e Verde Grande e, na margem esquerda, os rios Paracatu, Urucuia, Carinhanha, Corrente e Grande. No Alto São Francisco, foram definidas 14 sub-bacias: rio Jequitaí, rio das Velhas, rio Paraopeba, rio Pará, Afluentes Mineiros do Alto São Francisco, Entorno Três Marias, Rio de Janeiro/Formoso, Urucuia, Pacuí, Verde Grande, Carinhanha, Pandeiros/Pardo/Manga, Alto Preto e Paracatu.



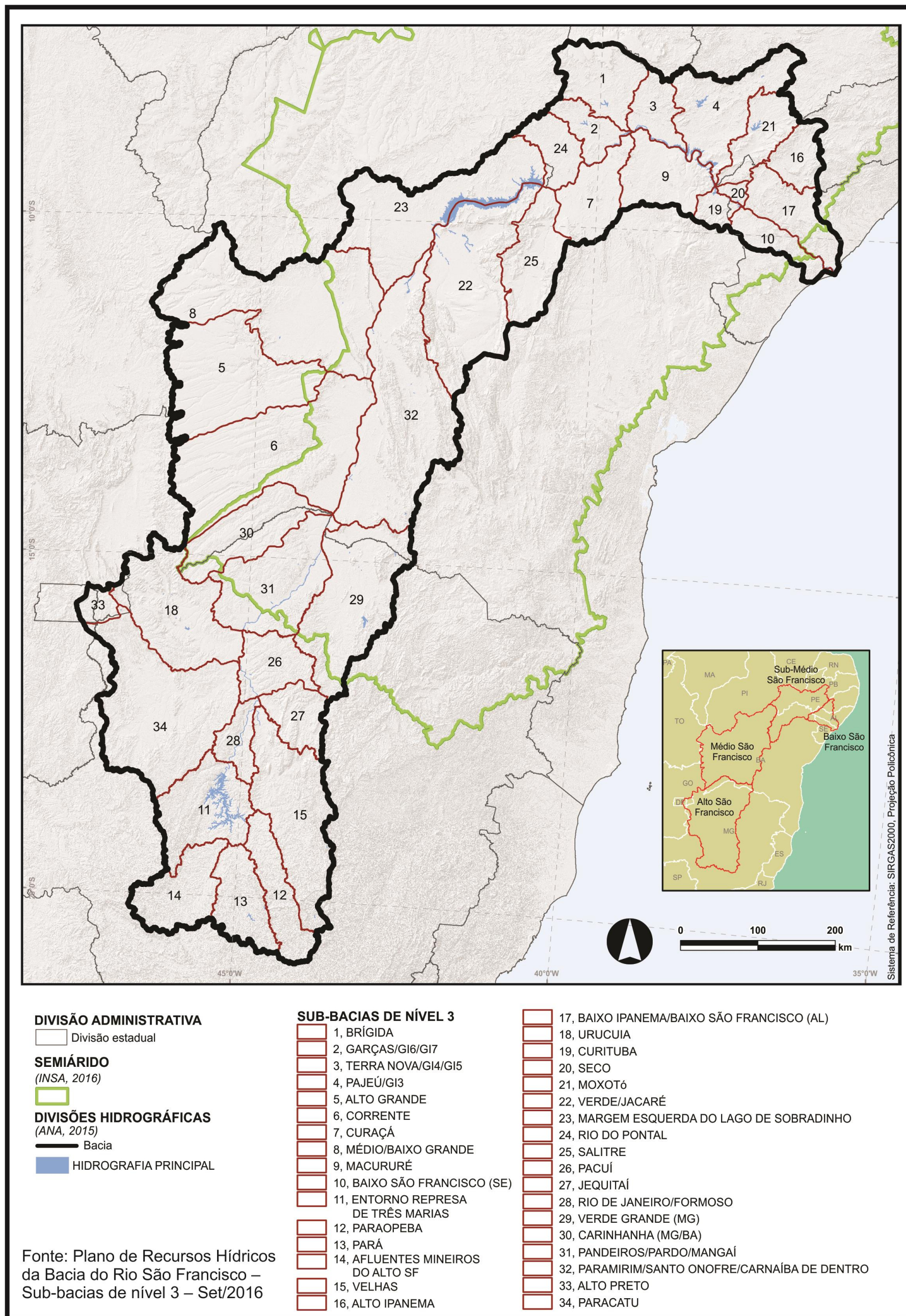


Figura 2.2 - Sub-bacias da região hidrográfica do rio São Francisco. Fonte: CBHSF (2016).

O curso principal do rio passa de SW-NE para S-N, reunindo pelo lado esquerdo os tributários encaixados em drenagens W-E e tributários SW-NE.

Na margem direita os principais tributários, o rio Pará, Paraopeba e rio das Velhas, seguem paralelamente na direção SE-NW, até a foz no rio São Francisco. No Alto São Francisco a altitude varia entre 450 a 1.850 m e 53% da região tem declives inferiores a 8% (CBHSF, 2016) conforme mostra a Tabela 2.1.

**Tabela 2.1 - Características morfológicas das regiões fisiográficas da bacia do rio São Francisco. Fonte: CBHSF (2004).**

Características	REGIÕES FISIográfICAS			
	Alto	Médio	Submédio	Baixo
Área (km <sup>2</sup> )	254.433	248.481	105.979	29.991
Área (%)	40	39	17	5
Altitudes (Nm)	1.850 A 450	2.050 a 350	1.300 a 200	1.150 a 0
Trecho principal (km)	692	1224	558	223
Área com declividade < 8% (%)	53	85	89	77

A partir do mapa da Figura 2.3, podem ser identificados alguns aspectos importantes quanto às formas de relevo existentes na Bacia e seu entorno, onde as discontinuidades ou continuidades dos maciços rochosos são evidenciadas pelo Modelo Digital de Terreno em relação aos limites topográficos que configuram o contorno da bacia hidrográfica do rio São Francisco.

As áreas das cabeceiras e no entorno do Alto São Francisco formam maciços rochosos elevados de grande expressão em área em todos os limites, leste, sul e oeste.

No Médio São Francisco (MSF), foram definidas 6 sub-bacias: Corrente, Alto Grande, Médio/Baixo Grande, Margem esquerda de Sobradinho, Verde-e-Jacaré, Paramirim-Santo-Onofre-Carnaíba-de Dentro. O curso principal do rio ao longo do Médio São Francisco tem direção aproximada SSW-NNE, curvando a norte para SW-NE. Os afluentes da margem esquerda Carinhanha, Corrente e Grande tem traçado aproximadamente perpendicular à direção do rio São Francisco, seguindo de SW para NE. Na margem direita os rios seguem de SE para NW, com variações no ângulo em relação ao traçado da calha do rio São Francisco.

No Médio São Francisco a altitude varia entre 350 m e 2050 m e 85% da região tem declives inferiores a 8% (CBHSF, 2016 - Tabela 3.1).

Os limites da bacia no MSF podem ser assim definidos:

Limite leste do MSF: delimitado pelas cumeeiras de direção aproximadamente NS da serra do Espinhaço Setentrional partindo das cabeceiras do Rio de Contas até ao município de Caetité-BA, e deste ponto em diante segue os topos irregulares da Chapada Diamantina atravessando-a na direção aproximada SW-NE. Em seguida, o limite é demarcado por elevações dos terrenos a norte da serra do Sincorá, no município Morro do Chapéu.



O limite oeste do MSF: se mantém pela continuidade norte das serras do Planalto Central Brasileiro, especificamente pelo Espigão Mestre, onde nascem as cabeceiras dos formadores do rio Corrente, o Formoso e o Correntina. Seguindo ainda mais para norte, o limite da bacia do rio São Francisco passa a acompanhar a borda oeste do Chapadão Ocidental da Bahia, ou Chapadão do Urucuia, onde pela primeira vez os terrenos fora da bacia representam cotas altimétricas inferiores, em uma condição geomorfológica bastante peculiar.

Limite nordeste do MSF: segue os terrenos elevados a sul e sudeste da serra do Bom Jesus da Gurgueia, em contornos sinuosos que se prolongam até o início da serra dos Irmãos, próximo a Barragem de Sobradinho.

No Submédio São Francisco (SMSF), são definidas 9 sub-bacias: Brígida, Garças, Terra Nova, Pajeú, Curaçá, Macururé, Moxotó, Rio do Pontal e Salitre. O São Francisco ao longo do SMSF, abaixo da represa de Sobradinho, forma um arco de concavidade voltada para sul, com trechos meandrantés e canais que entrelaçam grandes bancos de areia. No SMSF a altitude varia entre 200m e 1300 m e o 89% da região tem declives inferiores a 8% (CBHSF, 2016 - Tabela 2.1)

Os limites da bacia no Submédio São Francisco seguem os divisores topográficos delineados da seguinte maneira:

Limite norte do SMSF: segue as cumeadas da serra dos Irmãos, prosseguindo até atravessar a Chapada Araripe e continuar nos topos sul da Chapada Borborema, até a altura de Paulo Afonso.

Limite sul do SMSF: delimitado por uma ondulação do relevo no prolongamento do setor oeste da Chapada Diamantina que prossegue circundando a serra da Jacobina, passando a norte da serra de Itiúba, e atravessando os tabuleiros dos rios Real/Várzea Barris e Tonã/Jatobá. A sul desse limite estão as bacias dos rios Vaza-Barris e Itapicuru que seguem diretamente para o oceano Atlântico.

No Baixo São Francisco (BSF), foram definidas 5 sub-bacias: Seco, Curituba, Alto Ipanema, Baixo Ipanema/Baixo São Francisco (AL) e Baixo São Francisco (SE). Em seu trecho final, o rio percorre a direção aproximada WNW-ESSE. No BSF a altitude varia entre 0 m e 1.150 m e o 77% da região tem declives inferiores a 8% (CBHSF, 2016 – Tabela 2.1)

Os limites da bacia no Baixo São Francisco são:

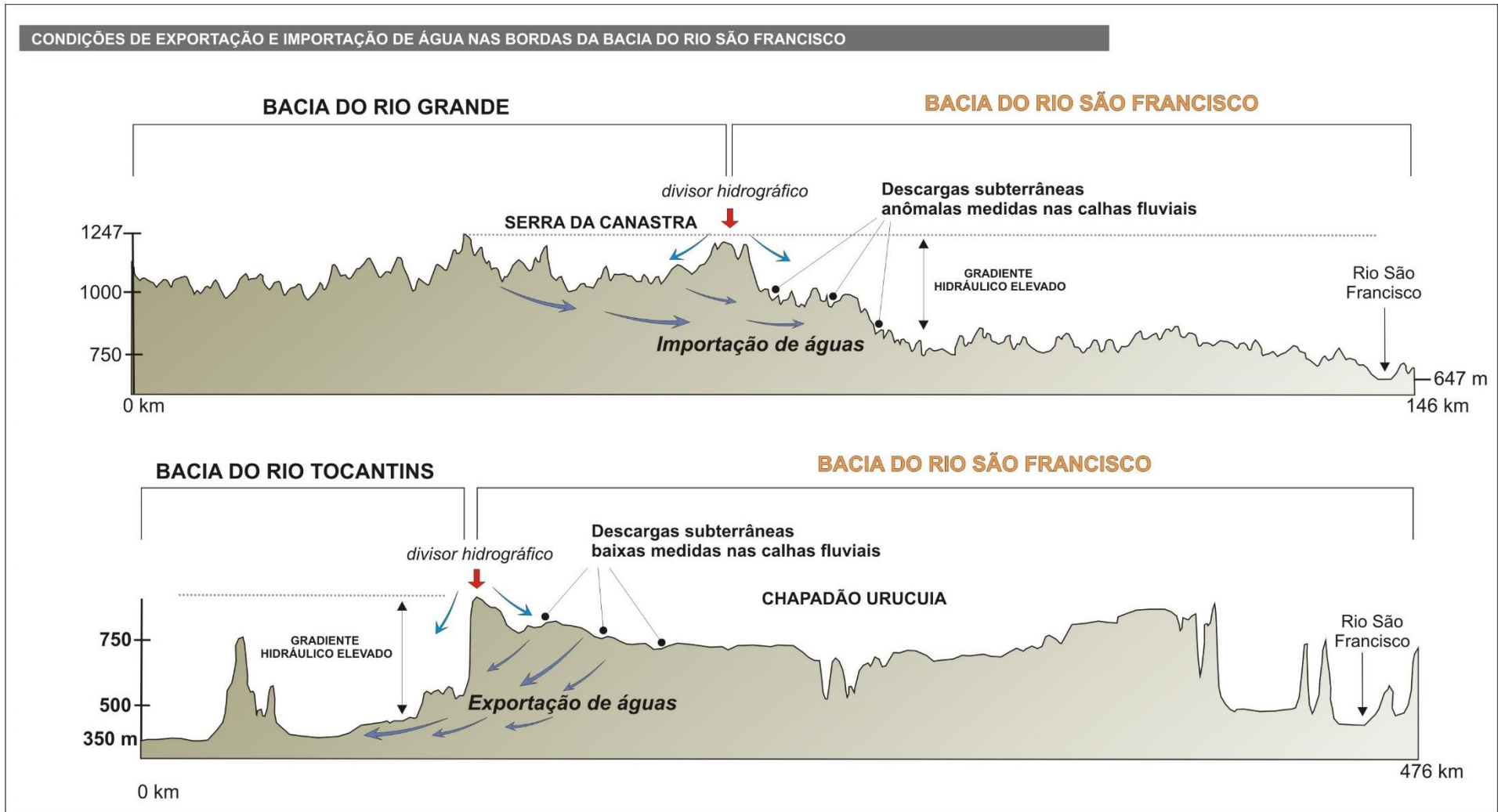
Limite norte do BSF: acompanha as cumeadas da porção sul do planalto Borborema.

Limite sul do BSF: liga as cumeadas posicionadas ao longo dos tabuleiros de Tonã/Jatobá, Recôncavo-Tucano e rios Real/Várzea-Barris

Os maciços rochosos associados aos limites da bacia do rio São Francisco podem apresentar-se sob distintas tipologias quanto à sua forma e altimetria de relevo, sendo que os relevos com desníveis marcantes, mais acidentados, são aqueles onde se potencializam as maiores velocidades de trânsito da água, devido ao gradiente hidráulico, a depender, naturalmente, da condutividade hidráulica do meio e de sua porosidade efetiva para fluxo.

Essas condições são potencializadas na existência de maciços rochosos em condições topográficas elevadas também na porção exterior da bacia (Figuras 2.3 e 2.4). Ainda que no sistema de drenagens superficiais tais áreas não contribuam para dentro da bacia, condições de gradiente topográfico associadas a um arcabouço rochoso relativamente permeável podem permitir um aporte de água subterrânea para zonas aquíferas posicionadas no interior da bacia, o que aumenta a produção de água nesse sistema, especialmente a partir da componente do escoamento de base. Tal contexto configura uma área de importação de água, conforme evidenciado no primeiro perfil da Figura 2.4, no limite hidrográfico entre as bacias dos rios Grande e São Francisco (Alto São Francisco).

Uma situação contrária, por outro lado, que favorece a perda de água subterrânea para fora dos limites da bacia hidrográfica pode ser associada a condições de contorno marcadas por um desnível topográfico negativo acentuado, onde há uma brusca diminuição das cotas das bordas para o exterior da bacia (Figura 2.4). Essa condição de “perda” depende, naturalmente, da disposição dos tipos rochosos e de sua permeabilidade. Esse contexto de exportação de águas está representado no segundo perfil da Figura 3.4, presente na região do oeste baiano, onde no limite oeste do Chapadão do Urucuia (Serra Geral de Goiás), o fluxo subterrâneo inverte para oeste e alimenta as cabeceiras dos afluentes da margem direita do Alto Tocantins.



**Figura 2.4 - Perfis topográficos nas bordas da bacia do rio São Francisco, na região da Serra da Canastra e na região do Chapadão Urucua.**

Condições de relevo onde prevalecem terrenos planos também podem ocorrer em cotas elevadas, próximos aos limites da bacia, ou mesmo no interior da mesma, como no caso na região central do Chapadão do Urucuia. No entanto, nesses ambientes, se conformados majoritariamente por sedimentos porosos ou por coberturas de materiais detríticos diversos, podem ocorrer recargas e circulação hídrica eficiente, uma vez que os valores mais elevados de condutividade hidráulica compensam a tendência de menores gradientes hidráulicos, os quais são marcados pela ausência de desníveis topográficos significativos.

Avaliando inicialmente essas relações entre o relevo na borda interna e o relevo no entorno dos limites da bacia, ainda sem considerar a constituição dos maciços, percebe-se que o ASF é uma região com características que favorecem a chegada de água subterrânea de terrenos contíguos, mas externos a bacia hidrográfica (Figuras 2.3 e 2.4). Por outro lado, conforme ocorre ao longo da margem oeste do Chapadão Urucuia no MSF, o desnível abrupto que se forma em direção da bacia do rio Tocantins favorece a saída de água dos limites da bacia do rio São Francisco (Figuras 2.3 e 2.4). O escoamento de base medido nas calhas fluviais nas condições de fronteira pode ser, portanto, anômalo quando comparado aos valores típicos esperados para as unidades hidrogeológicas constituintes da bacia fora desse contexto.

Esses são exemplos de condições geomorfológicas que favorecem a importação e a exportação de águas subterrâneas. Nesses casos existe uma diferença importante entre os limites da bacia hidrogeológica e os limites da bacia hidrográfica.

Esses dois casos refletem, em macro escala, situações que precisam ser analisadas também dentro das sub-bacias e micro bacias, especialmente para interpretar os valores de descarga superficial e recarga em domínios litológicos dentro desses limites. Quanto mais informações mais ricas serão as análises efetuadas.



### **2.1.2 Regiões climáticas e pluviometria da bacia do rio São Francisco**

Um espaço geográfico que se caracteriza pela ocorrência de maior intensidade de chuvas revela-se como um dos mais importantes ambientes quanto ao potencial indutor das recargas dos aquíferos. O monitoramento pluviométrico entre as inúmeras estações de coleta e de registro de dados, distribuídas ao longo de extensas regiões, permite o entendimento de como variam geograficamente o regime de chuvas; logo, o reconhecimento de sua “assinatura” pluviográfica, por meio de mapas de isoietas.

Os volumes das chuvas têm influência direta no equilíbrio das cargas hidráulicas dos aquíferos, que, por sua vez, refletem na manutenção e na regularidade das descargas de base das drenagens conectadas, possibilitando estabelecer uma relação diretamente proporcional entre o índice pluviométrico e a recarga, em condições naturais.

Estudos de detalhe, em zonas de maior intensidade de chuvas, podem demonstrar no longo termo, que mesmo sob a presença de tipologias aquíferas cuja potencialidade não seja elevada, chuvas recorrentes de maior intensidade são capazes de manter gradientes hidráulicos mais altos. De modo inverso, zonas onde o regime climático sazonal regula-se pela escassez das taxas de precipitação, o rigor da ausência de água traz consequências drásticas para o meio, pois as recargas dos aquíferos não são efetivamente realizadas, desencadeando uma série de consequências: independentemente da tipologia de rochas e das formas de relevo, os sistemas aquíferos se traduzem em reservatórios limitados por sua baixa capacidade de circulação, uma vez que o equilíbrio desses ambientes manifesta-se pelo frequente *déficit* natural, acarretando assim, em uma constante perda dos gradientes hidráulicos.

As características geográficas, associadas à gênese e à dinâmica dos sistemas atmosféricos atuantes no Brasil, resultam em regimes de chuvas abundantes, excetuando-se a região semiárida do sertão nordestino. Entretanto, na maior parte do país, esse regime de chuvas é marcado pela sazonalidade, sendo as chuvas concentradas na primavera e verão, com períodos de estiagem no outono e inverno.

A bacia do rio São Francisco, engloba quatro variedades de climas regionais: tropical de altitude, tropical, semiárido e tropical úmido litorâneo, que apresentam regimes pluviométricos específicos (Sant'anna Neto & Nery, 2005).

Analisando as quatro regiões fisiográficas da bacia do rio São Francisco (Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco) destacam-se variações importantes quanto aos índices pluviométricos. No Alto São Francisco e no extremo sudoeste de sua porção média, prevalecem as características do clima tropical e tropical de altitude. O clima tropical apresenta temperaturas médias de 18 °C ou superiores em todos os meses do ano (Sant'anna Neto & Nery, 2005). Apresenta duas estações bem definidas marcadas essencialmente pelo regime de chuvas: verão quente e chuvoso que se estende de outubro a abril, aproximadamente, seguido por um inverno quente e seco, com quedas abruptas da umidade relativa do ar.

Nas regiões serranas no sul da bacia do rio São Francisco, onde predomina o clima tropical de altitude, as cotas mais elevadas e a disposição das vertentes provocam sensível diminuição das temperaturas, especialmente no outono e inverno. O clima tropical de altitude caracteriza-se por médias de temperaturas mais baixas que o clima tropical, ficando entre 15° e 22° C. Nessas áreas há uma acentuação das diferenças térmicas entre dia e noite e entre verão e inverno.

Na porção média da bacia do rio São Francisco (no norte de Minas e porção central da Bahia) ocorre uma transição do clima tropical típico para o clima tropical semiárido, que se estende até grande parte do Baixo São Francisco. No semiárido, as precipitações anuais mal atingem os 600 mm, provocando uma área semidesértica de grande extensão. Quase a totalidade das chuvas anuais ocorre entre os meses de dezembro e abril, que, em função das altas temperaturas, é insuficiente como recurso hídrico durante o longo período de estiagem que marca o restante do ano (Sant'anna Neto & Nery, 2005).

Essa condição de seca é favorecida pela presença das chapadas e planaltos do agreste nordestino, dispostos paralelamente ao litoral oriental, que interceptam parte da umidade e das chuvas, que poderiam chegar através das correntes de leste. Além disso, no litoral setentrional, a temperatura da superfície do mar é mais fria (ao sul do Equador), diminuindo a possibilidade de aumento da umidade do ar. Na região semiárida do Brasil, as condições de circulação atmosféricas permitem a formação de uma grande célula de alta pressão, bastante estável durante o inverno e primavera, períodos mais secos da região (Sant'anna Neto & Nery, 2005).

No Baixo São Francisco, por sua vez, o rio atravessa em sua porção final uma faixa estreita paralela à zona costeira do litoral oriental do Brasil onde o clima dominante é o tropical úmido litorâneo. O clima tropical úmido litorâneo se estende desde o Rio Grande do Norte e se alonga até o litoral de São Paulo, marcando uma faixa com largura variando de 1 a 100 km. As massas Tropicais marítimas, potencializadas pelos ventos alísios instabilizam-se pela presença de serras de elevadas altitudes que se encontram paralelas à costa, produzindo chuvas orográficas em abundância (Sant'anna Neto & Nery, 2005).

As estações pluviométricas selecionadas nesse estudo encontram-se distribuídas ao longo dos domínios dos climas tropical, tropical de altitude e tropical semiárido. Conforme o mapa de isoietas (Figura 2.5), a precipitação tende a diminuir de sudoeste para nordeste, na medida em que sai do contexto climático tropical para o tropical semiárido. Nas cabeceiras do rio São Francisco, a sudoeste, as curvas isoietais têm valor superior a 1300 mm.

Em uma grande área na porção central e norte da bacia, próximo à calha do rio São Francisco as curvas isoietais variam de oeste para leste, entre 1300 mm e 900 mm, com exceção de duas áreas mais úmidas seguintes (Figura 2.5): Ao longo do eixo Buritis – Arinos – Santa Fé de Minas (estações Fazenda Umburana-Montante e Várzea da Palma; Região de Lagoa Santa (estação Pirapama). Na porção central da Bahia, na porção nordeste, as curvas têm valor inferior a 900 mm.

As curvas têm formas sinuosas acompanhando as irregularidades do relevo próximo às serranias que compõem os grandes divisores topográficos da bacia, até se tornarem aproximadamente paralelas à direção norte-sul, na expressiva área aplainada nas margens da calha principal do rio São Francisco, quando este adentra o estado da Bahia. Uma perturbação no padrão das curvas isoietais é percebida nas bordas da Chapada Diamantina e na região de Irecê.

Com base no valor e no padrão geométrico das curvas isoietais, os três grandes compartimentos identificados foram tomados como áreas de referência para a descrição das demais parcelas do ciclo hidrológico e associação com a distribuição das drenagens e contexto geológico-geomorfológico. As bacias associadas às estações fluviométricas selecionadas foram agrupadas segundo os domínios isoietais utilizando como referência os valores de precipitação média anual representativos para a bacia

(com base no mapa de isoietas), e não nos valores medidos nos pontos das estações pluviométricas.

Os compartimentos foram denominados Domínios Isoietais I, II e III (Figura 2.5), e foram assim definidos:

**DOMÍNIO ISOIETAL I** – Compreende a área onde os valores médios históricos de precipitação anuais são iguais ou maiores do que 1.300 mm, num total de 84.084 km<sup>2</sup>, onde estão localizadas 24 bacias associadas às estações fluviométricas selecionadas. O valor médio máximo de precipitação observado corresponde a 1660 mm/ano, na fazenda Samburá, e o valor médio de precipitação dentro da faixa corresponde 1.440,4 mm/ano. Os meses mais chuvosos correspondem a novembro, dezembro e janeiro, sendo dezembro o mês de maior média histórica mensal pluviométrica (290,3 mm, Figura 2.6, Tabela 2.2). Os meses mais secos são junho, julho e agosto, sendo o mês de junho correspondente à menor média histórica mensal de chuvas no Domínio Isoietal I (7,2 mm).

Nesse domínio, que engloba a principal nascente do rio São Francisco, estão as cabeceiras de grandes afluentes, como o rio Paraopeba, rio Pará, rio Abaeté e rio Paracatu. As zonas de cabeceira estão vinculadas a rochas mais antigas, que se salientam no relevo formando os grandes divisores topográficos com as bacias dos rios Paranaíba, Grande e Doce ao sul e a sudoeste da bacia do rio São Francisco. Os caudais são dirigidos às drenagens que passam a percorrer as rochas do Grupo Bambuí, em condições estruturalmente movimentadas, sobretudo na porção sudoeste, marginais à faixa de dobramentos Brasília. Áreas de coberturas cenozoicas extensas também ocorrem ao longo de um modelado de relevo ondulado.

**DOMÍNIO ISOIETAL II** – Compreende a área onde os valores médios históricos de precipitação estão entre 900 mm e 1.300 mm, num total de 243.055 km<sup>2</sup>, incluindo neste domínio a presença de 40 bacias vinculadas às estações fluviométricas selecionadas para o estudo. O valor médio de precipitação no Domínio II corresponde a 1.110 mm/ano. Os meses mais chuvosos correspondem a novembro, dezembro e janeiro, sendo dezembro o mês de maior incidência de chuvas (226,2 mm), segundo os valores das médias históricas mensais (Figura 3.6, Tabela 3.2). Os meses mais secos são junho, julho e agosto, sendo o mês de junho (5,8 mm) correspondente à menor média histórica mensal de chuvas entre as estações analisadas no Domínio Isoietal II.

Nesse domínio, além de grande parte das bacias dos rios Paraopeba, Paracatu e rio das Velhas, encontram-se ainda uma zona extensa das sub-bacias dos rios Urucuia, Pandeiros, Carinhanha, Corrente e rio Grande, e também a cabeceira do rio Verde Grande. Os acidentes geográficos mais importantes são marcados pela serra do Espinhaço ao sul, no contexto geológico da faixa de dobramento Araçuaí e, na margem esquerda do rio São Francisco, pelas serras e chapadões onde afloram as unidades cretáceas, recobrimo parcialmente o Grupo Bambuí. Na porção norte destaca-se o Chapadão Urucuia, com as maiores ocorrências de aquíferos porosos na bacia do rio São Francisco, cujos divisores a oeste a separam da bacia do rio Tocantins. Os terrenos de cotas mais baixas localizam-se na planície do rio São Francisco, e nos vales dos grandes afluentes da margem oeste do rio.

**DOMÍNIO ISOIETAL III** – Compreende uma área de 218.315 km<sup>2</sup> onde os valores médios históricos de precipitação anual são menores que 900 mm, abrangendo três bacias vinculadas a estações fluviométricas selecionadas (Figura 2.5). O valor médio de precipitação corresponde a 529 mm/ano, e mínimo igual a 460 mm/ano. Observa-se uma drástica diminuição das chuvas, sendo a precipitação média inferior a 3 mm/mês nos meses mais secos: junho, julho e agosto (Figura 2.6, Tabela 2.2). O mês de julho tem a menor média histórica mensal (0,2 mm). Os meses de maior média histórica mensal correspondem a dezembro, janeiro e março, sendo dezembro o mês de maior registro médio de chuvas (150,7 mm).

Esse domínio ocorre essencialmente na margem direita do rio São Francisco, e região da calha, e engloba também a foz dos grandes rios que nascem no Chapadão do Urucuia: rios Carinhanha, Corrente e Grande. As grandes unidades de relevo que ocorrem neste Domínio Isoietal III estão representadas pela serra do Espinhaço Setentrional e a Chapada Diamantina, no contexto da faixa Araçuaí e do Aulacógeno Paramirim. As unidades carbonáticas vinculados a esse domínio ocorrem principalmente em áreas rebaixadas da planície central do rio São Francisco e ao longo do planalto cárstico da Bacia de Irecê.

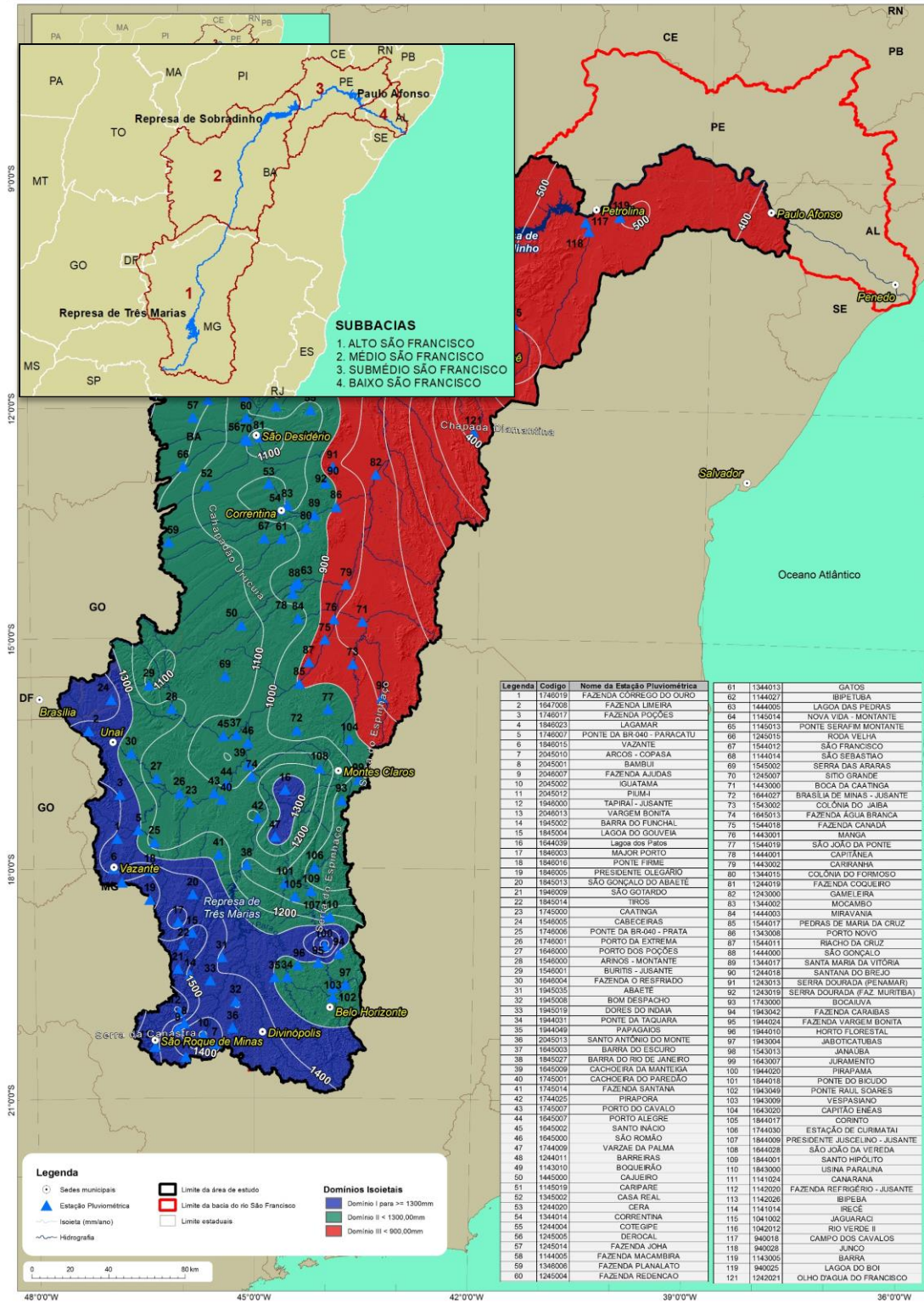
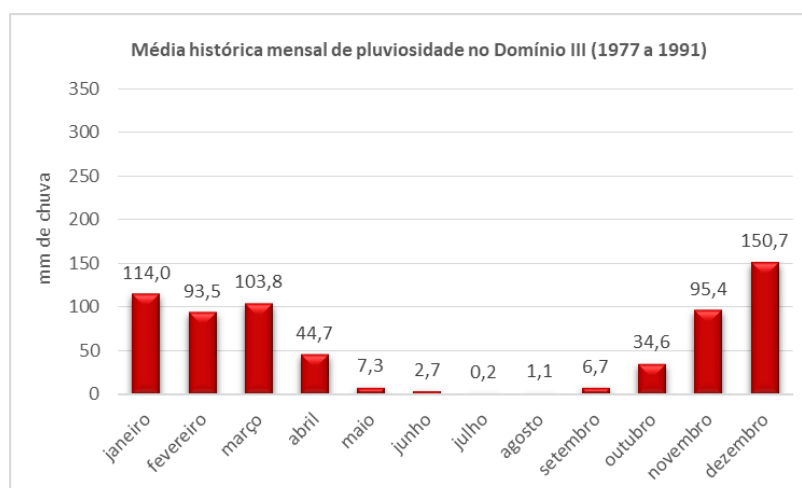
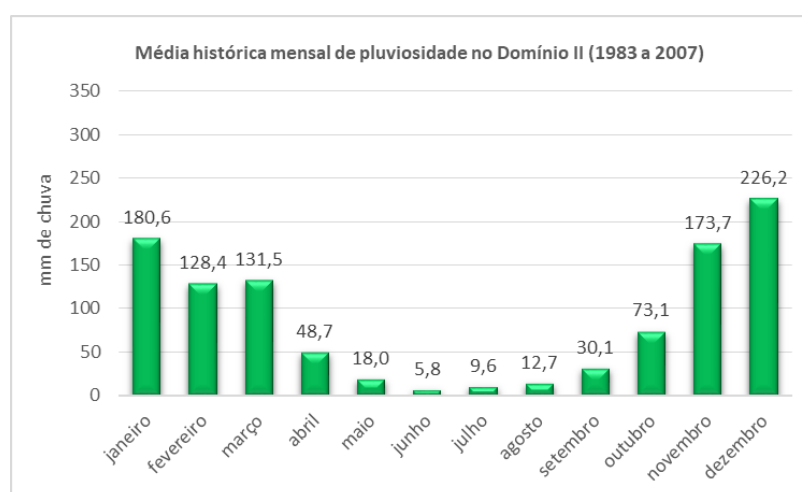
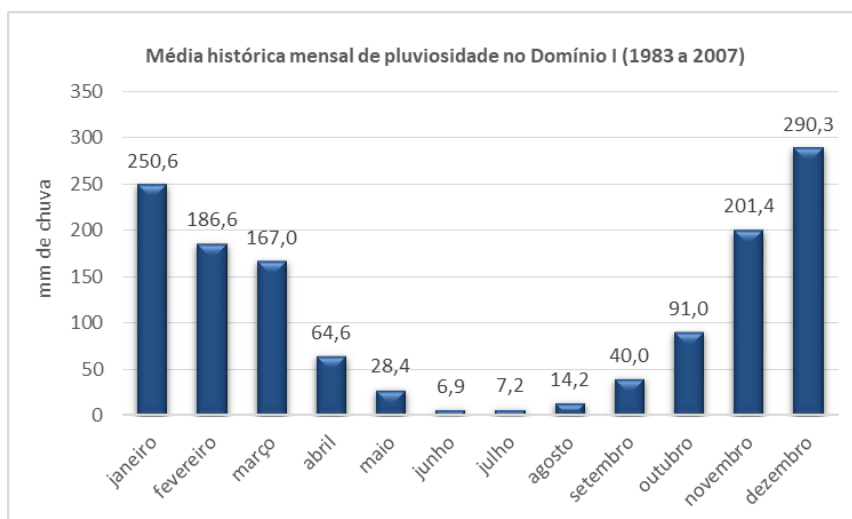


Figura 2.5 - Domínios Isoietais na bacia do rio São Francisco. Base de dados: registros pluviométricos das estações selecionadas no cadastro do Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas. Disponível em: < <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>>



**Figura 2.6 - Média histórica mensal de pluviosidade nos Domínios Isoietais I, II e III. Base de dados: Hidroweb. Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas.**

**Tabela 2.2 - Estações pluviométricas utilizadas para o cálculo das médias históricas mensais nos Domínios Isoietais I, II e III**

	Legenda	Estação Pluviométrica	Sub-bacia	Período dos dados analisados
<b>DOMÍNIO I</b>	1	1746019-Fazenda Córrego do Ouro	Rio Escuro	17/01/1983 a 30/11/2007
	3	1746016-Fazenda Poções	Rio São Pedro	
	5	1746007-Ponte da BR-040 Paracatu	Rio Paracatu	
	12	1946000-Tapiraí Jusante	Rio Perdição	
	17	1846003-Major Porto	Ribeirão Areado	
	31	1945035-Abaeté	Ribeirão Marmelada	
	47	1744009-Várzea da Palma	Rio das Velhas	
<b>DOMÍNIO II</b>	10	2045002-Iguatama	Rio São Francisco	14/01/1983 a 31/12/2007
	25	1746006-Ponte da BR-040 Prata	Rio da Prata	
	26	1746001-Porto da Extrema	Rio Paracatu	
	27	1646000-Porto dos Poções	Rio Preto	
	28	1546000-Arinos Montante	Rio Urucuia	
	29	1546001-Buritis Jusante	Rio Urucuia	
	34	1944031-Ponte da Taquara	Rio Paraopeba	
	44	1645007-Porto Alegre	Rio Paracatu	
	45	1645002-Santo Inácio	Rio Urucuia	
	46	1645000-São Romão	Rio São Francisco	
	49	1143010-Boqueirão	Rio Grande	
	56	1245005-Derocal	Rio das Fêmeas	
	60	1245004-Fazenda Redenção	Rio de Ondas	
	63	1444005-Lagoa das Pedras	Rio Caririnha	
	64	1145014-Nova Vida Montante	Rio Branco	
	68	1144014-São Sebastião	Rio Grande	
	70	1245007-Sítio Grande	Rio Grande	
	101	1844018-Ponte do Bicudo	Rio do Bicudo	
	103	1943009-Vespasiano	Ribeirão da Mata	
	104	1643020-Capitão Enéas	Rio Verde Grande	
106	1744030-Estação de Curimataí	Rio Curimataí		
107	1844009-Presidente Juscelino Jusante	Rio Parauninha		
109	1844001-Santo Hipólito	Rio das Velhas		
<b>DOMÍNIO III</b>	73	1543002-Colônia do Jaíba	Rio Verde Grande	01/11/1977 a 31/12/1991
	115	1041002-Jaguaraci	Rio Jacaré ou Vereda do Romão	
	116	1042012-Rio Verde II (CODEVASP)	Rio Verde	



### **2.1.3 Geologia e o contexto hidrogeológico da Bacia**

A bacia do rio São Francisco localiza-se no interior do Escudo Atlântico, em grande parte na Província São Francisco (Almeida *et al.* 1977; 1981). Os limites da bacia passam em alguns pontos pelas províncias Borborema (a norte) e Tocantins (a oeste), e pela Província Parnaíba (a noroeste).

O rio São Francisco e seus afluentes são influenciados pelas características geológicas e estruturais do cráton São Francisco e das faixas dobradas que o delimitam, que ocupam principalmente a província São Francisco. No cráton homônimo o rio São Francisco atravessa os seguintes domínios morfotectônicos: Bacia do São Francisco, Aulacógeno Paramirim e a bacia do Recôncavo-Tucano-Jatobá, além de faixas aflorantes do embasamento, especialmente na porção centro leste da Bahia. Tal estruturação geológica impõe um importante controle na dinâmica de fluxos superficial e subterrâneo, cujo comportamento encontra-se totalmente condicionado à história evolutiva dos terrenos e dos processos responsáveis pela modelagem do relevo, pela composição e organização dos mantos pedológicos e distribuição espacial das principais estruturas impressas nas diversas litologias presentes.

A Bacia do São Francisco está localizada na porção sul do cráton do São Francisco (em Minas Gerais e no oeste da Bahia), e constitui um conjunto rochoso de espessura média aflorante de 900 m e máxima de cerca de 5.000 m (ALKMIM E MARTINS-NETO, 2001). Essas rochas estão organizadas em quatro unidades litoestratigráficas maiores: o Supergrupo Espinhaço de idade paleo/mesoproterozoica, o Supergrupo São Francisco de idade neoproterozoica, os sedimentos paleozoicos do Grupo Santa Fé e as unidades cretáceas dos Grupos Areado, Mata da Corda e Urucuia (ALKMIM E MARTINS-NETO, 2001). Além dessas, no domínio de ocorrência da Bacia do São Francisco ocorrem áreas de coberturas cenozoicas, especialmente os depósitos eluvio-coluvionares e os aluviões.

No domínio morfotectônico do Aulacógeno Paramirim, na porção central da Bahia, afloram unidades do embasamento de idade arqueana a paleoproterozóica, intrusivas do Complexo Lagoa Real, o Supergrupo Espinhaço e o Supergrupo São Francisco.

Na porção centro-leste da Bahia e sul de Pernambuco estão localizadas as bacias sedimentares do Recôncavo, Tucano e Jatobá, que se desenvolveram durante a abertura do oceano atlântico Sul, durante o Cretáceo inferior, em um sistema de *riftes*.

Afloram ainda ao longo da bacia hidrográfica do São Francisco um grande número de unidades geológicas que compõem as faixas dobradas marginais ao cráton do São Francisco, bacias muito antigas arqueanas a paleoproterozoicas e conjuntos ígneos intrusivos e vulcânicos. Ocorrem também coberturas sedimentares pós-cretáceas, dentre as quais se destaca a Formação Barreiras (Neogeno). Ao longo do texto, serão ressaltadas dentro dessa variedade de unidades geológicas aquelas que marcadamente apresentam importância para o entendimento da dinâmica hídrica na bacia. A Figura 2.7 apresenta um mapa das principais litologias que compõem a bacia do rio São Francisco, nos domínios de interesse, ressaltando os tipos de rochas e as idades.

De forma geral, as distintas litologias que conformam o espaço geográfico da bacia do rio São Francisco podem ser classificadas quanto ao tipo de porosidade em quatro grandes sistemas: poroso, fissural, cárstico e cárstico fissural.

**Sistema de porosidade granular:** formado por rochas capazes de armazenar e transmitir água por meio dos vazios entre os grãos originados durante o processo de formação do depósito sedimentar inconsolidado ou da rocha sedimentar. Reúne principalmente as unidades cenozoicas (coberturas detríticas indiferenciadas e a Formação Barreiras), as unidades da bacia fanerozoica do Recôncavo-Tucano, e os depósitos sedimentares do Cretáceo (Grupos Areado e Urucuia).

**Sistema de porosidade fissural:** reúne tipos rochosos cuja permeabilidade e porosidade primárias são extremamente reduzidas e o armazenamento e circulação da água se torna possível pela presença de feições de ruptura desenvolvidas após a formação da rocha, ou seja, fissuras, fraturas e falhas. Dentro da bacia do rio São Francisco muitas unidades geológicas se comportam como sistemas aquíferos fissurados, sendo eles principalmente as rochas ígneas e metamórficas pertencentes às unidades arqueanas, aos cinturões de dobramento e corpos plutônicos intrusivos do Paleoproterozoico, rochas metassedimentares não carbonáticas posicionadas ao longo das faixas de dobramento, coberturas cratônicas neoproterozoicas parcialmente

deformadas e rochas vulcânicas cretáceas. Podem ser citados como exemplos de sistemas aquíferos de porosidade fissural os quartzitos do Supergrupo Minas, os quartzitos do Supergrupo Espinhaço, e a Formação Três Marias, do Grupo Bambuí.

**Sistema de porosidade cárstica:** caracteriza os maciços rochosos constituídos por rochas sedimentares químicas cuja evolução da porosidade ocorre pela dissolução ao longo da circulação da água em vazios pré-existentes. Destacam-se nesse grupo as rochas carbonáticas, onde são formados condutos, fendas e cavidades. Na bacia do rio São Francisco tais rochas ocorrem principalmente como coberturas cratônicas neoproterozoicas (especialmente as formações Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré, do Grupo Bambuí, e a Formação Salitre, do Grupo Una). De forma mais restrita, ocorrem rochas carbonáticas no contexto da Faixa de Dobramento Brasília, onde afloram unidades carbonáticas carstificadas, de idade meso-a-neoproterozoicas, do Grupo Vazante.

**Sistema de porosidade cárstico-fissural:** define um conjunto de rochas sedimentares que reúne rochas carbonáticas alternadas com camadas de rochas siliciclásticas, onde a água flui em um sistema de condutos interconectados gerados por dissolução (porosidade cárstica) e planos de descontinuidade típicos dos sistemas de porosidade fissural. Representam esse sistema principalmente as unidades geológicas depositadas durante o Neoproterozoico e Paleoproterozoico, ao longo do cráton ou nas faixas de dobramentos marginais. Como exemplos podem ser citadas as unidades do Grupo Bambuí: Formação Serra da Saudade e o Subgrupo Paraopeba.

Em geral, os sistemas porosos e cársticos são os sistemas mais promissores para aproveitamento da água subterrânea, já que ocorrem em terrenos onde a água da chuva pode infiltrar e ser armazenada, fluindo com velocidade mais elevada ao longo do maciço rochoso, participando dos processos de alimentação dos sistemas fluviais e recarga dos aquíferos mais profundos.

## Unidades Geológicas

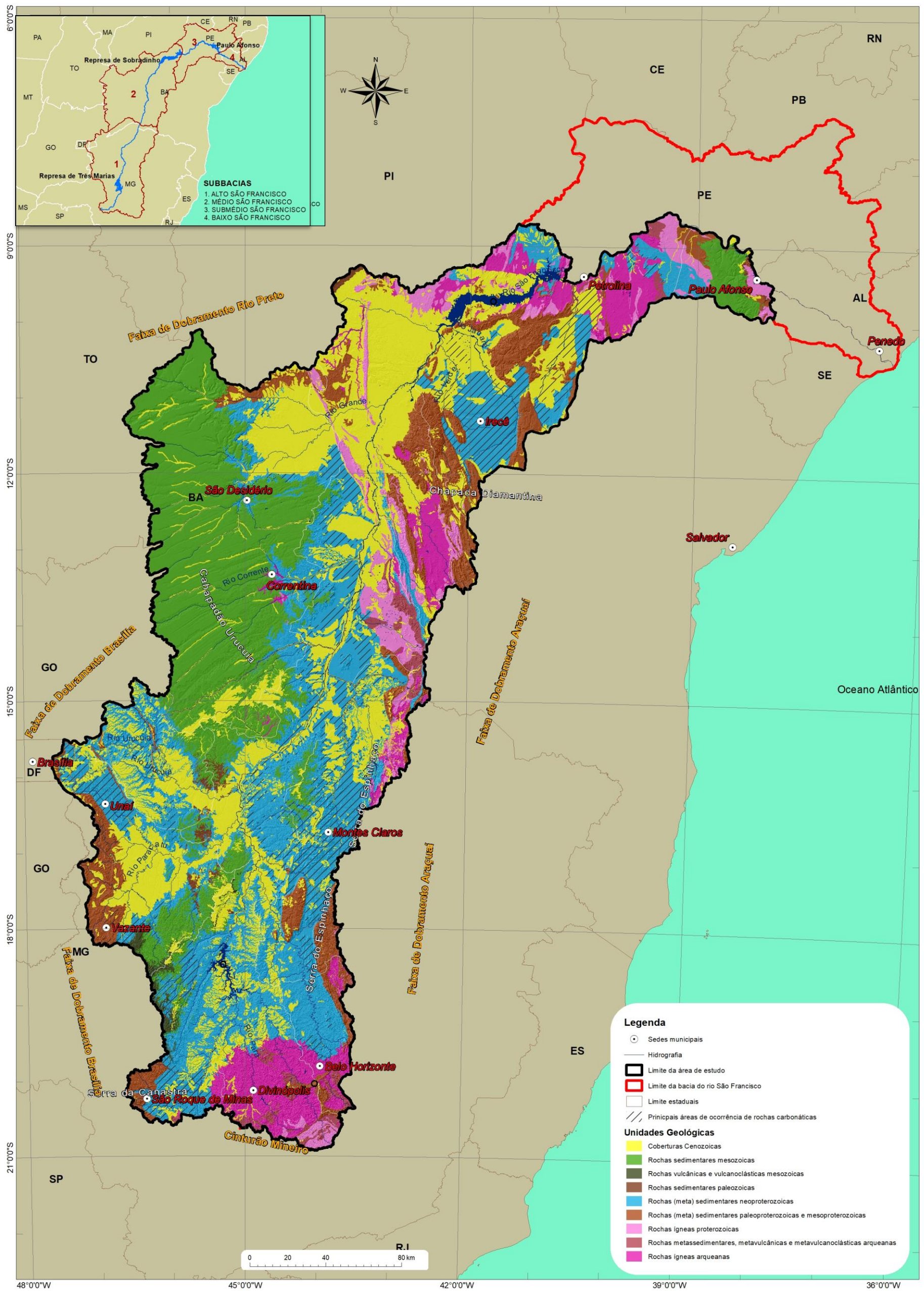


Figura 2.7 - Principais unidades geológicas que configuram o espaço geográfico da bacia do rio São Francisco (CPRM/CBPM, 2003).

Apesar dos distintos tipos de porosidade, as rochas podem ter potencialidade hídrica equivalentes, dependendo do volume e interconexão dos seus variados poros. Assim, rochas de diferentes idades e origens podem ser agrupadas por apresentarem propriedades hidráulicas similares.

Nesse sentido, a proposta inclui agrupar os materiais litológicos em domínios hidrogeológicos homogêneos, como: Zonas Aquíferas (ZA), Zonas Não-Aquíferas (ZNA) e Zonas de Aquíferos Pobres (ZAP). Esses agrupamentos mantêm relação direta com a porosidade efetiva para fluxos<sup>1</sup> de um determinado tipo de rocha, servindo como excelente índice-guia acerca dos potenciais hidrogeológico e de interconexão dos sistemas aquíferos entre bacias hidrográficas contíguas.

Os diversos tipos de rochas existentes, com cerca de centenas de associações possíveis, podem ser assim agrupadas e classificadas de acordo com intervalos admissíveis, facilitando a identificação de similaridades quanto ao seu potencial hidrogeológico, o que satisfaz o entendimento acerca da espacialização dos atributos de maior interesse ao conhecimento das aptidões dos aquíferos quanto a recarga, condutividade hidráulica e transmissividade de um dado sistema.

A existência desse arranjo hidrogeológico implica em uma modalidade de correlação entre os componentes superficial e subterrâneo, onde o comportamento dos volumes escoados nos períodos de estiagem ajusta-se a um padrão típico de esgotamento, caracterizando-se assim, zonas homogêneas quanto ao reflexo de suas propriedades hidráulicas nos hidrogramas.

Dessa maneira, nas regiões onde as rochas são pouco permeáveis e de baixa capacidade de armazenamento - Zonas Não-Aquíferas - por exemplo, a recessão no hidrograma encontra-se vinculada à restituição de rochas ou sedimentos pouco profundos, onde o regime de fluxo é intermitente.

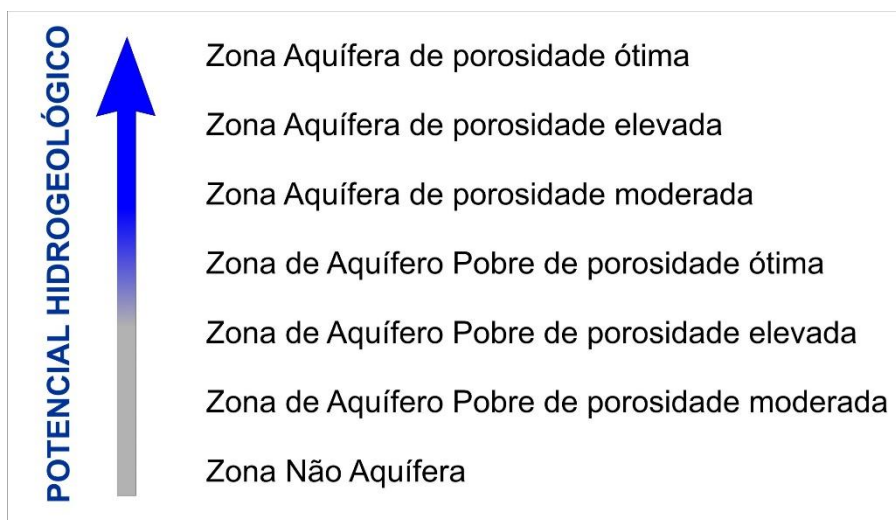
---

<sup>1</sup> A porosidade efetiva é uma característica intrínseca do meio, que determina a quantidade, em percentual, de poros interconectados, os quais estariam disponíveis para circulação de água. É considerado um dos mais importantes indicadores das potencialidades hidrogeológicas em um sistema poroso. Muitas vezes é uma propriedade extrapolada para indicar a interconexão entre as fraturas.

As rochas com porosidade granular, fissural ou cársticas que sustentam regimes de escoamento permanente, pouco influenciado pelas alternâncias pluviométricas e relativamente constantes no período de estiagem, foram agrupadas como Zonas Aquíferas.

Contudo, aqueles terrenos onde as propriedades hidráulicas do meio aquífero correspondem a uma situação intermediária em termos de sua capacidade de armazenamento são relacionados às Zonas de Aquíferos Pobres, e aqui vinculados a regimes de escoamento de base que são mantidos nos períodos de estiagem, ainda que os volumes se mostrem reduzidos.

As Figuras 2.8 e 2.9 mostram a divisão em tipologias aquíferas para as rochas no domínio de estudo dos sistemas hidrogeológicos cársticos e cárstico-fissurais. As três tipologias aquíferas, tendo em vista a porosidade efetiva para fluxo de cada tipo litológico, foram subdivididas, criando assim sete tipologias aquíferas de potencial hidrogeológico crescente (Figura 2.8).



**Figura 2.8 - Tipologias aquíferas**

A paisagem evoluiu a partir desse arcabouço rochoso estruturado em um passado remoto, estando a constituição física global refletida através das propriedades intrínsecas de cada material integrante e dos mecanismos diferenciados de atuação dos agentes morfoclimáticos quanto ao desenvolvimento e elaboração das feições e formas de relevo predominantes.

No contexto geológico do Alto São Francisco, onde está posicionada sua nascente (município de São Roque de Minas) e seus principais afluentes do alto curso, na margem esquerda, as coberturas neoproterozoicas do Supergrupo São Francisco acomodaram a deformação das frentes de empurrão da faixa Brasília gerando dobras em todas as escalas, falhas de empurrão e falhas transcorrentes.

Nesse ambiente de maciços elevados e estruturalmente movimentados, marcados por descontinuidades profundas as drenagens (rio Samburá, rio Bambuí e rio São Mateus) são marcadamente NW-SE e W-E, e são localmente paralelas a traços de falhas transcorrentes e fraturas perpendiculares ou oblíquas as frentes de empurrão.

Pela constituição das rochas, arranjo estrutural e características do relevo, nesse setor específico da bacia, há uma forte interação entre os aquíferos. O aporte pluviométrico elevado característico do Domínio Isoietal I (conforme mostrado no item 3.1.1) favorece a recarga e a circulação hídrica subterrânea, o que reflete em um aumento da capacidade de produção de água das unidades aquíferas.

O Grupo Bambuí, de porosidade cárstica e cárstica-fissural, e os Grupos Canastra, Araxá, Ibiá, cuja porosidade é essencialmente fissural, configuram Zonas Aquíferas sotopostas por Zonas de Aquíferos Pobres (Figura 2.9).

Para norte, na margem esquerda do rio São Francisco até a altura da represa Três Marias predominam no interior do cráton dobramentos e falhas de empurrão paralelos às frentes de cavalgamento da faixa Brasília. Sobre as rochas neoproterozoicas do Grupo Bambuí marcadas por essas estruturas, estão coberturas sedimentares cretáceas do Grupo Areado, rochas vulcano-sedimentares do Grupo Mata da Corda e coberturas cenozoicas, também muito importantes para a estruturação das redes de drenagens que conformam os afluentes do rio São Francisco nessa porção, que seguem marcadamente a direção SW-NE.

Mapa de Tipologias Aquíferas

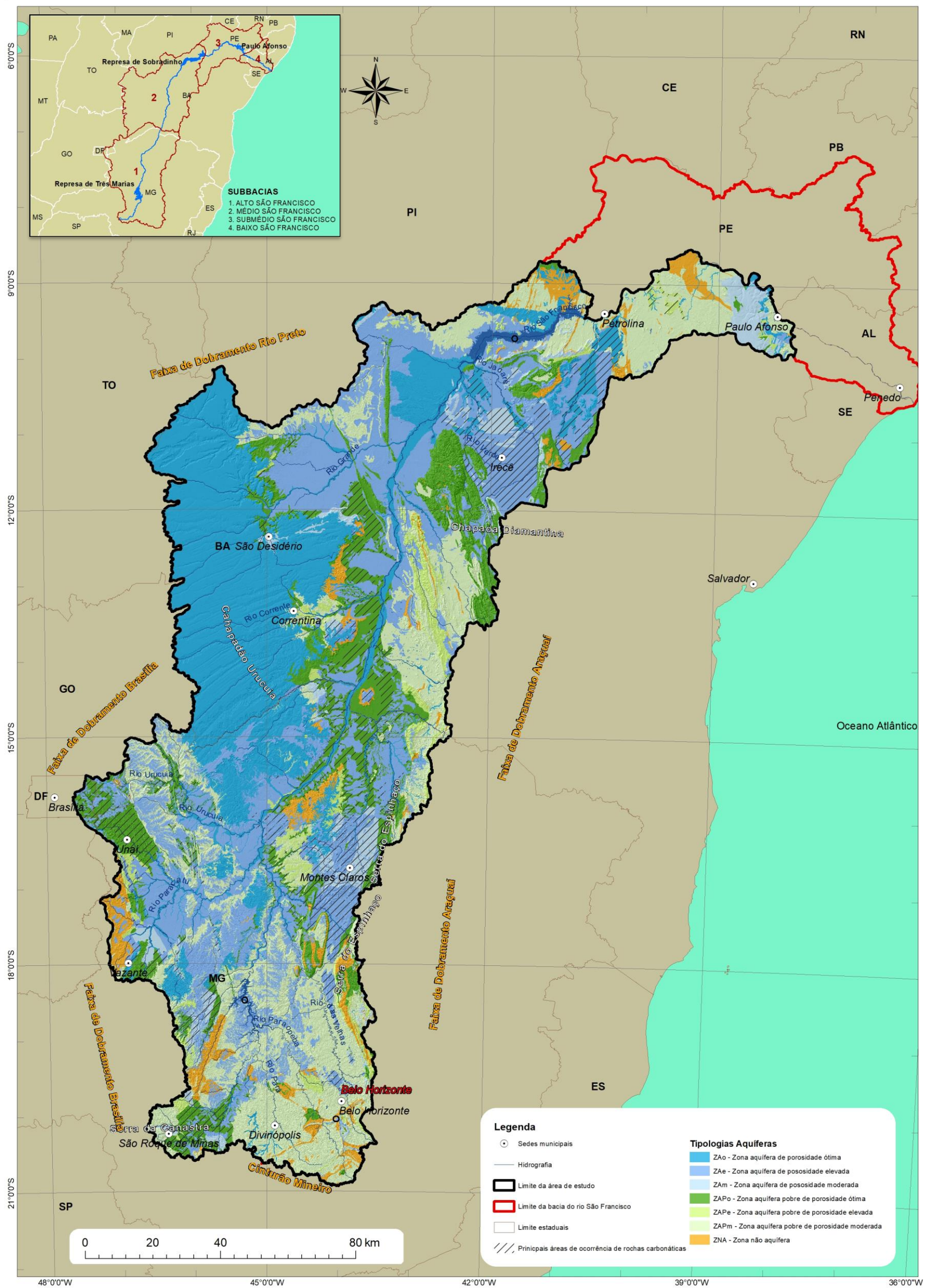


Figura 2.9 - Tipologias aquíferas na área de interesse ao estudo dos sistemas hidrogeológicos cársticos e cárstico-fissural na bacia do rio São Francisco (Base geológica: Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, CPRM)



Esse conjunto define Zonas Aquíferas (rochas carbonáticas do Grupo Bambuí) em contato lateral ou de topo com Zonas Não-Aquíferas (onde predomina os pelitos da serra da Saudade e serra de Santa Helena). Ambas são parcialmente cobertas por Zonas de Aquíferos Pobres materializadas, pelas rochas da Formação Três Marias ou rochas vulcano-sedimentares do Grupo Mata da Corda ou Zonas Aquíferas, constituídas pelos litotipos do Grupo Areado e as coberturas cenozoicas.

Prosseguindo ainda na direção norte, na margem esquerda do rio São Francisco, continua perceptível pelos lineamentos de relevo e estruturas mapeadas no Grupo Bambuí a deformação causada pela interação com a Faixa Brasília. Nessa área estão as bacias dos rios Paracatu e Urucuia, onde se destaca a direção aproximadamente NW-SE dos afluentes e da própria calha do rio Urucuia, correndo na direção paralela às falhas de empurrão e eixos de dobramentos.

Destaca-se também a presença de áreas de cobertura cenozoica extensas marcando uma grande Zona Aquífera, que reúne os principais litotipos pelos quais as águas superficiais da bacia Urucuia e Paracatu fluem em seu médio e baixo curso. As áreas elevadas nessas bacias, que constituem as zonas de recarga potenciais são constituídas por rochas pré-cambrianas – O Grupo Bambuí, Grupo Canastra, e as rochas da Faixa Vazante-Paracatu (posicionadas na porção externa da Faixa de Dobramentos Brasília). As unidades do Grupo Bambuí, Subgrupo Paraopeba, foram classificadas como Zonas de Aquíferos Pobres, assim como as unidades do Grupo Vazante. Já as rochas da Formação Paracatu (filito carbonoso e metassilito), pertencente ao Grupo Canastra, foram classificadas como Zonas Não-Aquíferas.

Na margem direita, partindo de sul para norte, também se observa a influência marcante das condições lito-estruturais no desenvolvimento da rede de drenagem. Os principais tributários, o rio Pará, Paraopeba e rio das Velhas, seguem paralelamente na direção SE-NW, até a foz no rio São Francisco. Tais rios têm suas cabeceiras posicionadas nos terrenos elevados no limite sul da bacia do rio São Francisco. Esse limite corresponde às cumeadas das serras e morros residuais esculpidos sobre um domínio cristalino onde predominam terrenos granito-*greenstone* arqueanos, domos de TTG e cinturões paleoproterozoicos. Dentre eles destacam-se as rochas ígneas intrusivas do Cinturão Mineiro, Complexos ortognáissicos Divinópolis e Belo Horizonte,

e as rochas meta-vulcano-sedimentares e metassedimentares dos Supergrupos Rio das Velhas e Minas. Essas rochas compõem Zonas de Aquíferos Pobres e localmente Zonas Não-Aquíferas. Destacam-se, entretanto, alguns litotipos do Supergrupo Minas (itabiritos, dolomitos, formações ferríferas e quartzitos) que afloram no Quadrilátero Ferrífero e que funcionam como Zonas Aquíferas de grande importância para a descarga hídrica na cabeceira do rio das Velhas.

Nessa porção da bacia, e seguindo em direção a norte ao longo das sub-bacias desses grandes rios, o embasamento se aprofunda e as drenagens passam a percorrer trechos dentro da cobertura cratônica, especialmente nas rochas pelito-carbonáticas do Grupo Bambuí. Nessas rochas estão impressas estruturas de acomodação da deformação ocasionada pelo desenvolvimento da Faixa de dobramentos Araçuaí, na margem leste do cráton do São Francisco. Na Faixa Araçuaí se destacam fisiograficamente as cumeeiras aproximadamente NS da serra do Espinhaço, que demarcam grande parte do limite leste da bacia do rio São Francisco. É interessante notar, que o traçado dos rios Pará, Paraopeba e das Velhas seguem paralelamente a direção do lineamento de relevo formado pela inflexão sul NW-SE da serra do Espinhaço.

Os rios Pará, Paraopeba e das Velhas em seu médio e baixo curso atravessam o Grupo Bambuí no Compartimento E da bacia do São Francisco definido por Alkmin e Martins-Neto (2001). Nesse compartimento as rochas estão marcadas por falhas de empurrão, dobras em *duplexes*, leques imbricados, raras falhas direcionais e um persistente sistema de juntas NE/SW e NW/SE. Os dobramentos, bem como os sistemas de *duplexes*, têm polaridade contrária à da faixa Brasília, com transporte tectônico de leste para oeste. Sobre essas rochas ocorrem apenas depósitos inconsolidados cenozoicos.

As Zonas Aquíferas de destaque ao longo da bacia do rio Pará, Paraopeba e Velhas são as Formações Sete Lagoas, Lagoa do Jacaré (Grupo Bambuí) e as coberturas detrito-lateríticas.

Apesar da variedade de estruturas decorrentes da interação entre a margem leste do cráton e a Faixa Araçuaí, as condições de interconexão hidráulica subterrânea entre os

dois conjuntos parecem ser menos eficientes quando comparado às condições da margem oeste do cráton e na interação desta com o extremo sul da Faixa Brasília. Além de um regime mais escasso de chuvas nessa altura da bacia na margem leste, o volume dos sistemas fluviais parece reduzido devido ao menor aporte de água subterrânea das cabeceiras, que no caso são as áreas topograficamente mais elevadas da serra do Espinhaço. Possivelmente, as estruturas como falhas de empurrão, *duplexes* e o próprio caimento das camadas com ângulo mais alto, mergulhando para leste, podem conduzir parte das parcelas infiltradas nos maciços para fora da bacia, seguindo as descontinuidades materializadas por esses grandes planos estruturais.

Ao norte, em contexto geológico semelhante na margem direita do rio São Francisco, os rios Verde Grande e Gorutuba atravessam o Grupo Bambuí em uma área mais árida e plana, apresentando trechos intermitentes orientados segundo a direção sul-norte, aproximadamente paralelos a direção das linhas de falha que marcam o contato com as frentes de cavalgamento na margem leste do cráton. Esses rios correm em um gradiente topográfico muito baixo, e estão muito próximos à cota altimétrica do rio São Francisco.

Especialmente a leste do rio Verde Grande, as rochas do Grupo Bambuí estão pouco a não deformadas, e são parcialmente recobertas por unidades arenosas cretáceas, formando topos residuais sobre as pilhas de sedimentos predominantemente pelito-carbonáticos do próprio Grupo Bambuí.

Nos terrenos arrasados essas unidades pelito-carbonáticas foram mapeadas como Subgrupo Paraopeba indiviso e compõem uma Zona de Aquíferos Pobres. Em mapeamento de maior detalhe, identifica-se uma grande área cárstica aplainada parcialmente sotoposta a um espesso manto de coberturas detrito-lateríticas que apresenta características de Zonas Aquíferas. Entretanto, a recarga nessa área é baixa devido às condições climáticas. No entanto, dada a presença de peculiaridades hidrogeológicas que merecem destaque e que justificam a alta produtividade de alguns poços perfurados na região, essa área será discutida posteriormente.

Seguindo para norte, já no estado da Bahia, o ambiente ainda mais árido e mais plano reduz ainda mais o aporte de água dos tributários da margem direita do rio São Francisco. Ao norte da confluência do rio Verde Grande com o rio São Francisco até a altura da confluência do rio Grande a diferença entre a contribuição fluvial da margem esquerda e a margem direita é marcante. A vasta distribuição em área e a espessura significativa dos arenitos cretáceos do Grupo Urucuia na margem esquerda, na porção oeste da Bahia, define uma área hidrogeologicamente peculiar – o Sistema Aquífero Urucuia. No mapa da Figura 2.9 observa-se a vastidão da Zona Aquífera no oeste baiano.

Os vastos depósitos de areia do Grupo Urucuia permitem uma taxa elevada de recarga pela infiltração das águas precipitadas ao longo do Chapadão Urucuia, e essa recarga se manifesta na vazão elevada de muitos afluentes do São Francisco, como os rios Carinhanha, rio Corrente e o próprio rio Grande. As drenagens no Chapadão Urucuia destacam-se em mapa pelo padrão paralelo encaixados em descontinuidades de direção WSW-ENE.

Conforme descrevem Gaspar *et al.* (2012), na região compreendida entre as cidades de São Domingos (GO) e Correntina (BA), as rochas do Grupo Urucuia estão em parte em contato direto com o embasamento cristalino (Zona de Aquíferos Pobres), o que indica a ausência das coberturas neoproterozoicas nessa região. Na região de Santa Maria da Vitória, Correntina e Jaborandi, o embasamento é composto por rochas granito-gnáissicas que afloram nas calhas dos rios Arrojado, Correntina, Formoso e afluentes.

Na região entre as cidades de Barreiras e São Desidério, ao norte, na bacia hidrográfica do rio Grande, sob as rochas arenosas do Grupo Urucuia afloram as coberturas neoproterozoicas do Grupo Bambuí, em um contexto geotectônico-estrutural diferenciado, já na porção noroeste do cráton do São Francisco próximo ao contato com a faixa de dobramento Rio Preto. Nessa porção, o Grupo Bambuí apesar de estar dentro da área cratônica, apresenta influência da orogênese brasileira responsável pela inversão da bacia do Rio Preto, ao norte.

No interior cratônico, próximo à cidade de São Desidério, as camadas estão horizontalizadas, com dobras amplas regionais, localmente com mergulho mais elevado. A deformação modifica bastante na medida em que se aproxima das zonas de cisalhamento e falhas inversas de dupla-vergência que caracterizam a faixa Rio Preto. O embasamento, assim como as coberturas neoproterozoicas se aprofundam para norte, até que na superfície passam aflorar de fato as rochas da faixa Rio Preto (UHLEIN *et al.*, 2011).

Saindo do oeste da Bahia e seguindo as drenagens até a calha do rio São Francisco, há uma grande zona de acúmulo de depósitos cenozoicos, de composição detrítico-laterítica e depósito eólicos continentais onde predominam sedimentos arenosos, no contexto geomorfológico da planície do rio São Francisco. Esses depósitos ocupam uma grande área até a represa de Sobradinho, formando uma vasta zona aquífera granular na margem esquerda do rio.

Na porção central da Bahia, o Cráton do São Francisco é truncado por estruturas que marcam a superimposição de dois *rifts* parcialmente invertidos de idade paleoproterozoicas e neoproterozoica – o Aulacógeno Paramirim (PEDROSA SOARES, 2001 e CRUZ E ALKMIN, 2006). O Aulacógeno Paramirim engloba a porção norte da serra do Espinhaço, o vale do rio Paramirim e parte do vale do rio São Francisco e também a Chapada Diamantina. Nesse grande domínio, encontram-se aflorantes rochas do Supergrupos Espinhaço e do Supergrupo São Francisco. As rochas associadas ao aulacógeno estão hoje parcialmente alçadas na topografia e concentram cabeceiras de alguns dos afluentes da margem direita do rio São Francisco na porção central da Bahia.

Uma parte substancial do aulacógeno Paramirim, especialmente a porção próxima às fronteiras do cráton, mostram o efeito da tectônica de inversão (CRUZ E ALKMIN, 2006), entretanto a área de máxima concentração dessa deformação define uma zona de aproximadamente 200 km de largura que atravessa o cráton na direção NNW, que foi denominada corredor de deformação do Paramirim (ALKMIN *et al.*, 1993).

A direita desse corredor localiza-se a Chapada Diamantina, o planalto cárstico de Irecê e o vale do rio Salitre. Esse conjunto é a expressão fisiográfica de um sistema de

dobras e falhas que expõem em grandes anticlinais e sinclinais as coberturas neoproterozoicas do Supergrupo São Francisco, principalmente o Grupo Una e as coberturas paleo-mesoproterozoicas do Supergrupo Espinhaço, na base (Grupo Espinhaço, Grupo Paraguaçu e Grupo Chapada Diamantina).

Em trechos deprimidos do relevo, encontram-se coberturas neógenas-quadernárias de composição detrítico-lateríticas e ainda zonas cobertas por brechas calcíferas e calcrete. Esses litotipos carbonáticos foram, a princípio, interpretados como unidades palustres terciárias ou do Pleistoceno superior associados com fácies ainda mais recentes originadas entre o Último Máximo Glacial e o Holoceno (AULER *et al.*, 2003).

É nesse contexto geológico que se desenvolvem as drenagens dos rios intermitentes Jacaré, Verde e Salitre, na zona climática do semiárido baiano.

A leste do Aulacógeno Paramirim, o rio São Francisco e seus afluentes da margem direita atravessam uma grande extensão de maciços rochosos desenvolvidos em terrenos granito-*greensstone* arqueanos e domos de TTG, terrenos neoarqueanos e cinturões paleoproterozoicos, dispostos em direção norte-sul no domínio litoestrutural Bahia Oriental. O sistema de drenagem principal dos afluentes do rio São Francisco nessa porção de sua margem direita está encaixado ao longo das discontinuidades marcadas pelos contatos geológicos e as zonas de cavalgamento nesse vasto terreno predominantemente cristalino e que foram classificados como Zonas de Aquíferos Pobres.

Já na porção do Submédio e Baixo São Francisco os afluentes do rio atravessam a zona de contato entre a Província São Francisco e Borborema (principalmente na margem esquerda). Atravessam parcialmente as unidades geológicas pertencentes ao orógeno mesoproterozoico Cariris Velhos, orógenos neoproterozoicos (Faixa Sergipana, Terreno Pernambuco-Alagoas, Terreno Carindé-Marranicó) e a bacia sedimentar fanerozoica do Recôncavo-Tucano.

Próximo à foz do rio São Francisco (Figura 3.9) destacam-se os depósitos cenozoicos, que incluem principalmente depósitos néogenos e holocênicos. Grande parte desse material pertence ao Grupo Barreiras (idade neógena), que aflora quase ininterruptamente por alguns milhares de quilômetros ao longo da costa do Brasil. A

Formação Barreiras (que reúne arenitos, conglomerados e argilitos) define um relevo de tabuleiros, formados pela elevação do interior continental e abaixamento da costa, em resposta a queda eustática do mar e o soerguimento epirogenético do pós-pliocênico.

Além disso, próximo a foz do rio São Francisco ocorrem depósitos litorâneos indiferenciados recentes, incluindo areias com conchas marinhas, argila e silte ricos em matéria orgânica e dunas de areias finas bem selecionadas.

Dentre esse grande volume de rochas, de um ponto de vista regional, as rochas mais destacadas quanto ao potencial de armazenamento são aquelas que compõem os sistemas de porosidade granular (coberturas cenozoicas inconsolidadas e rochas sedimentares das bacias fanerozoicas) e aquelas de porosidade cárstica e cárstica fissural, representada principalmente pelas coberturas cratônicas neoproterozoicas carbonáticas – Grupo Bambuí e Una.

Diante do arranjo geotectônico e geomorfológico que é exibido na região de estudo, observa-se que os compartimentos mais importantes para a circulação subterrânea em condições de grande integração com os sistemas fluviais encontram-se atrelados, grosso modo, ao alto e médio curso da bacia do rio São Francisco. Parte desses domínios já foi considerada em abordagens acerca da hidrogeologia dos sistemas aquíferos do Estado de Minas Gerais (SOUZA, 1995), onde importantes levantamentos pertinentes ao cômputo específico das disponibilidades hídricas nesses ambientes foram registrados.

Em princípio, pode-se esperar que não exista na natureza uma rocha que seja totalmente impermeável, embora em escala local e sob um enfoque de curto espaço de tempo, o caráter composicional de uma determinada rocha pode evidenciar a existência de baixíssimas condutividades hidráulicas. Contudo, em se tratando de fluxo de água em uma escala regional, onde estão envolvidos fatores diversos, tais como atividade tectônica e a própria ação biológica ao longo do tempo não é possível admitir que a água não encontre um caminho a ser percorrido, num maior ou menor espaço de tempo. Existindo gradiente hidráulico potencial, a água buscará uma forma de se deslocar.

Nessa abordagem, cabe citar os modelos de fluxos subterrâneos preconizados por Tóth (1962, 1963, 2016) em que a hidráulica das águas subterrâneas na escala de observação das bacias e o arcabouço geológico como suporte do fluxo subterrâneo, sustentam a teoria da continuidade do movimento das águas subterrâneas em nível regional, como uma forte mudança na compreensão de hidráulica de águas subterrâneas ao nível de bacias.

Desse modo, observando-se a existência de uma infinidade de tipos de rochas coexistindo sobre grandes extensões continentais, torna-se plenamente aceitável admitir que a dinâmica de fluxos subterrâneos possa ser comandada pelos atributos intrínsecos desses maciços rochosos, sem, contudo, estar vinculada à presença de fatores limitadores, relacionados a divisores topográficos de bacias hidrográficas, embora estes sejam fundamentais no cômputo das parcelas relativas ao escoamento superficial em um dado domínio, numa dada escala de tempo.

Entende-se que uma ênfase maior deve ser dada acerca das condições de interconexão hidráulica dos sistemas aquíferos, não mais se levando em consideração a continuidade dos maciços conformados por um mesmo tipo de rocha, mas, sim, a existência de uma massa rochosa contínua capaz de armazenar e circular água por grandes extensões, ainda que em condições de trânsito diferenciadas.

Desse modo, afora as características específicas dos tipos litológicos que os individualizam e os diferenciam diante de suas potencialidades hidrogeológicas intrínsecas, as estruturas tectônicas impressas nesses maciços ao longo de sua evolução geológica (falhas e fraturas), são consideradas como entes capazes de funcionar como elos de conexão entre distintos ambientes e tipos de materiais, sob variadas taxas de trânsito, simultaneamente.

Os mecanismos de controle estão fundamentados nas próprias condições que servem para a montagem do arcabouço geológico-geotectônico de um dado domínio, o que, no caso da bacia do rio São Francisco remete à observação de todo o contexto físico e geométrico de abrangência dos espaços que a configuram, não somente as porções interiores ao polígono demarcado naturalmente pelas cumeadas que contornam e fixam os limites de sua bacia hidrográfica, mas, além disso, todos os outros domínios



exteriores que se encontram adjacentes e materializam maciços rochosos, contínuos ou não.

Dentro desse espaço, os esforços para o entendimento da dinâmica hídrica visando compreender a integração das parcelas subterrâneas e superficiais, de modo mais realista e incisivo, passam pela análise dos seguintes fatores:

- Capacidade intrínseca de armazenamento, definido pela distribuição dos vazios dentro das rochas e depósitos inconsolidados;
- Formas de interconexão hidráulica entre os distintos sistemas hidrogeológicos, onde estão refletidos os atributos estruturais herdados ao longo da evolução geológica dos terrenos, e
- Os atributos responsáveis pela maior ou menor capacidade de trânsito, onde se destacam as condições climáticas favoráveis ao aporte pluviométrico e ao gradiente hidráulico.

Tendo em vista tais fatores, é nítida a diferenciação existente em grande parte dos limites da BSF:

1ª) as formas de relevo que se expressam em todas as suas porções do extremo norte, noroeste e nordeste, configuram um cenário em que os maciços mais elevados presentes nessa porção estão fragmentados, isolados e não compreendem massas rochosas potentes e nem contrastes altimétricos consideráveis que possam acomodar grandes descontinuidades, ressaltando ainda que a volumetria pluviométrica é incipiente e, em termos de balanço hídrico, pouco expressiva. Portanto, tais áreas refletem ambientes de pouca significância quanto ao trânsito de fluxos subterrâneos, a não ser, em nível muito localizado.

2ª) as formas de relevo situadas ao sul e a sudoeste se conformam, distintamente, a partir de relevos exteriores bastante contínuos, em extensas massas rochosas contíguas aos limites topográficos da BSF. Isso se traduz na presença de um potencial elevado tanto de contrastes altimétricos como em ambientes de significativa capacidade ao trânsito de fluxos subterrâneos em escala regional, domínios estes em que se encontram agregados os maiores índices pluviométricos regionais, ao redor da BSF.

3ª) as formas de relevo caracterizadas pela grande descontinuidade que se conforma a oeste do Chapadão Urucuia e, naturalmente, a oeste da BSF, é um caso didático de como a abrupta ruptura de relevo, marcada ao longo dos contrafortes da serra Geral de Goiás vem implicar em uma condição de favorecimento de exportação de água para uma bacia vizinha. Estudos comparativos indicam entre os valores de descarga subterrânea específica o ganho de aportes provenientes dos arenitos Urucuia, ao se avaliar as descargas específicas dos ambientes aquíferos que se conformam no sopé da referida serra, zona de cabeceira das drenagens tributárias da bacia dos rios Tocantins. Isso é retomado adiante com maiores detalhes sobre a avaliação das descargas específicas em ambos os compartimentos.

Como dito anteriormente, as características de porosidade intrínseca dos maciços precisam ser relacionadas também as condições estruturais, geomorfológicas e climáticas que regulam o aporte de água e o potencial de descarga desses sistemas. Essa análise é fundamental para análise da dinâmica hídrica em escala regional, como no caso de uma bacia de grande dimensão como a do rio São Francisco.

## 2.20 CARSTE NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

“Carste” é o termo usado para descrever o tipo especial de paisagem que se desenvolve sobre um substrato de rochas solúveis (como calcários, mármore e evaporitos), rico em cavidades e um extenso sistema de circulação de água subterrânea. O carste clássico refere-se às áreas de ocorrência de calcários, caracterizado pela presença de surgências, sumidouros, paredões, vales cegos, depressões fechadas e lagos associados às dolinas ou às extensas superfícies rebaixadas.

Os diversos condutos subterrâneos e as cavidades desenvolvidas nos maciços rochosos estão em grande parte conectados à superfície, o que permite a existência de fluxos hídricos de velocidade elevada entrando e saindo do substrato rochoso. Além das formas cársticas geradas pela dissolução da rocha, existem também feições construtivas, formadas pela precipitação de carbonato, como as turfas calcárias depositadas por águas saturadas em carbonato de cálcio e os espeleotemas.

A dissolução da rocha carbonática depende da presença de CO<sub>2</sub> na água. O CO<sub>2</sub> é proveniente do contato das águas da chuva com a atmosfera e os ácidos orgânicos presentes nos solos. A água acidificada é capaz de reagir com a rocha, principalmente com o mineral carbonato de cálcio (calcita), liberando íons bicarbonato. Esse fato endossa a importância da existência de solos e matéria orgânica para os processos de carstificação, e indica que os pontos de máxima dissolução ocorrem nos locais onde águas ácidas encontram diretamente a rocha. Existindo um perfil de solo, a dissolução ocorrerá principalmente no contato solo-rocha, em região denominada epicarste.

Cabe salientar que um dos principais fenômenos decorrentes, tanto em função das particularidades composicionais das rochas calcáreas (teores > 70% da matriz rochosa em CaCO<sub>3</sub>), como pela presença de uma porosidade secundária, é o desenvolvimento potencial de fluxos por condutos, os quais propiciam o aporte das águas subterrâneas de forma mais rápida do que nas porções porosas, desde as zonas de recarga até as fontes de descarga, na forma de surgências.

Assim, em terrenos calcários constituídos predominantemente por carbonato de cálcio, ocorre a dissolução da rocha pela ação da água, com modificação das formas,

alargamento das zonas porosas primárias e secundárias (juntas e fissuras) nos maciços rochosos e, conseqüentemente, a alteração das suas propriedades hidráulicas. Essas, por sua vez, criam condições diferenciadas para a circulação da água, que percorre o maciço rochoso em condutos abertos pela carstificação, formando caminhos para o fluxo da água difíceis de se prever ou mapear. Esses fluxos subterrâneos em áreas cársticas podem ocorrer em velocidades muito mais elevadas do que em outros aquíferos.

Em contraste a todos os demais sistemas aquíferos, os sistemas constituídos por material carbonático, possuindo o fator de dissolução como diferenciação preponderante, exibem permeabilidade influenciada diretamente pelas formas de alargamento das juntas e planos de acamamento das rochas, na medida em que as águas de circulação removem através da dissolução, o próprio material carbonático. Desse modo, em consideração ao tempo geológico de transformação mineral, o processo de dissolução mostra-se muito mais rápido, acarretando modificações extremamente significativas no sistema de fluxos subterrâneos, em curto espaço de tempo (KLIMCHOUK et al. 2001).

O contexto tectônico influencia a dinâmica do sistema cárstico, pois pode impor condições de maior energia sobre a movimentação da água. O sistema cárstico registra as características tectônicas dos maciços, tais como o estado de fraturamento e a posição dos níveis de base, assim como suas variações. A evolução do carste passa gradualmente a registrar as mínimas movimentações que afetam os maciços. Um evento de soerguimento corresponderia a um rebaixamento dos níveis de base e conseqüente escavação de cavidades em níveis inferiores. Eventos de subsidência induzem ao entulhamento dos condutos e/ou escavações de condutos em níveis superiores. Junto com o basculamento de blocos, esses movimentos podem ser responsáveis por importantes variações nas direções de drenagens subterrâneas e superficiais. Portanto, ao longo da história do desenvolvimento do carste, ocorrem distintos níveis de carstificação herdados de diferentes posicionamentos do nível d'água, de acordo com os períodos de rejuvenescimento e evolução do relevo.

Avançando na questão da dinâmica hídrica de regiões cársticas, deve-se salientar as formas de inter-relação existentes entre as águas subterrâneas e as águas de

superfície, dadas as características de fluxos através de surgências e sumidouros. Nesses pontos específicos, a água passa a participar da dinâmica hídrica subterrânea de forma muito mais rápida e concentrada do que nos sistemas não-cársticos.

As formas de infiltração no carste de modo difuso através das zonas de recarga estabelecidas em mantos de alteração do capeamento rochoso, não diferem muito daquelas descritas em ambientes hidrogeológicos não-cársticos. Contudo, a zona epicárstica, como citado em Kogovsek (1981), Gunn (1983), Williams (1983, 1985) e Klimchouk (2000, 2004), representa o elemento de interface entre solo e a rocha, que é normalmente abrupto entre o material rochoso alterado e os produtos de decomposição de porosidade granular. A importância desses fatores em estudos hidrogeológicos é devida à condição de recarga localizada na zona epicárstica, uma vez serem estabelecidas formas de armazenamento temporário ou vadoso, cujos volumes de água podem infiltrar após encontrarem as fraturas do topo do maciço carbonático.

Embora existam muitas pesquisas e trabalhos em diversas regiões cársticas do mundo, os seus resultados não podem ser diretamente aplicados para carstes desconhecidos, uma vez que suas características variam muito de um local para outro. Essas diferenças refletem não só o arcabouço geológico-estrutural do maciço, mas também variações climáticas e variações na própria qualidade da água que circula no sistema.

O avanço no conhecimento dos mecanismos de controle de sistemas aquíferos cársticos tem sido perseguido largamente, principalmente onde tais ambientes se mostram como fontes essenciais ao atendimento das diferentes demandas de abastecimento de água.

Os estudos de ambientes aquíferos cársticos têm sido crescentes no Brasil, dada, inicialmente, à ampla superfície territorial que é habitada neste sistema e a importância de se avançar no conhecimento sobre os mecanismos que controlam o desenvolvimento e a gênese desses aquíferos. Soma-se, ainda, a necessidade de se aperfeiçoar as formas de exploração dos mananciais hídricos nos ambientes cársticos, o que só pode ser alcançado a partir do uso de ferramentas de análise condizentes com os processos aos quais estão vinculados os mecanismos que regem sua dinâmica.

O carste pode ser tratado como um sistema composto por três domínios. O primeiro corresponde ao domínio superficial, o *exocarste*, marcado por formas na superfície desenvolvidas por meio do ataque químico de águas meteóricas, como *polijés*, uvalas, dolinas, simas, paredões e vales. O segundo corresponde às estruturas no interior dos maciços, o carste subterrâneo ou *endocarste*, representado pelas cavidades e sistemas de condutos gerados pela dissolução pelo contato com águas de diferentes origens. Entre eles, um terceiro domínio pode ser estabelecido, o *epicarste*, representando a zona logo abaixo da superfície que engloba o contato irregular entre o solo e o topo da rocha calcária.

Dentro da BSF as grandes unidades portadoras de calcários e dolomitos são as coberturas neoproterozoicas cratônicas, depositadas em ambientes marinhos rasos que ocupavam grandes áreas continentais pretéritas. A evolução do relevo sobre esses maciços hoje caracteriza um conjunto de feições exocársticas e endocársticas que ainda hoje são pouco conhecidas, apesar do avanço dos estudos espeleológicos na vastidão desses terrenos na BSF nas últimas décadas.

Karmann e Sanchez (1979) propuseram uma classificação das províncias espeleológicas no Brasil definindo quatro províncias: Província Una, Província Bambuí, Província Vale do Ribeira e Província Bodoquema. Na bacia do rio São Francisco ocorrem as províncias Bambuí e Una. Classificações mais recentes foram propostas por Auler, Rubbioli e Brandi (2001) e por CECAV (2009), culminando hoje em 19 regiões cársticas, incluindo zonas cársticas em rochas não carbonáticas.

A Província do Grupo Bambuí (KARMANN E SANCHEZ, 1979) foi subdividida em vários distritos, dentre os quais se pode destacar: São Domingos, Formosa, Distrito Vazante-Paracatu, Montes Claros, Cordisburgo, Lagoa Santa e Arcos-Pains. As diferentes províncias cársticas do Grupo Bambuí tem em comum o fato de estarem distribuídas em clima úmido, em condições de morfogênese tropical caracterizada por intenso processo de dissolução (CARVALHO JUNIOR *et al.*, 2008).

A Província do Grupo Una, além de suas diferenças geológico-estruturais, encontra-se na região semiárida do Brasil. Em razão da baixa pluviosidade, as taxas de dissolução tendem a ser bem mais reduzidas. Entretanto, conforme apontam os estudos de Auler

e Smart (2003), existem muitas evidências de alteração hipogênica no desenvolvimento das cavidades aí cadastradas.

As unidades litoestratigráficas portadoras de carbonatos nessas províncias são representadas pelas formações Sete Lagoas, Lagoa do Jacaré e localmente serra da Saudade, pertencentes ao Grupo Bambuí, e a Formação Salitre, pertencente ao Grupo Una, nas bacias de Irecê e Una-Utinga. Além dessas destaca-se o Grupo Vazante, localizado no extremo oeste da bacia dentro do contexto da Faixa Brasília, que também foi agrupado na Província espeleológica Bambuí.

As rochas carbonáticas pertencentes a Formação Caatinga (de idade cenozoica) apesar de ter área expressiva a norte do planalto cárstico de Irecê e no vale do rio Salitre, são ainda pouco estudadas e não tem grande destaque dentro do cenário espeleológico brasileiro. Essa unidade, dada a espessura restrita não tem a pujança como sistema aquífero cárstico, como as demais unidades destacadas acima.

O edifício estratigráfico formado pelas coberturas carbonáticas do paleo a neoproterozoico, é marcado por uma intercalação de calcários, dolomitos, margas, siltitos e folhelhos, e registra ciclos sedimentares originados das oscilações do nível do mar, aumento do espaço de sedimentação e aporte de sedimentos nas paleobacias de mares epicontinentais. Esses controles de sedimentação atuaram de forma diferente ao longo do tempo e espaço, dependendo das variações climáticas e da distribuição das tensões ao longo do período orogênico Brasileiro, que afetou diferencialmente o contexto geológico de tais unidades.

Essas características definem as propriedades hidráulicas próprias dos conjuntos rochosos, que, trabalhadas ao longo do tempo geológico, permitiram o desenvolvimento de diferentes padrões de carstificação. Esses diferentes padrões, ao longo dos distintos compartimentos climáticos, geotectônicos e geomorfológicos ganham significados distintos na dinâmica hídrica da BSF.

Visando agrupar as áreas de mesmo contexto geotectônico, com base nos mapas geológicos do estado de Minas Gerais e da Bahia (CPRM 2003 e CPRM/CBPM 2003), as regiões de ocorrência das unidades portadoras de rochas carbonáticas foram divididas em sete grandes domínios. Esses domínios, por sua vez, foram separados

em subdomínios que pudessem englobar áreas com pilha sedimentar semelhante e um mesmo padrão estrutural em escala regional.

Além disso, ao longo dos subdomínios são destacadas a presença das coberturas de porosidade granular ou não (especialmente aquelas de idade cretácea e cenozoica), que têm grande influência nos processos de recarga e nas formas de carstificação. A presença das coberturas impõe diferenças para a gestão dos recursos hídricos que precisa, em certas circunstâncias, discriminar as condições de carste exposto das condições do carste coberto.

Além disso, ao longo da descrição dos domínios e subdomínios foram diferenciadas as áreas onde existem zonas cársticas compostas essencialmente por calcários e/ou dolomitos em espessuras significativas daquelas áreas as quais encerram muitas intercalações não carbonáticas.

Na definição dos domínios, para as áreas de abrangência do Grupo Bambuí, foi utilizada como ponto de partida a divisão em compartimentos da bacia do São Francisco definidas no trabalho de Allkmin e Martins-Neto (2001). As demais divisões são propostas dos autores desse trabalho com base no entendimento geológico-estrutural, tendo em mente a funcionalidade de tais limites apenas para destacar propriedades hidrodinâmicas desses conjuntos rochosos.

A seguir, são descritos os domínios e subdomínios propostos.

### ***Domínio I – Vazante***

Próximo ao limite da borda oeste do cráton do São Francisco, na Faixa de dobramentos Brasília, localiza-se o Grupo Vazante (Figura 2.10). O Grupo Vazante está em contato com o Grupo Canastra (oeste) e o Grupo Bambuí (a leste), e apresenta geometria alongada, com *trend* NS. Nesse domínio e nas vizinhanças na porção leste, há um aumento considerável da espessura dos sedimentos, gradação de unidades carbonáticas para pelitos e uma grande variação faciológica, determinada pelo ambiente paleogeográfico (MISI, 2001).

Além dessas características, as rochas do domínio Vazante diferem-se das demais pelas características estruturais, definidas por uma intensa deformação dúctil e dúctil-

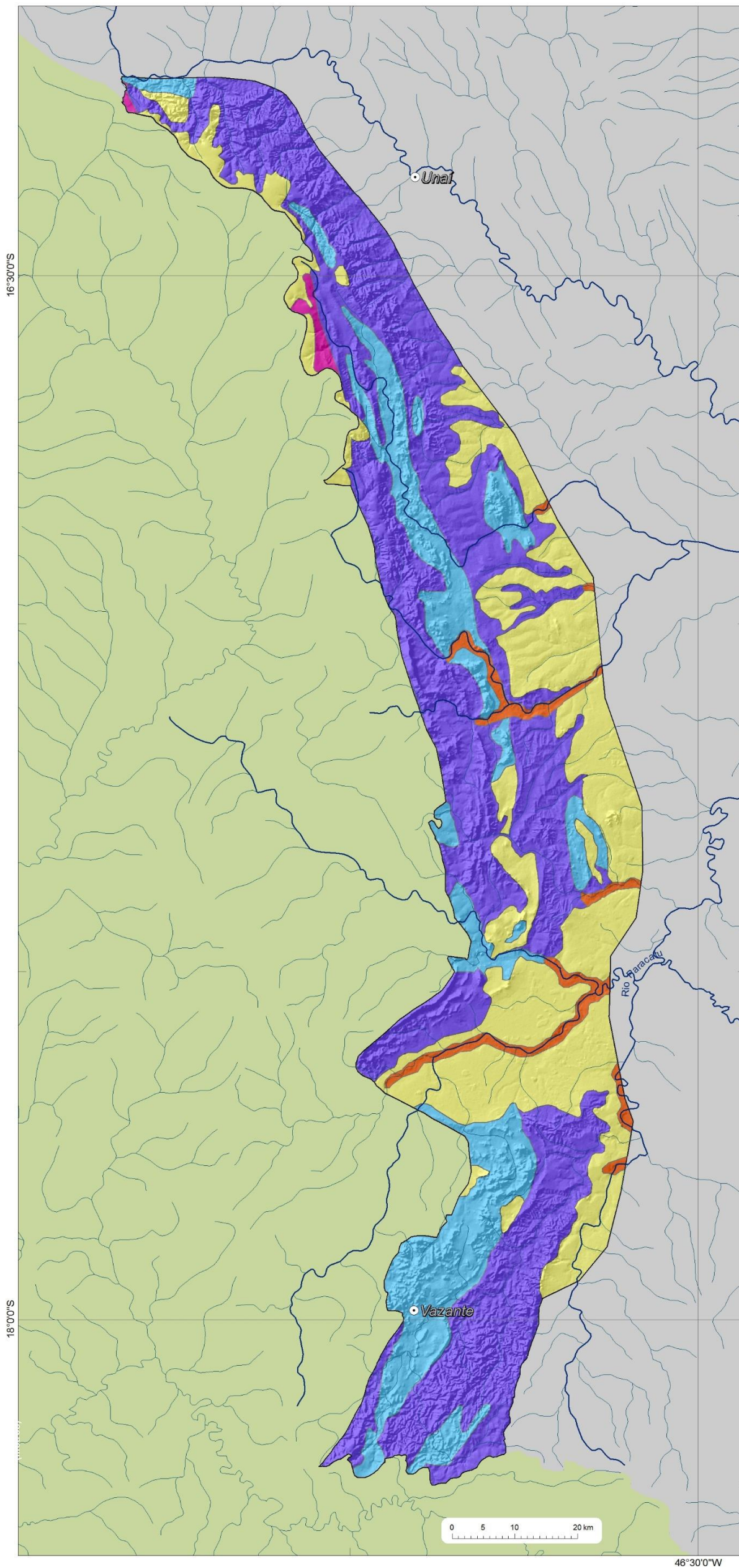


rúptil, associada a uma tectônica convergente (com formação de empurrões, dobramentos e superfícies de foliação penetrativa), sistema de falhas direcionais sinistrais e basculamentos.

A região diferencia-se também pela existência de rochas e estruturas produzidas em eventos hidrotermais. Após a deformação dúctil, dúctil-rúptil e o evento hidrotermal houve ainda uma quinta fase de deformação, com geração de estruturas rúpteis, como falhas extensionais e dois sistemas de fraturas. O hidrotermalismo, bem como as estruturas rúpteis, têm grande importância no desenvolvimento do carste na região (carste hipogênico).

O sistema cárstico de Vazante é complexo e bem desenvolvido, apresenta dezenas de cavernas mapeadas, dolinas, sumidouros e nascentes cársticas (BITTENCOURT E REIS NETO, 2012). Apresenta cavernas associadas a zonas de falhas e fraturas muitas vezes relacionadas a corpos mineralizados de zinco. Muitas das cavernas são bem desenvolvidas e preservadas, o que facilita o estudo detalhado de suas feições. Além disso, o carste na região chama atenção pela profundidade das cavernas e condutos, típicos da atividade hidrotermal.

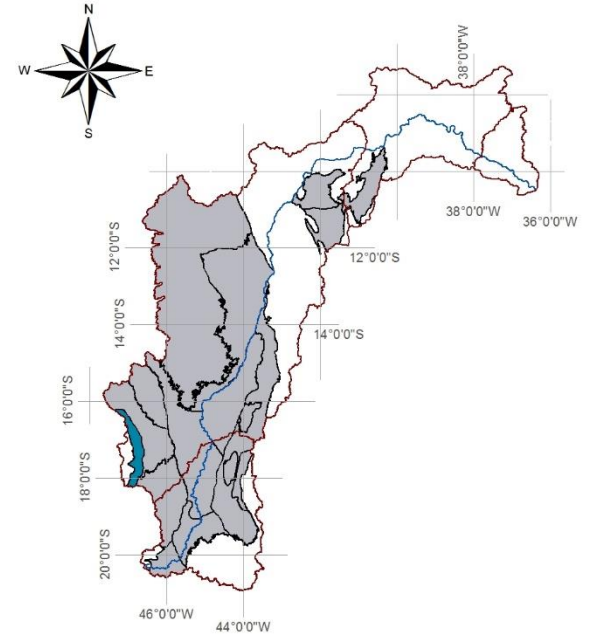
Domínio I - Grupo Vazante



Mapas de localização



Mapa de domínios de ocorrência de unidades carbonáticas



Legendas

- Sedes municipais
  - Zonas de descarga local
  - Zonas de descarga intermediária
  - Zonas de descarga regional
  - I - Grupo Vazante
- Unidades Geológicas**
- Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas
  - Depósitos aluvionares
  - Formação Paracatu
  - Grupo Vazante - Unidade A
  - Grupo Vazante - Unidade B

Figura 2.10 - Domínio I - Vazante .

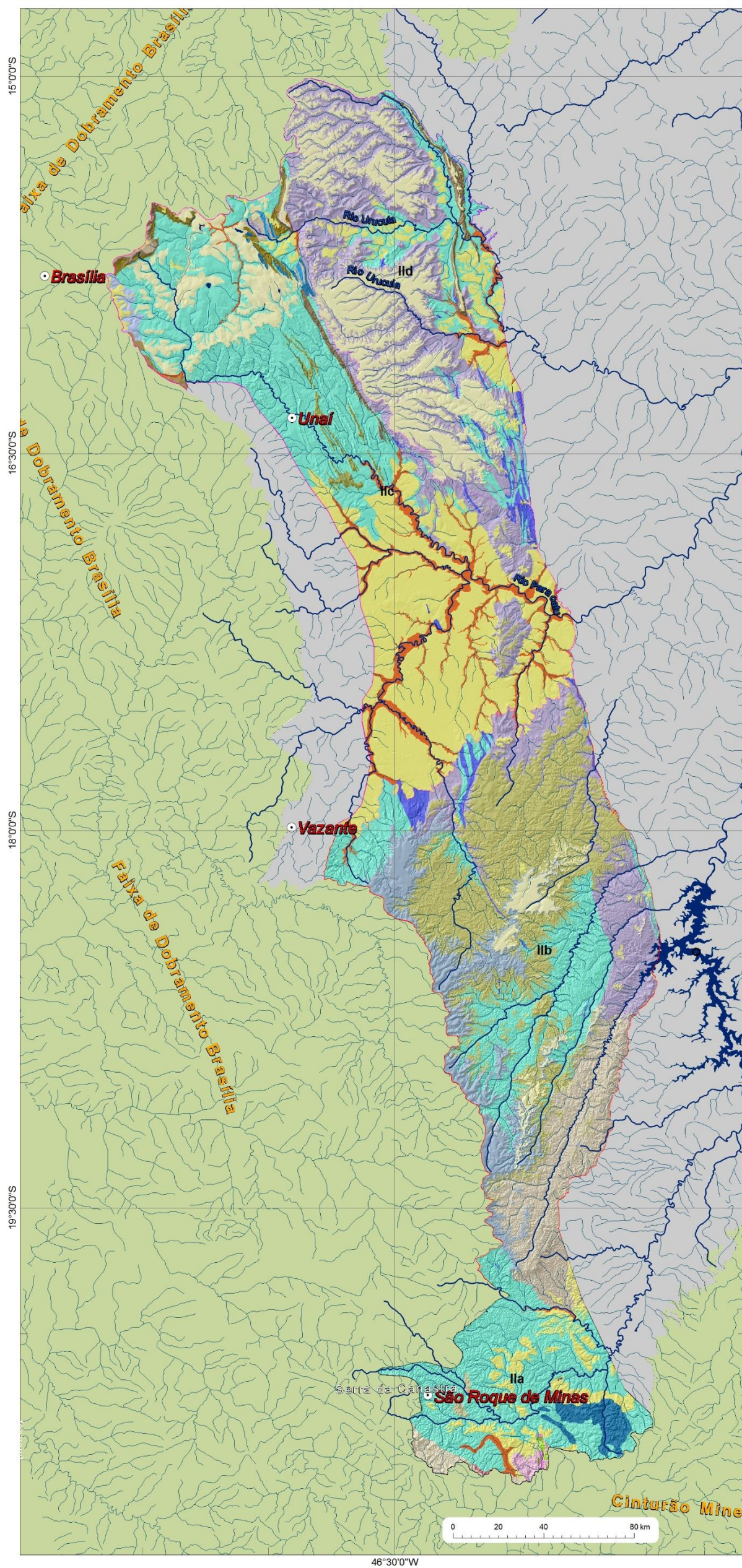
## **Domínio II – Grupo Bambuí deformado W**

O domínio II foi definido como o compartimento oeste de Allkmin e Martins-Neto (2001) e corresponde à zona externa das faixas de dobramento Brasília e Rio Preto, dentro da bacia do São Francisco, no contexto do Grupo Bambuí deformado. Caracteriza-se pela presença de dobras e falhas de empurrão relacionadas ou rotacionadas por sistemas transpressivos dextrais na porção norte e sinistrais na porção sul, com vários conjuntos de juntas. As estruturas alinham-se ao longo do eixo NS, com vergência de oeste para leste, e existe uma rotação das estruturas que, localmente, eliminam a vergência. Existe uma diminuição progressiva da deformação em direção ao interior do cráton (ALLKMIN E MARTINS-NETO, 2001).

O Domínio II (Figura 3.11) foi subdividido em 4 unidades:

- **Subdomínio IIa** - corresponde a porção sudoeste do cráton do São Francisco em Minas Gerais, e engloba as cidades de Arcos, Pains, São Roque de Minas e áreas a norte de Córrego Danta. Afloram, principalmente, rochas da base do Grupo Bambuí, com porções cobertas por sedimentos cenozoicos. Apresenta uma deformação marcante, com falhas transcorrentes dextrais que rotacionam e cortam os lineamentos marcados pela direção das charneiras de dobras NS a NNW-SSE. A sudoeste limita-se pelas *nappes* e falhas de empurrão da faixa Brasília e a leste em contato discordante erosivo com o embasamento cristalino.
- **Subdomínio IIb** – abrange as cidades de São Gotardo, Tiros, Varjão de Minas até João Pinheiro. Ocorrem áreas de afloramento de rochas intermediárias ou de topo do Grupo Bambuí sobrepostas por espessas coberturas cretáceas, especialmente os arenitos do Grupo Areado e as rochas vulcânicas do Grupo Mata da Corda. As rochas apresentam-se deformadas, e lineamentos marcados no relevo denotam um *trend* estrutural aproximadamente NS. Falhas de empurrão de direção NE-SW e NW-SE ocorrem ao longo da área.
- **Subdomínio IIc** –faixa de orientação aproximada NW-SW, passando por Bocaina, Unaí, Cabeceira Grande até Formosa, em Goiás. Nessa área, o substrato geológico é composto por rochas deformadas do Grupo Bambuí aflorantes ou sob extensas coberturas cenozoicas. Ressalta o padrão fortemente marcado por lineamentos NW-SE, sobretudo na porção norte do subdomínio.

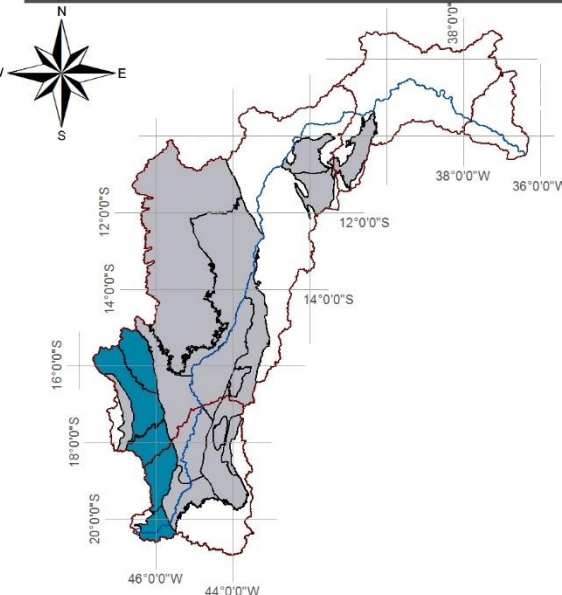
Domínio II - Grupo Bambuí Deformado Oeste



Mapas de localização



Mapa de domínios de ocorrência de unidades carbonáticas



Legendas

- Sedes municipais
- Zonas de descarga local
- Zonas de descarga intermediária
- Zonas de descarga regional
- II- Grupo Bambuí Deformado W
- Ila
- Ilb
- Ilc
- Ild
- Unidades Geológicas**
- Coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas
- Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas
- Depósitos aluvionares
- Grupo Urucua
- Grupo Areado
- Grupo Mata da Corda
- Grupo Santa Fé
- Grupo Araxá - Unidade A: hematita xisto, quartzito
- Formação Três Marias
- Subgrupo Paraopeba Indiviso
- Subgrupo Paraopeba - Calcário
- Subgrupo Paraopeba - Arenito
- Formação Serra da Saudade
- Formação Lagoa do Jacaré
- Formação Serra de Santa Helena
- Formação Sete Lagoas
- Formação Samburá
- Grupo Paranoá
- Grupo Paranoá - Unidade rítmica quartzítica intermediária
- Grupo Paranoá 1 - Conglomerática Rítmica Quartzítica Inferior
- Grupo Paranoá 2 - Silítico-ardosiana
- Grupo Paranoá 3 - Rítmica Quartzítica Intermediária
- Grupo Paranoá 4 - Rítmica Pelito-carbonatada
- Grupo Canastra Indiviso
- Formação Paracatu
- Formação Serra do Landim
- Grupo Vazante - Unidade A
- Grupo Vazante - Unidade B
- Formação Campos Gerais
- Unidade Divinópolis
- Unidade Plumhi - Grauvacas
- Unidade Plumhi - Intrusivas ácidas
- Unidade Plumhi - Pelitos carbonosos
- Unidade Plumhi - Metapelitos
- Unidade Plumhi - Vulcânicas básicas a intermediárias
- Metabasaltos/Metakomatiitos

Figura 2.11 - Domínio II – Grupo Bambuí Deformado Oeste

- **Subdomínio IId** – Afloram essencialmente rochas siliciclásticas da Formação Três Marias, que estão cobertas, em parte, por espessas coberturas cenozoicas. Rochas pelito-carbonáticas ocorrem localmente na porção oeste, acompanhando uma zona de falha de direção NW-SE.

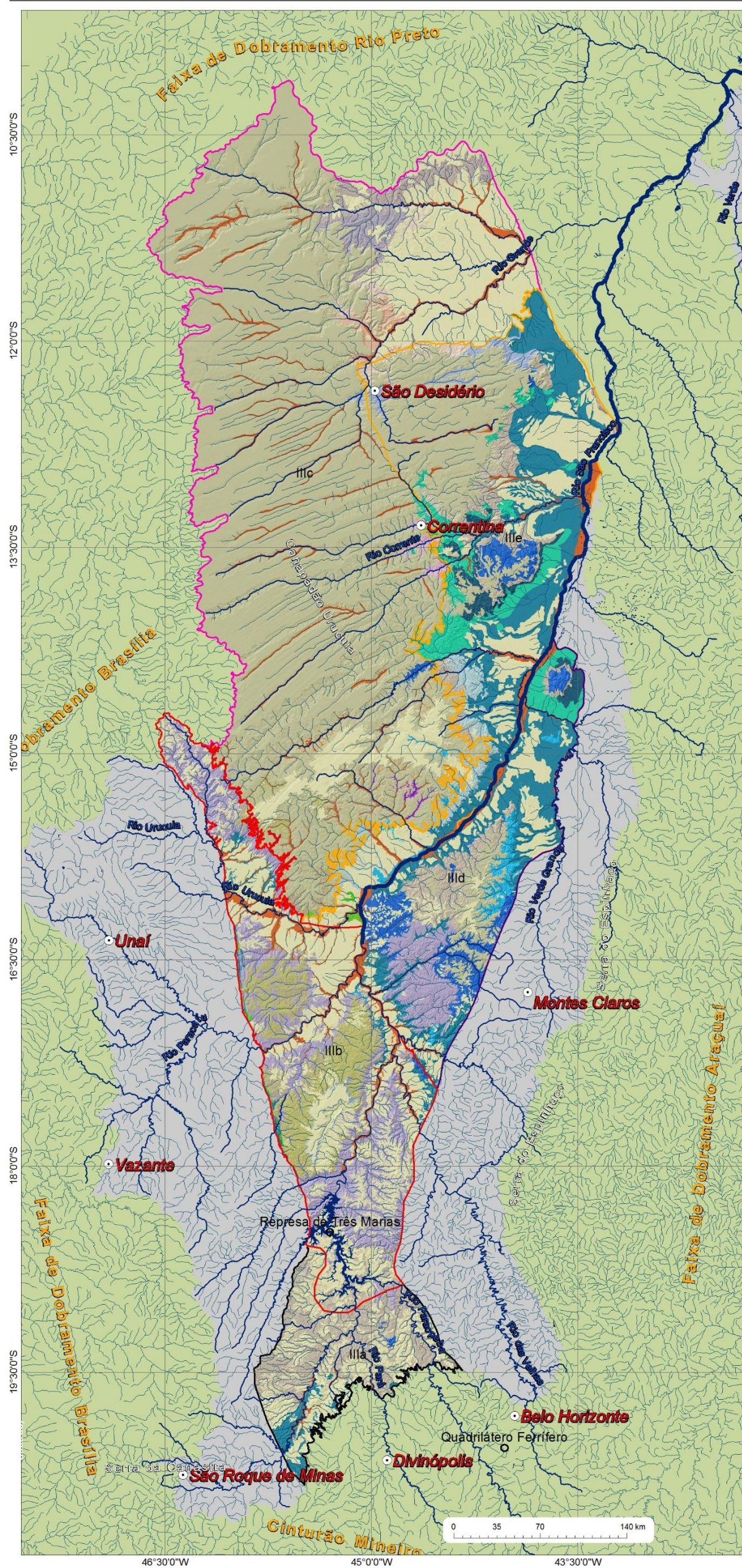
### **Domínio III - Grupo Bambuí indeformado a parcialmente deformado**

Corresponde ao compartimento central de Allkmin e Martins-Neto (2001) mais a porção norte do Chapadão Urucuia até as proximidades da Faixa Rio Preto (Figura 2.12). Delimita a porção da bacia onde as rochas do Supergrupo São Francisco não apresentam deformações significativas na porção sul e central da bacia, até a zona de transição que marca a influência tectônica da faixa Rio Preto, a norte de Barreiras. É o maior domínio definido, saindo do centro-sul de Minas Gerais e chegando até o norte da Bahia. Marca uma vasta superfície onde predominam os arenitos e pelitos da Formação Três Marias e os arenitos cretáceos do Grupo Urucuia. Ao longo da margem esquerda do rio São Francisco, saindo de Minas Gerais até a Bahia, há zonas alongadas de afloramentos de calcários da Formação Sete Lagoas e calcários e margas do subgrupo Paraopeba indiviso.

Esse domínio foi dividido em cinco subdomínios, definidos da seguinte forma:

- **Subdomínio IIIa** – delimita a porção centro-sul do domínio em Minas Gerais, saindo de Lagoa da Prata, Luz até Morada Nova de Minas. Caracteriza-se pela presença marcante de pelitos da Formação serra de Santa Helena e rochas do Subgrupo Paraopeba coberta por sedimentos cenozoicos.
- **Subdomínio IIIb** – Corresponde a zona marcada pela presença dos arenitos e pelitos da Formação Três Marias, com áreas onde afloram rochas cretáceas dos Grupo Areado e mais raramente do grupo Mata da Corda. Engloba cidades no centro-norte de Minas Gerais, como Três Marias, Pirapora, Santa Fé de Minas, Riachinho, prolongando-se até 175 km a norte.
- **Subdomínio IIIc** – Abrange a área de predominância das rochas do Grupo Urucuia, norte de Minas e toda a área do extremo sudoeste e noroeste da Bahia. Na área, as rochas carbonáticas quando presentes estão em profundidade, sem evidências de estruturas cársticas em superfície.

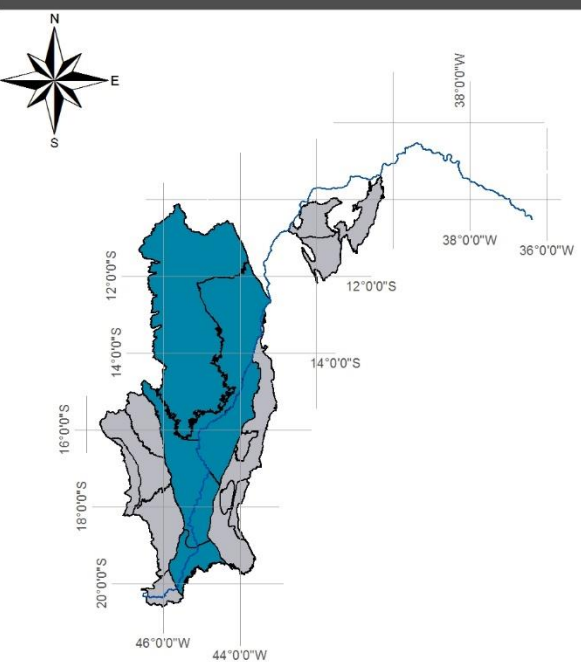
Domínio III — Grupo Bambuí indeformado a parcialmente deformado



Mapas de localização



Mapa de domínios de ocorrência de unidades carbonáticas



Legendas

- Sedes municipais
- Zonas de descarga local
- Zonas de descarga intermediária
- Zonas de descarga regional
- Grupo Bambuí Indeformado**
  - IIIa
  - IIIb
  - IIIc
  - IIId
  - IIIe
- Unidades Geológicas**
  - Coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas
  - Depósitos aluvionares
  - Grupo Uruçuia
  - Grupo Areado
  - Grupo Mata da Corda
  - Grupo Santa Fé
  - Formação Serra da Mamonas
  - Formação Riachão das Neves
  - Formação São Desidério
  - Formação Canabrinha
  - Formação Três Marias
  - Formação Três Marias - Arenito
  - Subgrupo Paraopeba
  - Subgrupo Paraopeba - Calcário
  - Formação Serra da Saudade
  - Formação Lagoa do Jacaré
  - Formação Lagoa do Jacaré - Calcário
  - Formação Serra de Santa Helena
  - Formação Sete Lagoas
  - Formação Sete Lagoas - Fácies 1
  - Formação Sete Lagoas - Fácies 2
  - Membro Lagoa Santa
  - Membro Pedro Leopoldo
  - Formação Januária
  - Formação Jequitai
  - Grupo Sítio Novo
  - Formação Garapa
  - Unidade Rio Preto
  - Granito Correntina
  - Unidade Divinópolis
  - Supergrupo Rio das Velhas
  - Grupo Nova Lima
  - Grupo Maquiné
  - Complexo Belo Horizonte
  - Complexo Riacho de Santana - Migmatitos

Figura 2.12 - Domínio III – Grupo Bambuí indeformado a parcialmente deformado

- **Subdomínio III d** – Abrange os terrenos não deformados a pouco deformados do Grupo Bambuí aflorantes na margem direita do rio São Francisco. Apresenta áreas de calcários expostos com muitas feições cársticas em superfície. Abrange as cidades de Coração de Jesus, Brasília de Minas, Japonvar, Varzelândia, Jaíba e Iuiú.
- **Subdomínio III e** - Abrange os terrenos não deformados a pouco deformados do Grupo Bambuí aflorantes na margem esquerda do rio São Francisco, partindo do norte de Minas, adentrando no estado da Bahia até a cidade de Baianópolis. Também apresenta áreas de calcários expostos do Grupo Bambuí com muitas feições cársticas em superfície. Abrange as cidades de Januária, Itacarambi, São João das Missões, serra do Ramalho, Brejolândia e Baianópolis.

#### **Domínio IV- Grupo Bambuí deformado E**

Abrange uma faixa alongada e estreita que atravessa a porção central de Minas Gerais até o sul da Bahia, englobando as localidades de Sete Lagoas, Curvelo, Montes Claros, Janaúba e Bom Jesus da Lapa. Corresponde ao compartimento estrutural leste da bacia do São Francisco definida por Allkmin e Martins-Neto (2001), onde afloram principalmente as rochas carbonáticas e pelito-carbonáticas do Grupo Bambuí.

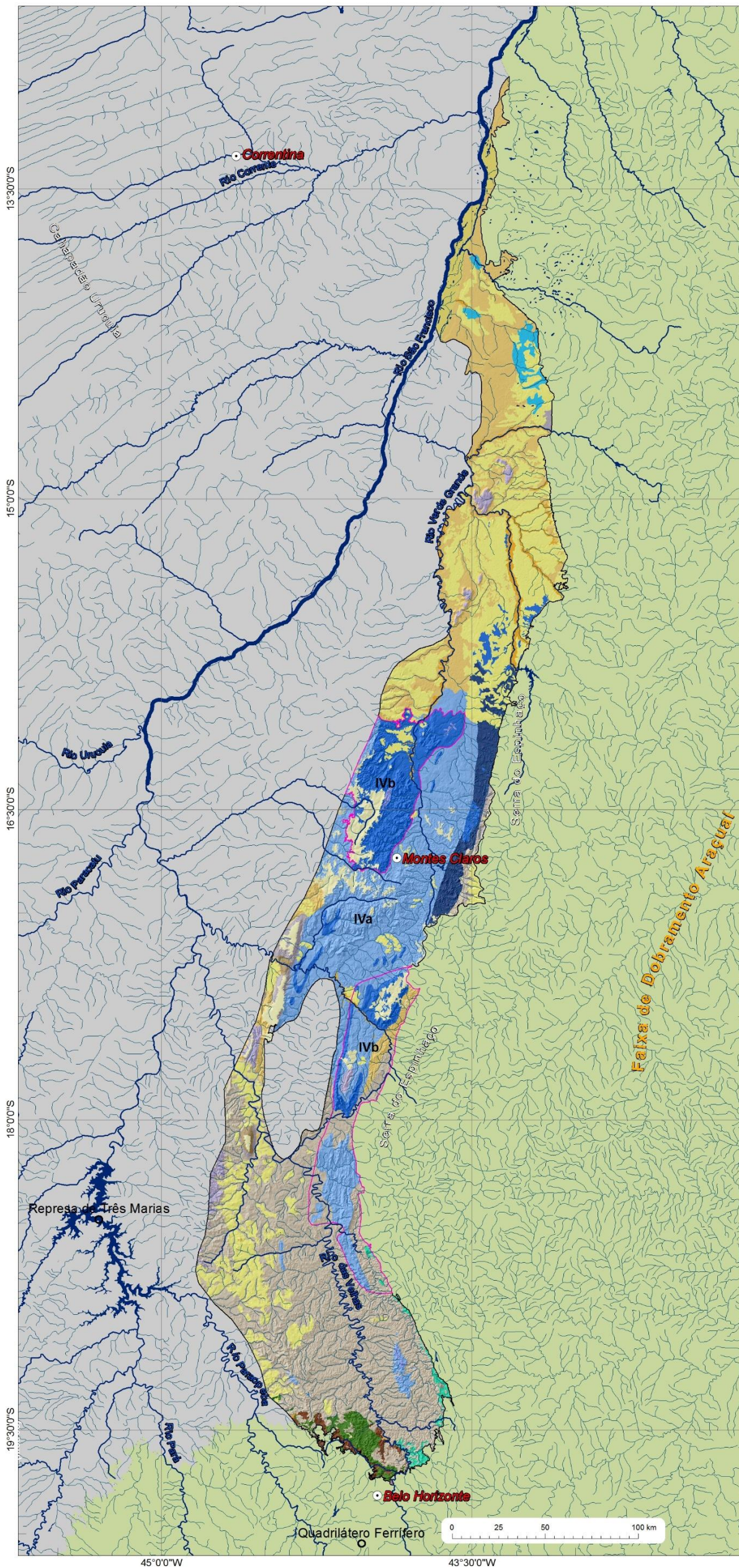
Apresenta como características marcantes (Figura 2.13) a presença de deformação pela influência da faixa de dobramentos Araçuaí, com dobramentos e foliação indicando esforços de leste para oeste. Segundo os autores acima citados, toda a deformação da cobertura pré-cambriana é isolada do embasamento por um deslocamento basal, que aflora ao longo de todo o limite sul do compartimento e também em várias janelas estruturais no interior do cinturão. Outra característica marcante desse domínio é a presença de uma clivagem plano-axial cuja expressão e penetrabilidade aumentam progressivamente em direção a leste. A mesma tendência observa-se para o metamorfismo das rochas, que é observado principalmente no extremo leste do domínio.

O domínio foi subdividido em duas partes:

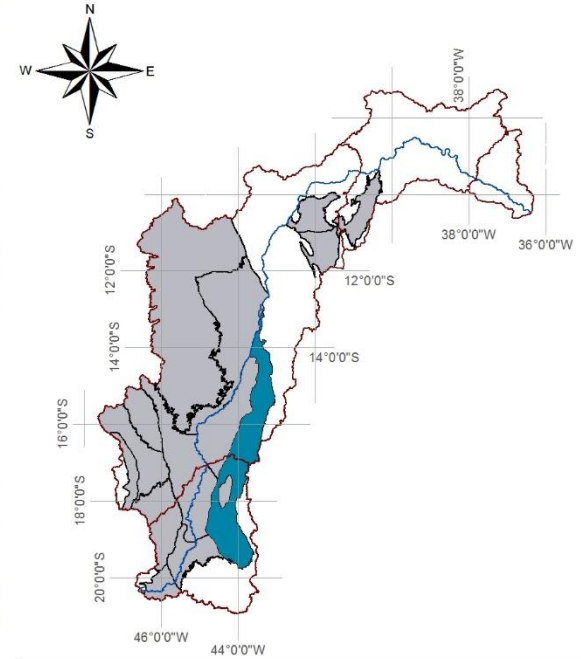
- **Subdomínio IVa** - abrange as áreas mapeadas como Subgrupo Paraopeba indiviso, aflorante ou sob coberturas cenozoicas.
- **Subdomínio IVb** - reúne áreas de afloramentos dos calcários da Formação Lagoa do Jacaré, que se apresentam mais intensamente deformados.

Domínio IV – Grupo Bambuí indeformado a parcialmente deformado

Mapas de localização



Mapa de domínios de ocorrência de unidades carbonáticas



Legendas

- Sedes municipais
- Zonas de descarga local
- Zonas de descarga intermediária
- Zonas de descarga regional
- IV- Grupo Bambuí Deformado E
  - IVa
  - IVb
- Unidades Geológicas**
  - Coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas
  - Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas
  - Depósitos aluvionares
  - Depósitos aluvionares antigos
  - Grupo Urucua
  - Formação Três Marias
  - Subgrupo Paraopeba
  - Formação Lagoa do Jacaré
  - Formação Lagoa do Jacaré, calcário
  - Formação Lagoa do Jacaré, marga
  - Formação Lagoa do Jacaré, siltito
  - Formação Serra de Santa Helena
  - Formação Sete Lagoas
  - Formação Sete Lagoas - Fácies 1
  - Formação Sete Lagoas - Fácies 2
  - Membro Lagoa Santa
  - Membro Pedro Leopoldo
  - Formação Jequitai
  - Grupo Macaúbas - Metassiltito
  - Grupo Macaúbas - Quartzito
  - Formação Serra do Catuni
  - Supergrupo Espinhaço Indiviso
  - Formação Santa Luzia
  - Grupo Santa Isabel
  - Grupo Porteirinha
  - Formação Córrego dos Borges
  - Formação Galho do Miguel
  - Formação Sopa-Brumadinho
  - Complexo Belo Horizonte

Figura 2.13 - Domínio IV – Grupo Bambuí indeformado a parcialmente deformado



### **Domínio V – Bacia de Irecê Sul**

A Bacia de Irecê localiza-se no norte do Cráton do São Francisco, no estado da Bahia, e reúne rochas metassedimentares neoproterozoicas pertencentes ao Grupo Una (Figura 2.14). Nesta região, os metassedimentos do Grupo Una assentam-se sobre as rochas do Supergrupo Espinhaço, representado pelos Grupos Paraguaçu e Chapada Diamantina e pela Formação Morro do Chapéu. A unidade carbonática principal é a Formação Salitre. Na área, as rochas carbonáticas encontram-se expostas ou cobertas por solos eluvionares ou coluvionares.

A porção da bacia de Irecê que está localizada dentro da área da bacia hidrográfica do rio São Francisco pode ser dividida em duas partes. A porção mais deformada da bacia de Irecê localiza-se a sul, onde as unidades mapeadas conformam um arranjo geométrico em “V”. Essa geometria reflete um interessante arranjo estrutural que pode ser explicado pela interação de esforços compressivos atuantes ao longo do ciclo brasileiro. No mapa geológico, observa-se um conjunto de falhas de empurrão de traço leste oeste, levemente abaulados, e lineamentos que marcam os eixos das dobras.

As características estruturais marcantes desse domínio são a heterogeneidade da deformação, com zonas de concentração da deformação onde se observam dobras apertadas, muito comumente isoclinais, vergentes preferencialmente para sul que ocorrem próximas aos falhamentos (KUCHENBECKER *et al.*, 2011). Os planos axiais das dobras apresentam mergulhos médios a altos, preferencialmente para N, causando a verticalização de acamamento em diversos locais. Em campo, verifica-se acentuada acilindricidade destas dobras, que pode ter sido intensificada por dobramentos posteriores. Em outras áreas, entretanto, observam-se os estratos sub-horizontais e sem dobramentos visíveis. A área do Domínio V engloba as cidades de Jussara, Irecê, Lapão, Ibipeba e Cafarnaum.

### **Domínio VI – Bacia de Irecê Norte**

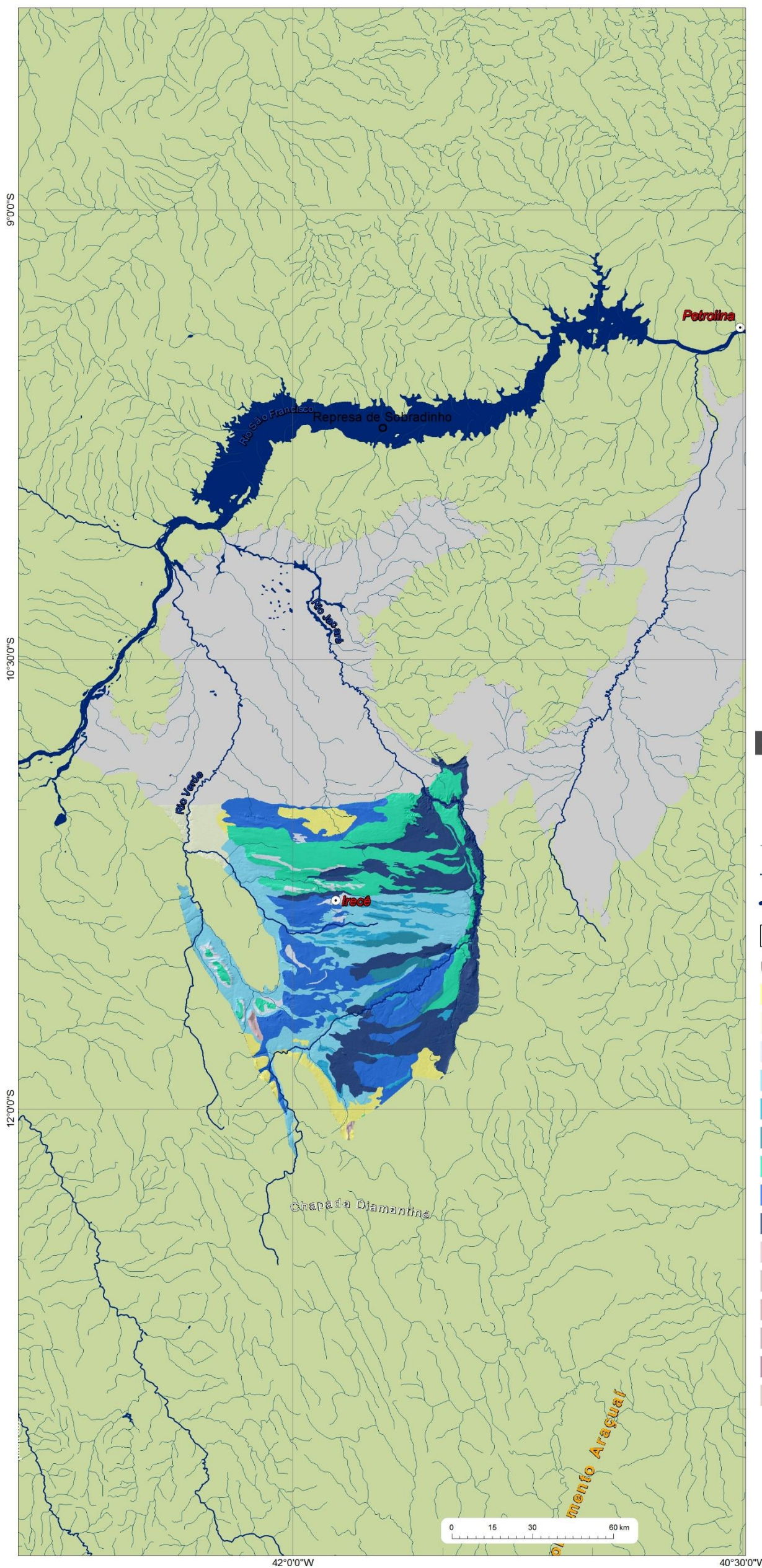
Ao norte da cidade de Jussara, a configuração das unidades geológicas da Bacia de Irecê é diferente da configuração na porção sul. Os metassedimentos neoproterozoicas não se apresentam mais confinados entre as unidades mais antigas, e não se observa

na trama estrutural a mesma intensidade de dobramentos e falhas na direção EW que se observa na porção sul.

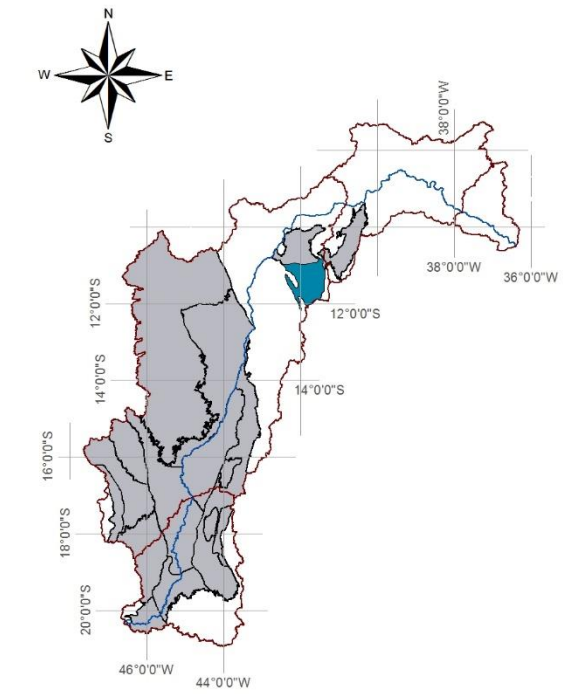
Outra mudança marcante é a existência de uma extensa cobertura cenozoica (coberturas detrito-lateríticas e Formação Caatinga) que cobre completamente os calcários da Formação Jussara (Figura 2.15).

### ***Domínio VII – Bacia Salitre***

O domínio VII localiza-se no norte do estado da Bahia e engloba as áreas a sul de Juazeiro até a cidade de Várzea Nova (Figura 2.16). Reúne ocorrências de rochas neoproterozoicas, estando entre elas, as unidades calcárias Unidade Nova América, Unidade Gabriel e Unidade Jussara, do Grupo Una. Essas unidades afloram principalmente em uma faixa NNE-SSW, entre unidades metassedimentares mesoproterozoicas e rochas cristalinas de idade paleoproterozoicas.



Mapa de domínios de ocorrência de unidades carbonáticas

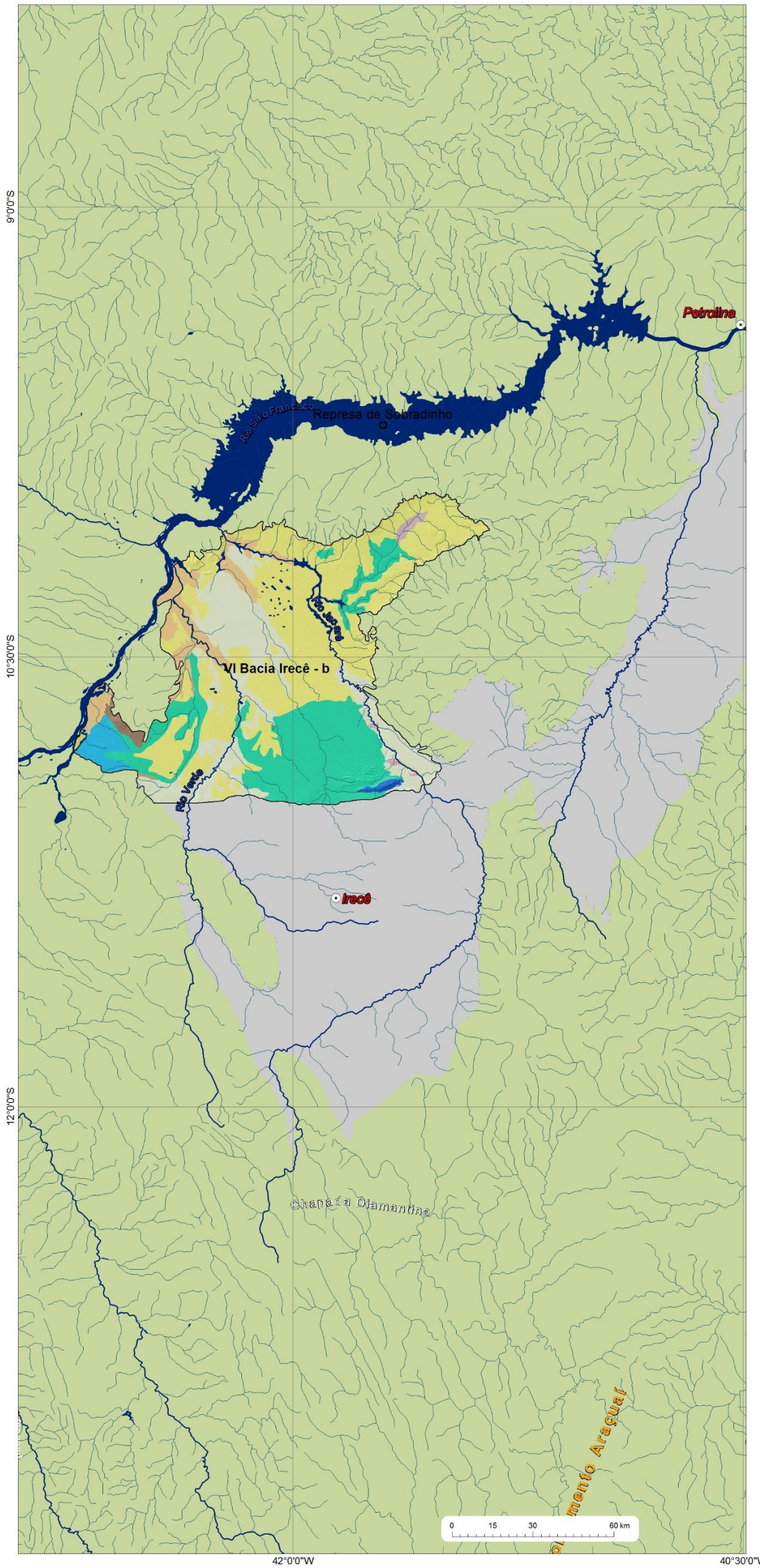


Legendas

- ⊙ Sedes municipais
  - Zonas de descarga local
  - Zonas de descarga intermediária
  - Zonas de descarga regional
  - V - Bacia Irecê Muito Deformada
- Unidades Geológicas**
- Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas
  - Formação Caatinga
  - Unidade Irecê
  - Unidade Nova América
  - Unidade Nova América - Subunidade Lapão
  - Unidade Nova América - Subunidade Sarandi
  - Unidade Jussara Médio e Inferior
  - Unidade Jussara Superior
  - Unidade Gabriel
  - Formação Bebedouro
  - Formação Morro do Chapéu Indivisa
  - Formação Morro do Chapéu - Fácies 2
  - Formação Morro do Chapéu - Fácies 3
  - Formação Morro do Chapéu - Fácies 4
  - Formação Morro do Chapéu - Fácies 5

Figura 2.14 - Bacia de Irecê Sul

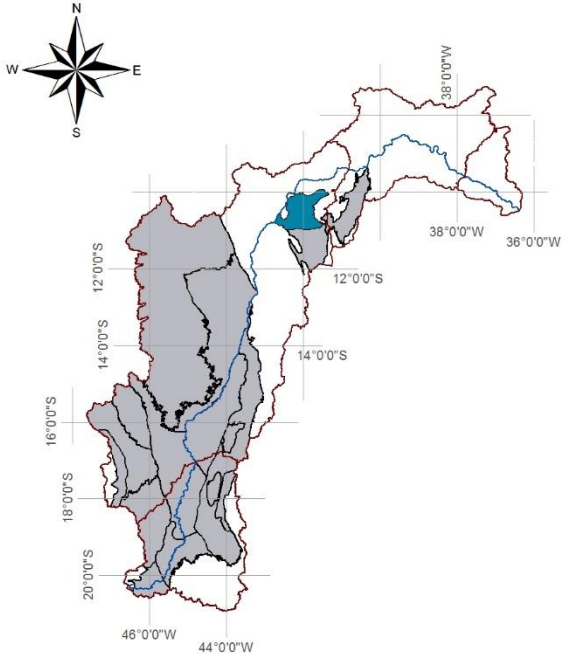
Bacia de Irecê pouco deformada



Mapas de localização



Mapa de domínios de ocorrência de unidades carbonáticas



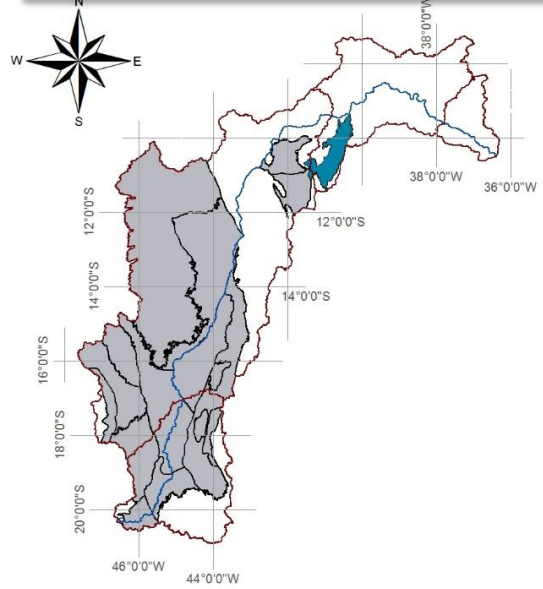
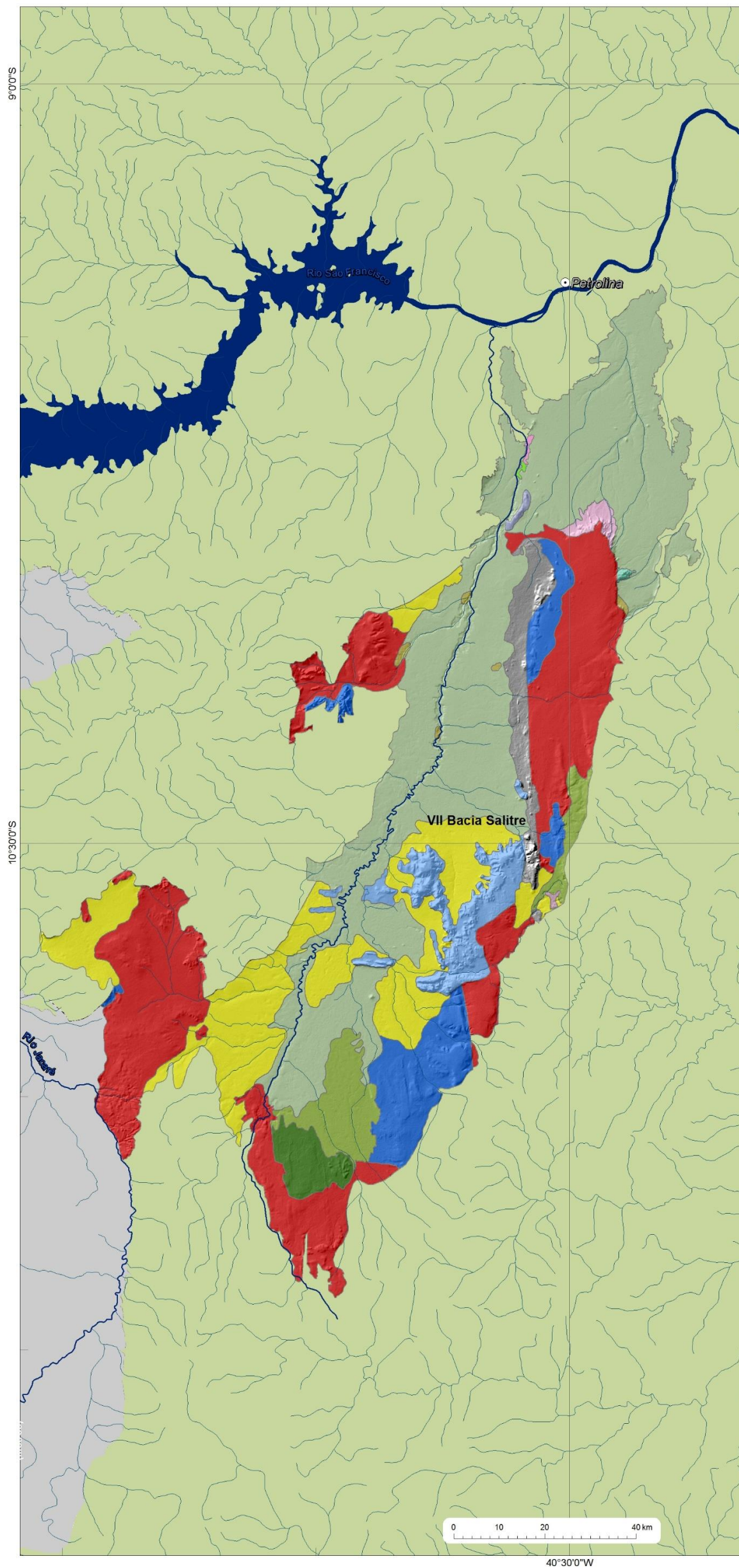
Legendas

- Sedes municipais
- Zonas de descarga local
- Zonas de descarga intermediária
- Zonas de descarga regional
- VI- Bacia de Irecê pouco deformada

Unidades Geológicas

- Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas
- Depósitos aluvionares
- Depósitos aluvionares antigos
- Formação Caatinga
- Unidade Nova América
- Unidade Jussara Superior
- Unidade Jussara Médio e Inferior
- Formação Bebedouro
- Formação Caboclo Indivisa
- Complexo Xique-xique

Figura 2.15 - Bacia de Irecê Norte



Legendas

- Sedes municipais
- Zonas de descarga local
- Zonas de descarga intermediária
- Zonas de descarga regional
- VII Bacia Salitre
- Unidades Geológicas**
- Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas
- Coberturas residuais
- Formação Caatinga
- Formação Salitre
- Unidade Nova América
- Unidade Jussara Médio e Inferior
- Unidade Gabriel
- Formação Bebedouro
- Formação Morro do Chapéu - fácies 2
- Formação Tombador - fácies 2
- Formação Itapicuru - fácies 1
- Granitoides Ortognaisses TTG migmatítico
- Unidade Granitos das regiões de Lagoa do Alegre e Rio Salitre
- Unidade Granitoides Lagoa D'anta - Lajedinho e Miguel Calmon

Figura 2.16 - Bacia Salitre

## 2.3 BALANÇO HÍDRICO

Apresenta-se a quantificação das parcelas hídricas que circulam nos sistemas fluviais, subterrâneos e atmosféricos ao longo dos distintos compartimentos que definem a bacia do rio São Francisco. Essa quantificação é essencial para o entendimento do funcionamento da bacia e para a definição de ações estratégicas visando à manutenção de seu ambiente natural e da população humana que dele depende.

Nesse estudo, tendo em vista a aplicação do balanço hídrico no âmbito da gestão dos recursos hídricos dos sistemas aquíferos cársticos e fissuro-cársticos em escala regional, foi adotado o método da análise dos hidrogramas para obtenção das parcelas hídricas. Utilizou-se dados históricos de postos fluviométricos e pluviométricos localizados em distintas partes da bacia do rio São Francisco para a avaliação da precipitação, escoamento superficial e infiltração (recarga dada pela análise das curvas de recessão dos hidrogramas) em cada uma das bacias hidrológicas representadas a montante dos pontos de monitoramento. Com essas parcelas calculadas foi possível estimar de forma indireta a parcela da evapotranspiração.

Os valores de infiltração são extremamente importantes para se estimar as reservas renováveis dos aquíferos. Os sistemas hidrogeológicos refletem em seu potencial hídrico as características geológicas, geomorfológicas e climáticas do contexto em que estão inseridas, bem como a influência de fatores de uso e ocupação da terra de suas áreas de recarga. As características intrínsecas determinam a capacidade do sistema de receber e armazenar a água. Entretanto, na análise do potencial hídrico de uma dada unidade ou sistema aquífero uma das dificuldades recorrentes consiste na delimitação da área de estudo, a fim de reconhecer os limites de interpretação que mais se relacionam aos alvos da análise.

A bacia hidrográfica tem sido tomada como unidade de gestão das águas. Porém, é reconhecido que esse limite não pode ser sempre adotado como referência para se compreender o potencial de recarga subterrânea dos sistemas aquíferos, uma vez que as rochas transmissoras de água podem situar-se em domínios subterrâneos que ultrapassam aos divisores topográficos que definem a bacia hidrográfica. Essa discussão é extremamente válida para os aquíferos cársticos, que dificilmente têm seus

limites hidrogeológicos vinculados às cumeadas topográficas que marcam no relevo os limites das bacias hidrológicas.

Por outro lado, o montante do escoamento superficial pode ser relativamente bem estimado utilizando os limites de uma bacia hidrográfica e os dados de medição de descarga líquida dentro da bacia. A disponibilidade hídrica superficial das bacias precisa ser conhecida e as medições de descarga fluvial aliadas ao monitoramento pluviométrico são as ferramentas para a realização desses cálculos.

Diante disso, a metodologia escolhida para o cálculo do balanço hídrico nos terrenos cársticos, com o objetivo de dar subsídios à gestão dos recursos hídricos, refere-se à análise de vazões medidas nos distintos corpos hídricos, associada a uma avaliação conceitual hidrogeológica. Essa avaliação é possível em função do conhecimento do comportamento hidrodinâmico de distintos aquíferos já obtidos ao longo dos anos em estudos de escalas distintas, permitindo que os valores de recarga obtidos através do método tradicional de análise dos hidrogramas fossem ponderados diante da ótica hidrogeológica, ou seja, a capacidade de armazenamento vinculada aos distintos tipos de rocha que constituem o ambiente conformado pela bacia.

É sabido que, em um curso d'água cujo regime de escoamento se mantém permanente, são as águas provenientes dos aquíferos que mantêm o deflúvio dessas calhas de drenagem no período de estiagem, ou seja, os aquíferos são responsáveis pela manutenção das descargas de base que afluem em uma dada bacia. Como as bacias de drenagem refletem um conjunto de tipologias litológicas diferenciadas, é exatamente a “qualidade do material geológico presente” que reflete o potencial hidrogeológico de sistema hídrico – hidrológico / hidrogeológico – considerando-se ainda os fatores relativos ao índice pluviométrico e ao gradiente hidráulico, os atributos que regulam os volumes aportados pelo sistema aos níveis de base locais/regionais.

Os valores obtidos para cada parcela do balanço hídrico, ao nível das bacias hidrográficas selecionadas, são então apresentados em tabelas e gráficos comparativos, a fim de mostrar os resultados obtidos para seus componentes ao longo da bacia do rio São Francisco. As bacias utilizadas foram selecionadas a partir de critérios específicos que visam assegurar a qualidade da análise e a representatividade

das distintas condições climáticas, geomorfológicas e geoestruturais dos sistemas cársticos e fissuro-cársticos e dos terrenos que compõem o seu entorno.

É importante salientar que, como qualquer metodologia direcionada à realização de cálculos estimativos multiparamétricos, há incertezas associadas ao seu uso e que os valores não devem ser tomados como absolutos, mas, como valores orientadores ou de referência, que auxiliam no processo de tomada de decisões que se voltam ao gerenciamento do aproveitamento dos recursos hídricos nos variados tipos de domínios hidrográficos, os quais devem ser continuamente aprimorados.

Incertezas devem invariavelmente ocorrer, não necessariamente em relação ao método, mas às condições particularizadas das bacias, por exemplo, em termos de suas formas de intervenção, pela presença de coberturas pedológicas sobre distintos tipos de rocha, ou ainda, a existência de superexploração de águas subterrâneas, ainda que localmente.

Nos itens 3.3.1 a 3.3.4 estão resumidos os cálculos do balanço hídrico por Domínio Isoietal. Importante ressaltar, que todos os valores apresentados para os parâmetros: vazão total, escoamento superficial e escoamento subterrâneo correspondem à média dos valores obtidos a partir da análise dos hidrogramas anuais nas estações selecionadas. Assim, conforme será apresentado a seguir, a análise foi elaborada para visualizar as variações dos valores anuais médios históricos obtidos a partir dos hidrogramas para as distintas estações.

Os resultados obtidos para as parcelas de precipitação, escoamento superficial, escoamento subterrâneo e evapotranspiração são apresentados na Tabela 2.3. A Figura 2.17 mostra em um gráfico de barras as parcelas do balanço hídrico obtidas para todas as estações analisadas (valores calculados em mm/ano).

As bacias selecionadas para o estudo ocorrem em contextos climáticos distintos, com médias de precipitação pluviométrica anuais que variam entre 460 mm/ano a 1660 mm/ano. As médias de pluviometria para cada bacia foram obtidas utilizando o mapa de isoietas. No mapa, foram analisadas as isoietas ao longo de toda a bacia hidrográfica associada a uma determinada estação pluviométrica. Assim, no lugar de



utilizar a média pluviométrica dos dados medidos na estação, foi adotado para o cálculo do balanço hídrico o valor da isoietal que atravessa a porção média da bacia estudada.

O menor valor medido refere-se à bacia da estação Abreus, na Bahia, e o maior valor à bacia da estação Fazenda Samburá, próximo a nascente do rio São Francisco. Dentre as bacias estudadas, 40 apresentam precipitação média anual entre 900 e 1300 mm/ano, em 24 bacias valores médios de precipitação iguais ou superiores a 1300 mm/ano e em 3 bacias, valores inferiores a 900 mm/ano.

Tomando como referência os valores de precipitação média para cada bacia, o escoamento superficial calculado para todas as bacias estudadas apresentou valor máximo de 45,2% na bacia da estação da Fazenda São Felix e mínimo de 0,2 % da precipitação total anual na bacia da estação Abreus. O montante equivalente ao escoamento subterrâneo calculado nas bacias não ultrapassa 27,3%, sendo os valores mínimos encontrados inferiores a 1 % das chuvas nas estações Abreus, Jaguaraci e Rio Verde II. Nessas três bacias, a evapotranspiração corresponde a mais de 98% das chuvas. Bastante diferente desse contexto, na bacia da estação Fazenda São Felix o valor de evapotranspiração foi calculado em 32,4 % das chuvas, sendo nessa mesma bacia encontrado os maiores valores do escoamento superficial e subterrâneo.

Tabela 2.3 - Resultados do cálculo do balanço hídrico para as bacias selecionadas. Valores dados em mm/ano e % anual

Estação Fluviométrica	Curso d'água	Área da bacia a montante da estação km <sup>2</sup>	Precipitação média anual mm	Escoamento superficial		Escoamento subterrâneo		Evapotranspiração	
				mm	%	mm	%	mm	%
Abreus	Rio Pacuí	12.091,0	460,0	0,8	0,2	1,2	0,3	458,0	99,6
Jaguarací	Rio Jacaré ou Vereda do Romão	9.446,7	481,7	1,2	0,3	1,0	0,2	479,4	99,5
Rio Verde II	Rio Verde	7.008,2	646,1	8,2	1,3	3,3	0,5	634,6	98,2
Estação de Curimataí	Rio Curumataí	1.371,8	938,2	317,7	33,9	92,5	9,9	528,0	56,3
Colônia do Jaíba	Rio Verde Grande	12.175,1	950,0	31,2	3,3	15,2	1,6	903,6	95,1
Juvenília	Rio Caririnha	15.971,8	950,0	78,1	8,2	209,1	22,0	662,7	69,8
Porto Novo	Rio Corrente	31.409,6	950,0	54,2	5,7	164,2	17,3	731,6	77,0
Ponte do Bicudo	Rio do Bicudo	2.033,2	956,5	183,1	19,1	104,4	10,9	669,0	69,9
Fazenda Redenção	Rio de Ondas	5.322,2	992,4	85,8	8,6	214,0	21,6	692,6	69,8
Fazenda Bom Retiro	Rio Japoré	600,2	1000,0	45,5	4,5	51,4	5,1	903,1	90,3
Capitão Eneás	Rio Verde Grande	3.541,3	1000,0	49,3	4,9	16,1	1,6	934,7	93,5
Capitânea	Rio Coxá	2.488,9	1050,0	55,8	5,3	101,6	9,7	892,6	85,0
Usina do Pandeiros - Montante	Rio Pandeiros	3.718,6	1050,0	70,8	6,7	127,7	12,2	851,4	81,1
Mocambo	Rio Guará	8.625	1070,0	45,1	4,2	107,1	10,0	917,9	85,8
Boqueirão	Rio Grande	46.884,7	1075,0	49,4	4,6	128,9	12,0	896,7	83,4
Vila Uruçuia	Rio Uruçuia	18.495,9	1084,9	199,4	18,4	151,0	13,9	734,5	67,7
Barreiras	Rio Grande	18.959,6	1094,3	46,5	4,2	134,0	12,2	913,8	83,5
Arrojado	Rio Arrojado	5.650,2	1100,0	65,5	6,0	263,0	23,9	771,5	70,1
Fazenda Umburana - Montante	Rio Jequitaiá	6.817,0	1100,0	131,8	12,0	62,8	5,7	905,4	82,3
Colônia do Formoso	Rio Formoso	10.200,7	1100,0	54,0	4,9	201,0	18,3	845,0	76,8
Lagoa das Pedras	Rio Caririnha	12.173,0	1100,0	90,4	8,2	249,6	22,7	760,1	69,1
Fazenda Porto Limpo	Rio Preto	22.459,0	1100,0	43,5	4,0	106,2	9,7	950,3	86,4
Santo Inácio	Rio Uruçuia	23.759,0	1100,0	176,9	16,1	144,2	13,1	778,9	70,8
Tagua	Rio Grande	36.564,9	1100,0	24,6	2,2	68,5	6,2	1006,9	91,5
Sítio Grande	Rio Grande	5.012,8	1122,7	57,6	5,1	147,8	13,2	917,2	81,7
Porto da Extrema	Rio Paracatu	30.043,3	1125,4	189,8	16,9	170,9	15,2	764,7	68,0
Ponte da BR-040 Prata	Rio da Prata	3.509,3	1129,6	301,1	26,7	167,9	14,9	660,5	58,5
Claro dos Poções	Rio São Lambertito	447,1	1150,0	209,5	18,2	73,0	6,3	867,6	75,4
Ponte dos Ciganos	Rio Pacuí	1.372,4	1150,0	76,8	6,7	70,7	6,1	1002,5	87,2
Derocal	Rio das Fêmeas	6.430,7	1150,0	65,0	5,6	183,8	16,0	901,2	78,4
São Sebastião	Rio Grande	33.614,6	1150,0	48,2	4,2	131,5	11,4	970,3	84,4
Fazenda Coqueiro	Rio São Desidério	6.360,7	1172,0	13,4	1,1	18,5	1,6	1140,0	97,3
Ponte Preta	Rio Jabuticabas	576,0	1200,0	216,5	18,0	154,3	12,9	829,2	69,1
Ponte do Picão	Ribeirão do Picão	847,5	1200,0	77,0	6,4	44,9	3,7	1078,1	89,8
Presidente Juscelino - Jusante	Rio Parauninha	3.994,5	1200,0	410,8	34,2	195,8	16,3	593,4	49,4
Nova Vida - Montante	Rio Branco	7.743,6	1200,0	48,9	4,1	160,5	13,4	990,5	82,5
Porto Alegre	Rio Paracatu	41.158,7	1200,0	191,4	16,0	173,5	14,5	835,1	69,6
Fazenda Carvalho	Rio São Domingos	3.156,5	1220,0	244,4	20,0	211,5	17,3	764,1	62,6
Várzea da Palma	Rio das Velhas	26.517,4	1220,2	202,1	16,6	155,0	12,7	863,1	70,7
Vespasiano	Ribeirão da Mata	723,1	1221,9	182,2	14,9	171,6	14,0	868,0	71,0
Ponte da Taquara	Rio Paraopeba	8.792,9	1238,8	218,3	17,6	229,0	18,5	791,6	63,9
Arinos - Montante	Rio Uruçuia	11.757,0	1245,6	204,7	16,4	179,0	14,4	861,8	69,2
Santa Rosa	Rio Paracatu	12.951,9	1267,6	207,9	16,4	196,9	15,5	862,7	68,1
Cachoeira das Almas	Rio do Sono	4.211,8	1300,0	228,8	17,6	158,5	12,2	912,7	70,2
Ponte da BR-040 Paracatu	Rio Paracatu	7.672,4	1314,4	222,6	16,9	189,8	14,4	902,1	68,6
Buritis-Jusante	Rio Uruçuia	2.829,4	1325,0	295,6	22,3	168,1	12,7	861,3	65,0
Fazenda Barra da Égua	Ribeirão Barra da Égua	1.545,5	1330,0	193,3	14,5	159,3	12,0	977,4	73,5
Fazenda São Félix	Rio Borrachudo	944,7	1345,2	608,2	45,2	301,3	22,4	435,6	32,4
Porto dos Poções	Rio Preto	9.289,1	1350,0	198,4	14,7	191,3	14,2	960,3	71,1
Calciolândia	Rio São Miguel	329,5	1350,0	232,1	17,2	145,9	10,8	972,0	72,0
Barra do Escurinho	Ribeirão do Escurinho	2.060,2	1350,0	202,9	15,0	206,6	15,3	940,5	69,7
Ponte do Licínio - Jusante	Rio das Velhas	10.569,2	1350,0	200,7	14,9	204,8	15,2	944,5	70,0
Major Porto	Ribeirão Areado	1.192,6	1350,3	302,9	22,4	218,7	16,2	828,7	61,4
Fazenda Poções	Rio São Pedro	581,0	1386,0	260,6	18,8	204,6	14,8	920,8	66,4
Fazenda Córrego do Ouro	Rio Escuro	1.849,4	1393,1	226,3	16,2	260,0	18,7	906,9	65,1
Ponte do Chumbo	Rio São Francisco	9.963,8	1450,0	266,6	18,4	302,5	20,9	880,9	60,8
Porto do Passarinho	Ribeirão dos Tiros	4.135,7	1475,0	332,5	22,5	207,8	14,1	934,7	63,4
Veredas	Rio Santo Antônio	219,4	1490,0	246,4	16,5	237,2	15,9	1006,5	67,5
Abaeté	Ribeirão Marmelada	393,8	1500,0	336,3	22,4	228,1	15,2	935,5	62,4
Martinho Campos	Rio Picão	759,5	1500,0	176,5	11,8	173,4	11,6	1150,1	76,7
Porto Indaiá e Barra do Funchal	Rio Indaiá	2.206,7	1500,0	332,8	22,2	206,3	13,8	960,9	64,1
Iguatama	Rio São Francisco	5.382,1	1500,0	286,3	19,1	342,0	22,8	871,6	58,1
Santo Hipólito (ANA/CEMIG)	Rio das Velhas	16.634,3	1500,0	209,4	14,0	183,8	12,3	1106,9	73,8
Taquaral	Rib. São Mateus Grande	581,8	1550,0	308,0	19,9	249,4	16,1	992,7	64,0
Tapiraí Jusante	Rio Perdição	593,9	1650,0	262,4	15,9	389,2	23,6	998,4	60,5
Fazenda da Barra	Rio Santo Antônio	763,6	1650,0	540,8	32,8	435,7	26,4	673,4	40,8
Fazenda Samburá	Rio Samburá	760,4	1660,0	329,4	19,8	453,1	27,3	877,5	52,9
	máximo	46.884,7	1660,0	608,2	45,2	453,1	27,3	1150,1	99,6
	mínimo	219,4	460,0	0,8	0,2	1,0	0,2	435,6	32,4
	média	9.078,3	1202,7	177,2	13,8	169,7	13,4	855,8	72,8
	mediana	5.322,2	1200,0	193,3	15,0	170,9	13,9	892,6	70,1

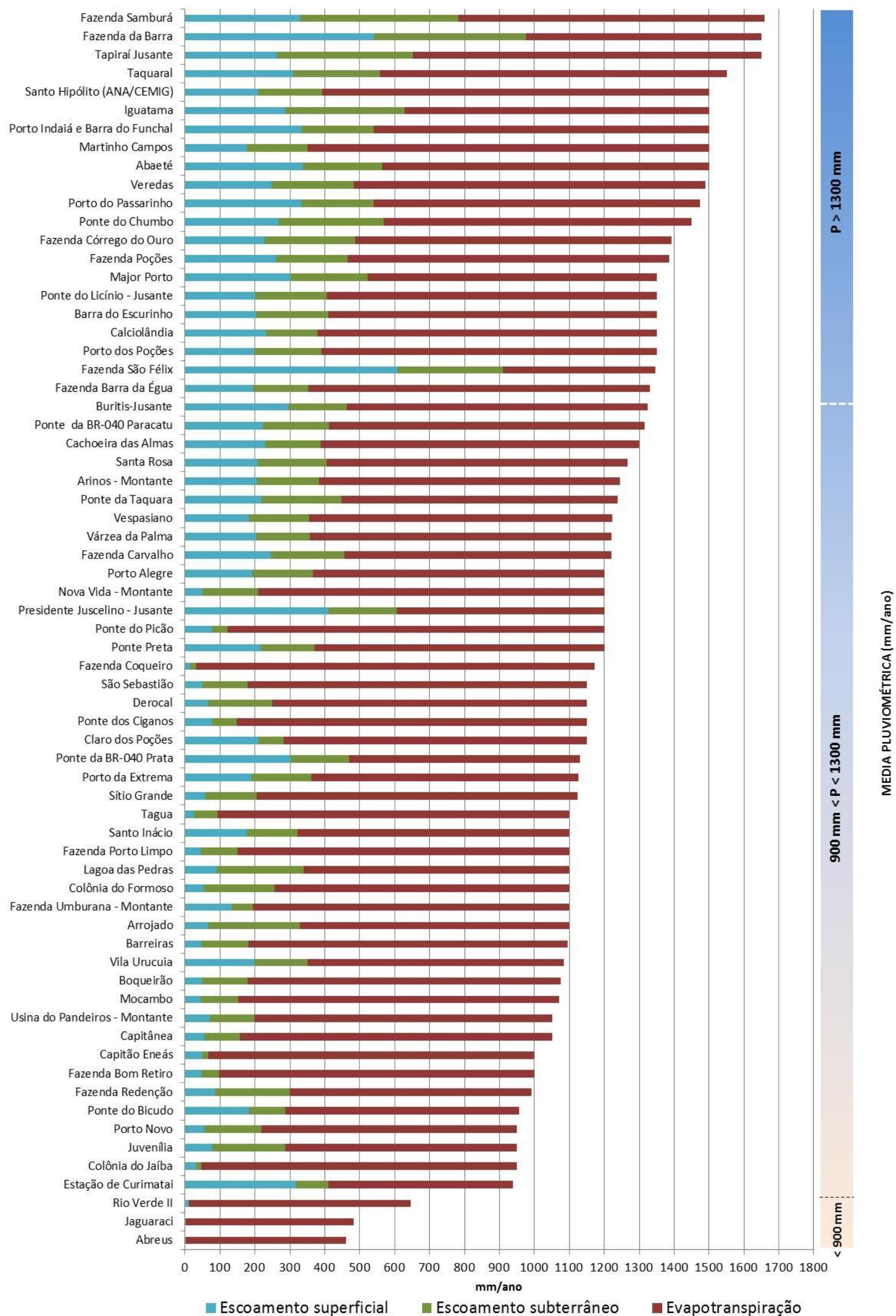


Figura 2.17 - Resultado do balanço hídrico por bacia dado em mm/ano

### **2.3.1 Balanço Hídrico no Domínio Isoietal I**

O Domínio Isoietal I conforma-se ao longo de 84.036 km<sup>2</sup>, abrangendo 24 bacias vinculadas às estações fluviométricas selecionadas (Figura 2.18). Os limites das bacias encontram-se parcial ou totalmente dentro do domínio avaliado. As bacias estudadas apresentam áreas distintas, sendo a menor das bacias aquela traçada para a estação Veredas (219,4 km<sup>2</sup>) e a maior bacia aquela definida para a estação Santo Hipólito (16.634,3 km<sup>2</sup>). A Tabela 2.4 apresenta as características hidrológicas das bacias pertencentes ao Domínio Isoietal I. São apresentados na Tabela 2.4, e descritos a seguir, os valores médios anuais obtidos na análise das séries históricas (valores calculados a partir dos hidrogramas): precipitação, vazão total, vazão total específica, escoamento superficial, escoamento subterrâneo e descarga subterrânea específica.

O valor máximo da precipitação observado no Domínio Isoietal I corresponde a 1.660 mm junto à estação Fazenda Samburá, sendo os segundo e terceiro maiores valores aqueles medidos nas estações Fazenda da Barra, no rio Santo Antônio, e Tapiraí Jusante no rio Perdição (1.650 mm) e estação Fazenda Taquaral, no ribeirão São Mateus Grande (1.550 mm). O valor médio de precipitação anual nas estações analisadas corresponde a 1.440 mm/ano.

Os hidrogramas analisados para as 24 estações fluviométricas indicaram vazões (vazão total) nas seções avaliadas, entre 3,36 m<sup>3</sup>/s (Estação Veredas) e 207,36 m<sup>3</sup>/s (Estação Santo Hipólito-ANA/CEMIG), com valor médio equivalente a 52,6 m<sup>3</sup>/s e mediana igual a 27,0 m<sup>3</sup>/s (Figura 3.19). A vazão total específica das bacias varia entre 11,1 l/s.km<sup>2</sup> (Martinho Campos) e 30,97 l/s.km<sup>2</sup> (Fazenda da Barra), com valor médio do grupo equivalente a 16,7 l/s.km<sup>2</sup> e mediana igual a 15,4 l/s.km<sup>2</sup> (Figura 2.20).

Os valores de escoamento subterrâneo máximo e mínimo calculados para esse mesmo conjunto de estações correspondem a 96,9 m<sup>3</sup>/s (Estação Santo Hipólito-ANA/CEMIG) e 1,5 m<sup>3</sup>/s (Calciolândia) respectivamente, sendo o valor médio do domínio igual a 25,0 m<sup>3</sup>/s e mediana igual a 12,2 m<sup>3</sup>/s. Calculando-se a descarga subterrânea específica para as bacias, os valores variam entre 4,6 l/s.km<sup>2</sup> (Calciolândia) e 14,4 l/s.km<sup>2</sup> (Fazenda Samburá). O valor médio da descarga subterrânea específica do domínio avaliado é igual a 7,7 l/s.km<sup>2</sup> e o valor da mediana 6,6 l/s.km<sup>2</sup>.

Domínios Isoietais na bacia do rio São Francisco

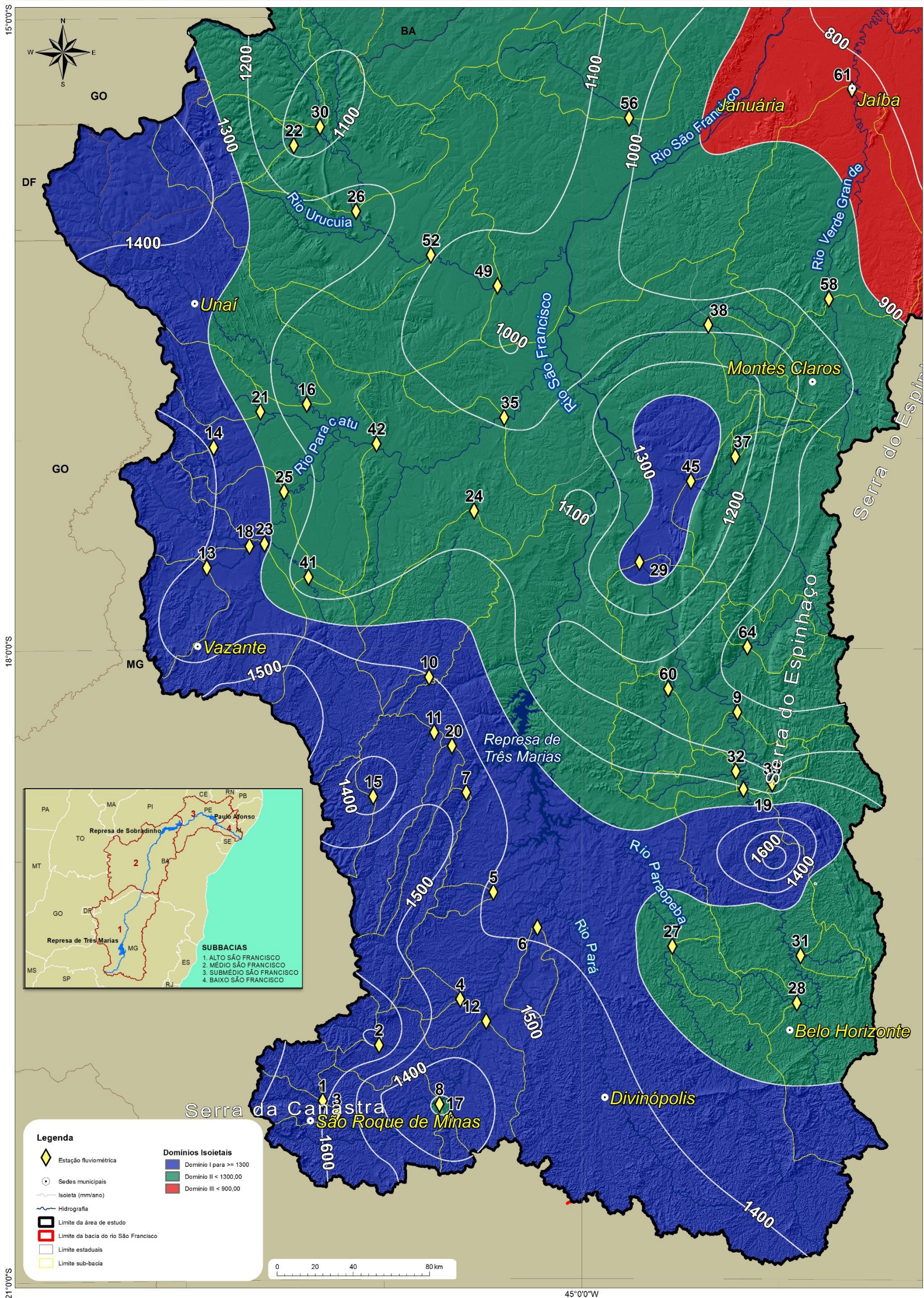
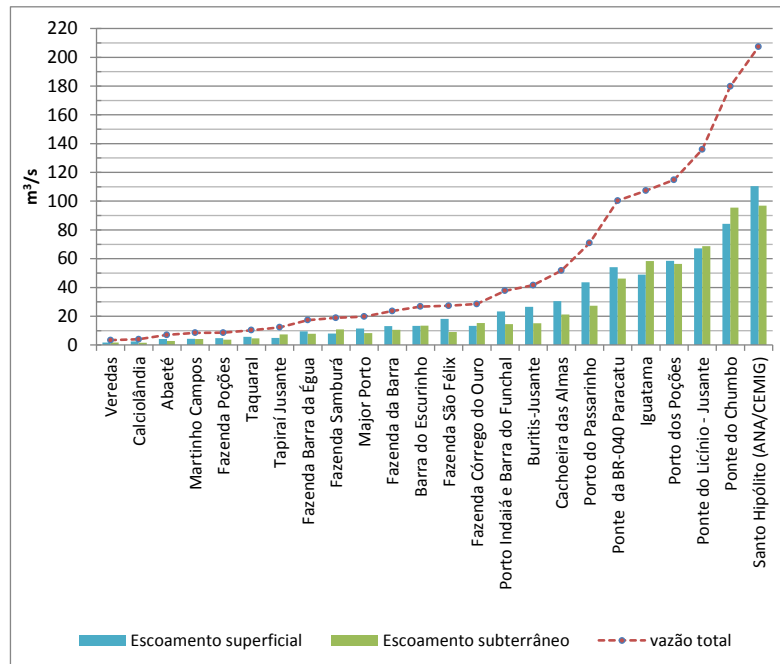


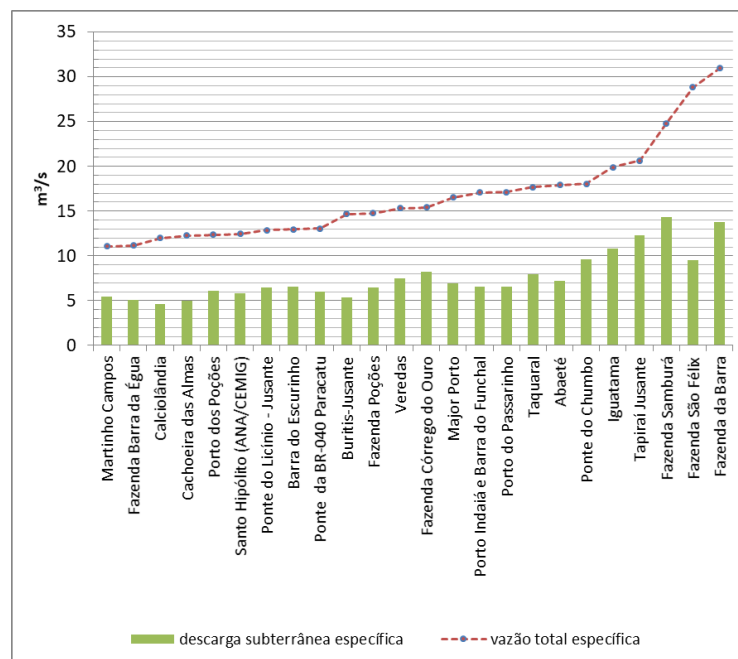
Figura 2.18 - Domínio Isoietal I

Tabela 2.4 - Parcelas do balanço hídrico no Domínio Isoietal I

Legenda	Estação fluviométrica	Curso d'água	Área a montante da estação	Vazão total	Vazão total específica	Escoamento superficial	Escoamento subterrâneo	Descarga subterrânea específica	Precipitação média anual	
			km <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s	l/s.km <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	L/s.km <sup>2</sup>	mm	
1	Fazenda Samburá	Rio Samburá	760,35	18,87	24,81	7,94	10,93	14,37	1660,00	
2	Tapiraí Jusante	Rio Perdição	593,88	12,27	20,66	4,94	7,33	12,34	1650,00	
3	Fazenda da Barra	Rio Santo Antônio	763,58	23,65	30,97	13,10	10,55	13,82	1650,00	
4	Taquaral	Rib. São Mateus Grande	581,84	10,28	17,67	5,68	4,60	7,91	1550,00	
5	Abaeté	Ribeirão Marmelada	393,79	7,05	17,90	4,20	2,85	7,23	1500,00	
6	Martinho Campos	Rio Picão	759,47	8,43	11,10	4,25	4,18	5,50	1500,00	
7	Porto Indaiá e Barra do Funchal	Rio Indaiá	2206,69	37,73	17,10	23,29	14,44	6,54	1500,00	
8	Iguatama	Rio São Francisco	5382,10	107,24	19,93	48,87	58,37	10,85	1500,00	
9	Santo Hipólito (ANA/CEMIG)	Rio das Velhas	16634,29	207,36	12,47	110,43	96,93	5,83	1500,00	
10	Veredas	Rio Santo Antônio	219,35	3,36	15,33	1,71	1,65	7,52	1490,00	
11	Porto do Passarinho	Ribeirão dos Tiros	4135,70	70,85	17,13	43,60	27,25	6,59	1475,00	
12	Ponte do Chumbo	Rio São Francisco	9963,84	179,81	18,05	84,24	95,57	9,59	1450,00	
13	Fazenda Córrego do Ouro	Rio Escuro	1849,39	28,52	15,42	13,27	15,25	8,24	1393,14	
14	Fazenda Poções	Rio São Pedro	581,01	8,57	14,75	4,80	3,77	6,49	1385,99	
15	Major Porto	Ribeirão Areado	1192,57	19,73	16,54	11,46	8,27	6,93	1350,32	
16	Porto dos Poções	Rio Preto	9289,06	114,80	12,36	58,45	56,34	6,07	1350,00	
17	Calciolândia	Rio São Miguel	329,47	3,95	11,99	2,42	1,52	4,63	1350,00	
18	Barra do Escurinho	Ribeirão do Escurinho	2060,18	26,75	12,98	13,25	13,50	6,55	1350,00	
19	Ponte do Licínio - Jusante	Rio das Velhas	10569,23	135,90	12,86	67,25	68,65	6,50	1350,00	
20	Fazenda São Félix	Rio Borrachudo	944,67	27,25	28,84	18,22	9,03	9,56	1345,17	
21	Fazenda Barra da Égua	Ribeirão Barra da Égua	1545,50	17,28	11,18	9,47	7,81	5,05	1330,00	
22	Buritis-Jusante	Rio Urucuia	2829,42	41,60	14,70	26,52	15,09	5,33	1325,00	
23	Ponte da BR-040 Paracatu	Rio Paracatu	7672,36	100,33	13,08	54,16	46,17	6,02	1314,44	
24	Cachoeira das Almas	Rio do Sono	4211,79	51,72	12,28	30,56	21,17	5,03	1300,00	
			<b>Média</b>	<b>3561,2</b>	<b>52,6</b>	<b>16,7</b>	<b>27,6</b>	<b>25,0</b>	<b>7,7</b>	<b>1440,4</b>
			<b>Máximo</b>	<b>16634,3</b>	<b>207,4</b>	<b>31,0</b>	<b>110,4</b>	<b>96,9</b>	<b>14,4</b>	<b>1660,0</b>
			<b>Mínimo</b>	<b>219,4</b>	<b>3,4</b>	<b>11,1</b>	<b>1,7</b>	<b>1,5</b>	<b>4,6</b>	<b>1300,0</b>
			<b>Mediana</b>	<b>1697,4</b>	<b>27,0</b>	<b>15,4</b>	<b>13,3</b>	<b>12,2</b>	<b>6,6</b>	<b>1421,6</b>



**Figura 2.19 - Escoamento superficial, escoamento subterrâneo e vazão total obtidos a partir dos hidrogramas das estações situadas no Domínio Isoietal I**



**Figura 2.20 - Vazão específica total e descarga subterrânea específica por bacia no Domínio Isoietal I**

Com base nos valores de precipitação e dos valores de escoamento superficial e subterrâneo obtido por meio dos hidrogramas, foi calculado o valor médio de evapotranspiração. Os resultados são mostrados na Figura 2.21.

De forma geral, tendo como comparação a precipitação, as parcelas do balanço hídrico variam da seguinte maneira:

- O escoamento superficial calculado está entre 11,8 % e 45,2% dos valores de chuva. O maior valor percentual de escoamento superficial foi calculado para a estação Fazenda São Felix, partindo do hidrograma do rio Borrachudo, e o menor valor percentual foi obtido na estação Martinho Campos, utilizando o hidrograma do rio Picão. Setenta e um por cento das estações estudadas apresentam percentual de escoamento superficial entre 10 e 20% e 21% das estações têm escoamento superficial um pouco mais elevado, entre 20 e 30% dos valores de precipitação.
- O escoamento subterrâneo foi estimado entre 10,8% e 27,3% das chuvas. O escoamento subterrâneo teve o percentual máximo calculado para os dados da estação Fazenda Samburá, no ribeirão Samburá. O menor valor percentual do escoamento subterrâneo foi calculado na estação Calciolândia, no rio São Miguel. Setenta e cinco por cento das estações estudadas apresenta percentual de escoamento subterrâneo entre 10 e 20% e 25 % do escoamento subterrâneo mais elevado, entre 20 e 30%.
- A evapotranspiração foi determinada entre 32,4% e 76,7% dos valores de chuva, com valor máximo obtido na estação Martinho Campos, e valor mínimo calculado na estação Fazenda São Félix. Cinquenta e quatro por cento das estações analisadas apresentaram valor de evapotranspiração entre 60% e 70% e 29% das estações valores entre 70 e 80% da precipitação.

Interessante ressaltar, que nas estações Fazenda Samburá, Tapiraí Jusante, Iguatama, Ponte do Chumbo, Fazenda Córrego do Ouro, Ponte do Licínio-Jusante e Barra do Escurinho, os valores percentuais calculados para o escoamento subterrâneo superam o valor do escoamento superficial calculado na bacia. Esse resultado é um indicativo importante do elevado potencial de recarga da região.



# DOMÍNIO ISOIETAL I - BALANÇO HÍDRICO

Estação fluviométrica	Área da bacia a montante da estação km <sup>2</sup>	Precipitação média anual mm	Escoamento superficial		Escoamento subterrâneo		Evapotranspiração	
			mm	%	mm	%	mm	%
Cachoeira das Almas	4.211,8	1300,0	228,8	17,6	158,5	12,2	912,7	70,2
Ponte da BR-040 Paracatu	7.672,4	1314,4	222,6	16,9	189,8	14,4	902,1	68,6
Buritis-Jusante	2.829,4	1325,0	295,6	22,3	168,1	12,7	861,3	65,0
Fazenda Barra da Égua	1.545,5	1330,0	193,3	14,5	159,3	12,0	977,4	73,5
Fazenda São Félix	944,7	1345,2	608,2	45,2	301,3	22,4	435,6	32,4
Porto dos Poções	9.289,1	1350,0	198,4	14,7	191,3	14,2	960,3	71,1
Calciolândia	329,5	1350,0	232,1	17,2	145,9	10,8	972,0	72,0
Barra do Escurinho	2.060,2	1350,0	202,9	15,0	206,6	15,3	940,5	69,7
Ponte do Licínio - Jusante	10.569,2	1350,0	200,7	14,9	204,8	15,2	944,5	70,0
Major Porto	1.192,6	1350,3	302,9	22,4	218,7	16,2	828,7	61,4
Fazenda Poções	581,0	1386,0	260,6	18,8	204,6	14,8	920,8	66,4
Fazenda Córrego do Ouro	1.849,4	1393,1	226,3	16,2	260,0	18,7	906,9	65,1
Ponte do Chumbo	9.963,8	1450,0	266,6	18,4	302,5	20,9	880,9	60,8
Porto do Passarinho	4.135,7	1475,0	332,5	22,5	207,8	14,1	934,7	63,4
Veredas	219,4	1490,0	246,4	16,5	237,2	15,9	1006,5	67,5
Abaeté	393,8	1500,0	336,3	22,4	228,1	15,2	935,5	62,4
Martinho Campos	759,5	1500,0	176,5	11,8	173,4	11,6	1150,1	76,7
Porto Indaiá e Barra do Funchal	2.206,7	1500,0	332,8	22,2	206,3	13,8	960,9	64,1
Iguatama	5.382,1	1500,0	286,3	19,1	342,0	22,8	871,6	58,1
Santo Hipólito (ANA/CEMIG)	16.634,3	1500,0	209,4	14,0	183,8	12,3	1106,9	73,8
Taquaral	581,8	1550,0	308,0	19,9	249,4	16,1	992,7	64,0
Tapiraí Jusante	593,9	1650,0	262,4	15,9	389,2	23,6	998,4	60,5
Fazenda da Barra	763,6	1650,0	540,8	32,8	435,7	26,4	673,4	40,8
Fazenda Samburá	760,4	1660,0	329,4	19,8	453,1	27,3	877,5	52,9
máximo	16.634,3	1660,0	608,2	45,2	453,1	27,3	1150,1	76,7
mínimo	219,4	1300,0	176,5	11,8	145,9	10,8	435,6	32,4
média	3.561,2	1440,4	283,3	19,6	242,4	16,6	914,7	63,8
mediana	1.697,4	1421,6	261,5	18,0	207,2	15,2	935,1	65,0

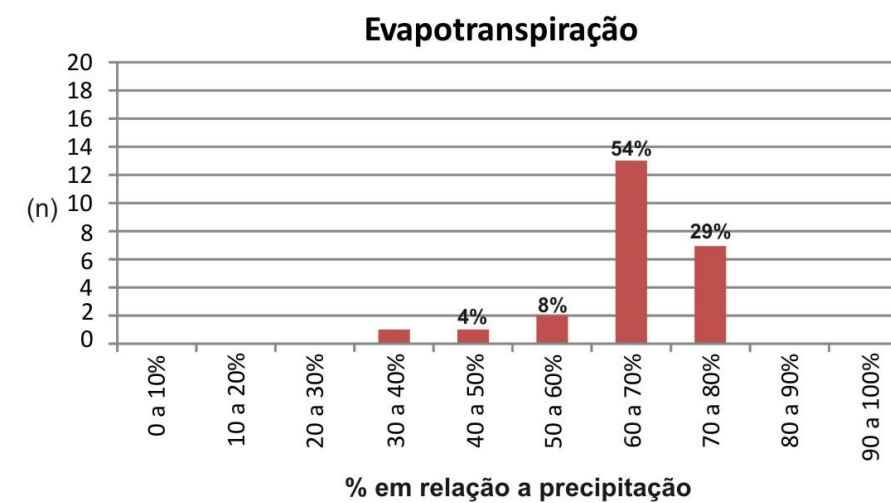
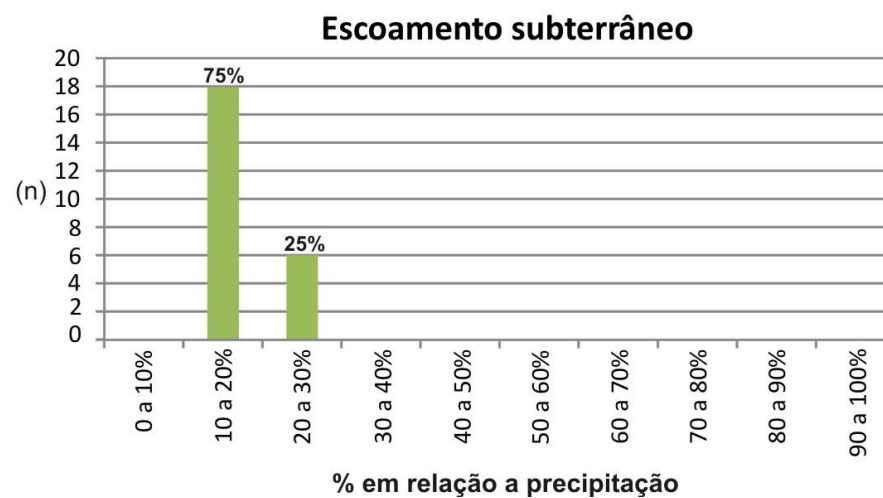
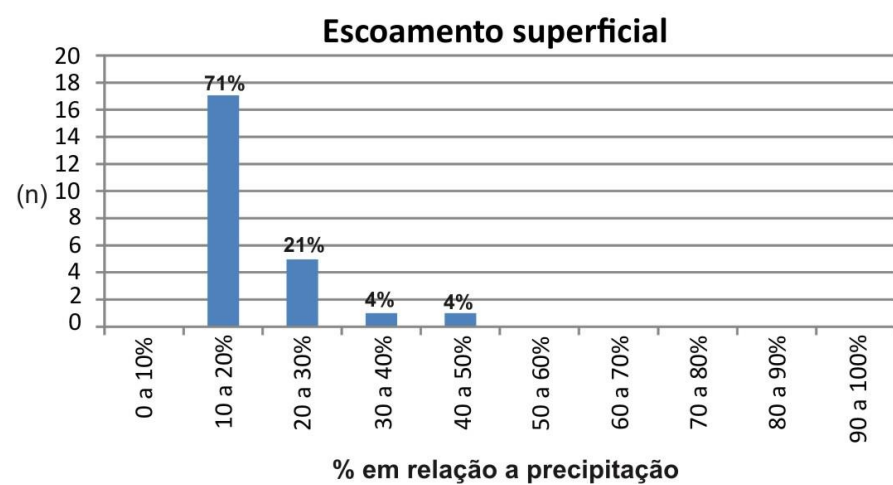
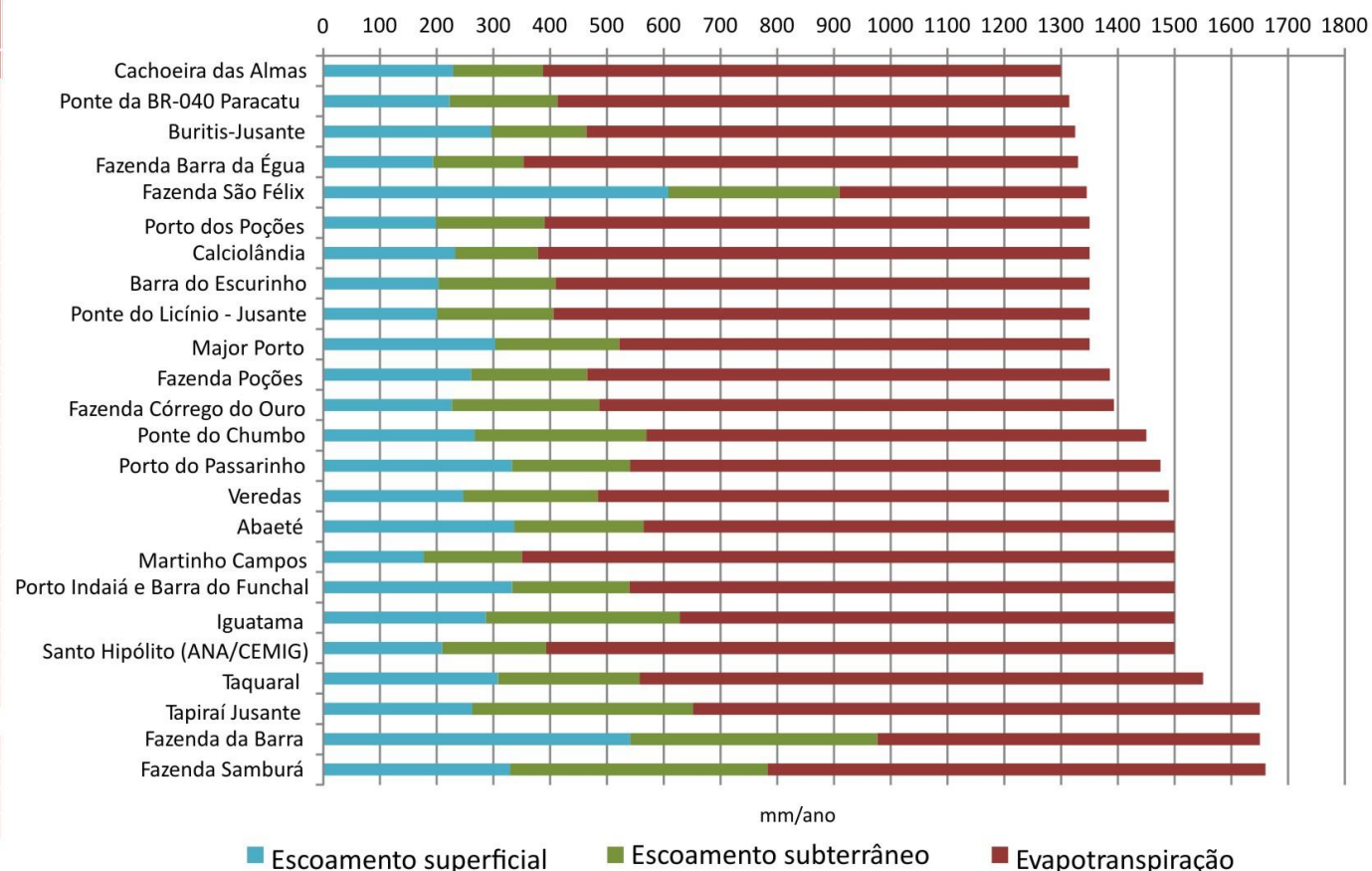


Figura 2.21 - Balanço Hídrico no Domínio Isoietal I

Pelas características geológicas e estruturais infere-se que existe uma influência expressiva das estruturas rúpteis na circulação das águas subterrâneas. Além disso, os maciços elevados que conformam as bordas da porção sul da bacia do rio São Francisco, onde estão localizadas as estações avaliadas, configuram um cenário favorável a importação de água subterrânea de bacias hidrográficas vizinhas.

### **2.3.2 Balanço Hídrico no Domínio Isoietal II**

O Domínio Isoietal II conforma-se ao longo de 243.055 km<sup>2</sup>, abrangendo 40 estações fluviométricas, cujas bacias se encontram parcial ou totalmente dentro desse limite (Figura 2.22). São apresentados na Tabela 2.5, e descritos a seguir, os valores médios anuais obtidos na análise das séries históricas (valores calculados a partir dos hidrogramas): precipitação, vazão total, vazão total específica, escoamento superficial, escoamento subterrâneo e descarga subterrânea específica.

O valor máximo de precipitação anual observado no Domínio Isoietal II corresponde a 1.267,6 mm, junto à Fazenda Santa Rosa, sendo o segundo e terceiro maiores valores aqueles medidos nas estações Arinos Montante (1.245,6 mm) e Ponte da Taquara (1.238,8 mm). O valor médio de precipitação corresponde 1.110,6 mm/ano e o valor mínimo 938,2 mm junto à Estação de Curimataí.

Os hidrogramas analisados para as 40 estações apresentaram vazões totais nas seções avaliadas entre 1,8 m<sup>3</sup>/s (Fazenda Bom Retiro) e 476,3 m<sup>3</sup>/s (Estação Porto Alegre), com valor médio para o grupo equivalente a 99,9 m<sup>3</sup>/s e mediana igual a 51,8 m<sup>3</sup>/s (Figura 3.23). A vazão total específica das bacias varia entre 1,0 l/s.km<sup>2</sup> (Fazenda Coqueiro) e 19,2 l/s.km<sup>2</sup> (Presidente Juscelino - Jusante), com valor médio do grupo equivalente a 8,4 l/s.km<sup>2</sup> e mediana igual a 8,5 l/s.km<sup>2</sup> (Figura 2.24).

Os valores de escoamento subterrâneo máximo e mínimo calculados para esse mesmo conjunto de estações correspondem, respectivamente, a 226,4 m<sup>3</sup>/s (Estação Porto Alegre) e 0,9 m<sup>3</sup>/s (Fazenda Bom Retiro), sendo o valor médio do grupo igual a 56,9 m<sup>3</sup>/s e mediana de 36,8 m<sup>3</sup>/s. Calculando-se a descarga subterrânea específica para as bacias (Figura 2.24), os valores variam entre 0,48 l/s.km<sup>2</sup> (Capitão Enéias) e 8,3 l/s.km<sup>2</sup> (Arrojado).

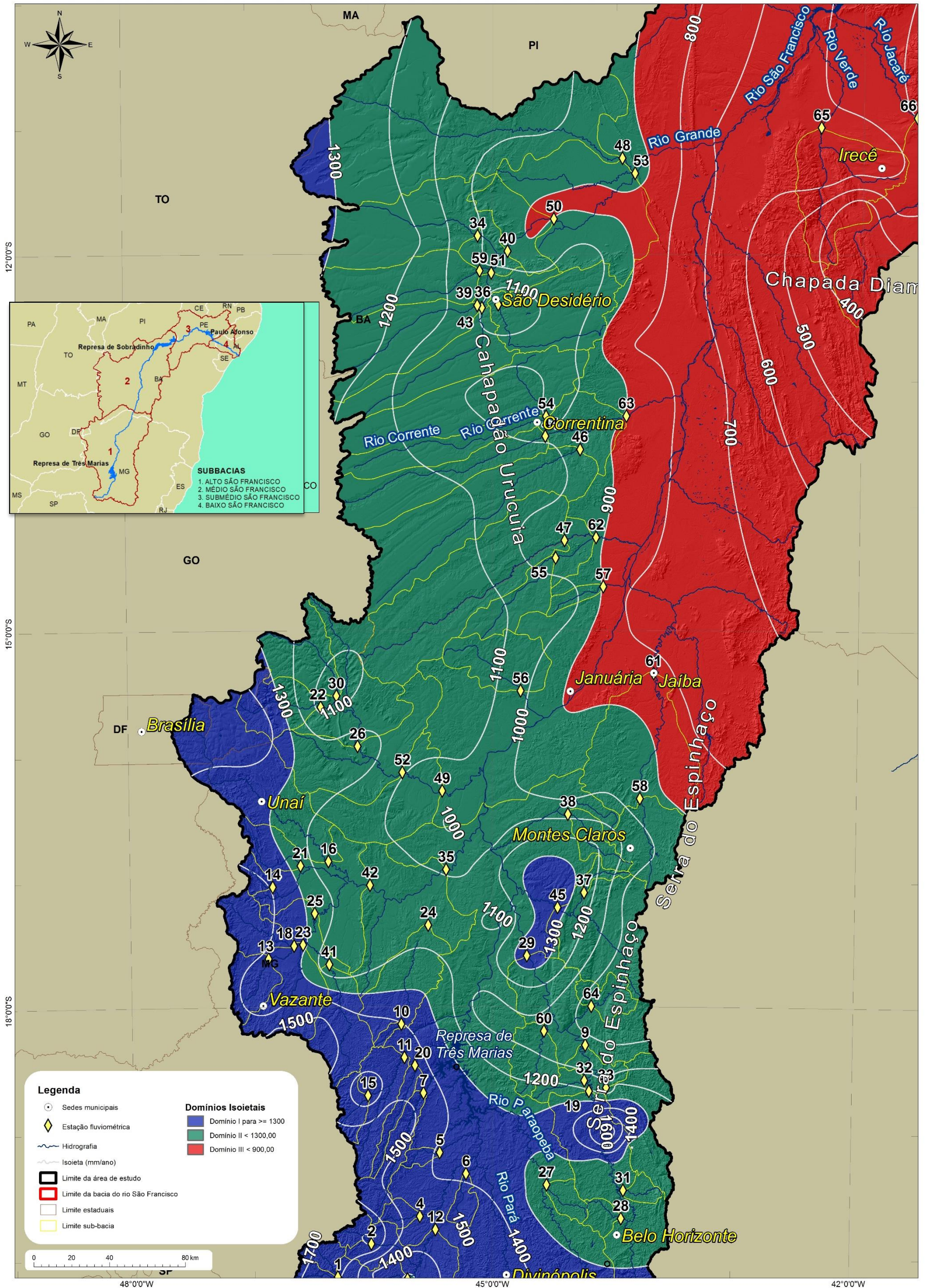
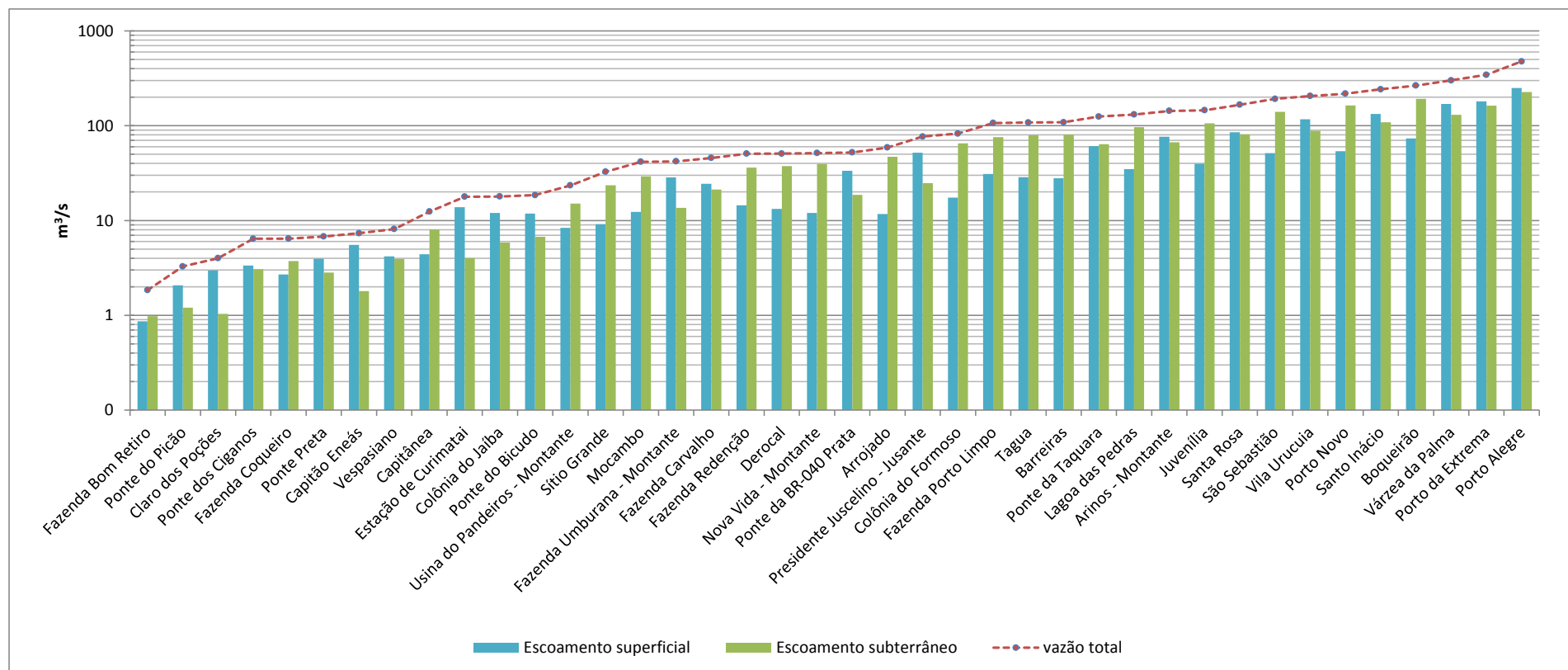
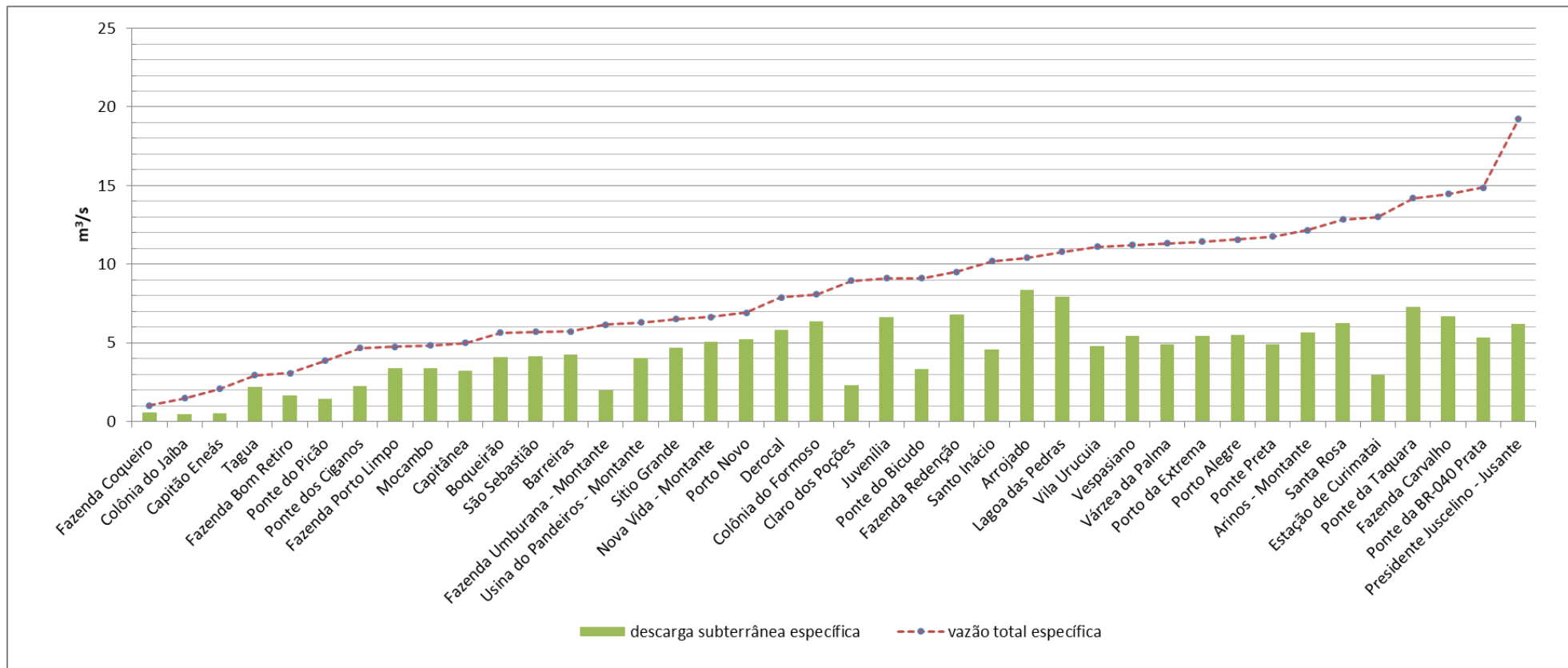


Figura 2.22 - Domínio Isoietal II





**Figura 2.23 - Escoamento superficial, escoamento subterrâneo e vazão total obtidos a partir dos hidrogramas das 40 estações situadas no Domínio Isoietal II**



**Figura 2.24 - Descarga subterrânea específica e vazão total específica por bacia no Domínio Isoietal II**

O valor médio de contribuição subterrânea específica do grupo avaliado é igual a 4,4 l/s.km<sup>2</sup> e o valor da mediana equivalente a 4,7 l/s.km<sup>2</sup>.

Utilizando-se os valores de precipitação e os valores de escoamento superficial e subterrâneo obtidos por meio dos hidrogramas, foi calculado o valor médio de evapotranspiração. Os resultados são mostrados na Figura 2.25. Tendo como comparação os valores de precipitação, as parcelas do balanço hídrico no Domínio Isoietal II variam da seguinte maneira:

- O escoamento superficial calculado está entre 1,1% e 34,2% dos valores de chuva. O maior valor percentual de escoamento superficial foi calculado para a estação Presidente Juscelino Jusante (rio Parauninha), e o menor valor percentual foi obtido na estação Fazenda Coqueiro (rio São Desidério). Cinquenta e sete por cento das estações estudadas apresentam percentual de escoamento superficial de até 10% das chuvas e 33% das estações escoamento superficial um pouco mais elevado, entre 10 e 20% dos valores de precipitação.
- O escoamento subterrâneo foi estimado entre 1,6% e 23,9% das chuvas. O escoamento subterrâneo teve o percentual máximo calculado para o rio Arrojado, junto à estação homônima. O menor valor percentual do escoamento subterrâneo foi calculado junto às estações Fazenda Coqueiro, Capitão Enéas e Colônia do Jaíba, situadas, respectivamente, nos rios São Desidério e Verde Grande. Sessenta por cento das estações estudadas apresentam percentual de escoamento subterrâneo entre 10 e 20% e, em 30% das estações o escoamento subterrâneo é um pouco mais baixo, menor que 10% das chuvas. Aproximadamente 10% das estações apresentam escoamento subterrâneo mais elevado, entre 20 e 30% da precipitação.
- A evapotranspiração foi determinada entre 49,4% e 97,3% dos valores de chuva, com valor máximo obtido na estação Fazenda Coqueiro, e valor mínimo calculado na estação Presidente Juscelino - Jusante. Trinta por cento das estações analisadas apresentaram valor de evapotranspiração entre 60% e 70% das chuvas e, 30% das estações valores entre 80 e 90% da precipitação. Seis estações (13%) apresentam evapotranspiração superior a 90%.

# DOMÍNIO ISOIETAL II - BALANÇO HÍDRICO

Estação fluviométrica	Área da bacia a montante da estação km <sup>2</sup>	Precipitação média anual	Escoamento superficial		Escoamento subterrâneo		Evapotranspiração	
		mm	mm	%	mm	%	mm	%
Estação de Curimatai	1.371,8	938,2	317,7	33,9	92,5	9,9	528,0	56,3
Colônia do Jaiba	12.175,1	950,0	31,2	3,3	15,2	1,6	903,6	95,1
Juvenília	15.971,8	950,0	78,1	8,2	209,1	22,0	662,7	69,8
Porto Novo	31.409,6	950,0	54,2	5,7	164,2	17,3	731,6	77,0
Ponte do Bicudo	2.033,2	956,5	183,1	19,1	104,4	10,9	669,0	69,9
Fazenda Redenção	5.322,2	992,4	85,8	8,6	214,0	21,6	692,6	69,8
Fazenda Bom Retiro	600,2	1000,0	45,5	4,5	51,4	5,1	903,1	90,3
Capitão Eneás	3.541,3	1000,0	49,3	4,9	16,1	1,6	934,7	93,5
Capitânea	2.488,9	1050,0	55,8	5,3	101,6	9,7	892,6	85,0
Usina do Pandeiros - Montante	3.718,6	1050,0	70,8	6,7	127,7	12,2	851,4	81,1
Mocambo	8.625	1070,0	45,1	4,2	107,1	10,0	917,9	85,8
Boqueirão	46.884,7	1075,0	49,4	4,6	128,9	12,0	896,7	83,4
Vila Uruçuia	18.495,9	1084,9	199,4	18,4	151,0	13,9	734,5	67,7
Barreiras	18.959,6	1094,3	46,5	4,2	134,0	12,2	913,8	83,5
Arrojado	5.650,2	1100,0	65,5	6,0	263,0	23,9	771,5	70,1
Fazenda Umburana - Montante	6.817,0	1100,0	131,8	12,0	62,8	5,7	905,4	82,3
Colônia do Formoso	10.200,7	1100,0	54,0	4,9	201,0	18,3	845,0	76,8
Lagoa das Pedras	12.173,0	1100,0	90,4	8,2	249,6	22,7	760,1	69,1
Fazenda Porto Limpo	22.459,0	1100,0	43,5	4,0	106,2	9,7	950,3	86,4
Santo Inácio	23.759,0	1100,0	176,9	16,1	144,2	13,1	778,9	70,8
Tagua	36.564,9	1100,0	24,6	2,2	68,5	6,2	1006,9	91,5
Sítio Grande	5.012,8	1122,7	57,6	5,1	147,8	13,2	917,2	81,7
Porto da Extrema	30.043,3	1125,4	189,8	16,9	170,9	15,2	764,7	68,0
Ponte da BR-040 Prata	3.509,3	1129,6	301,1	26,7	167,9	14,9	660,5	58,5
Claro dos Poções	447,1	1150,0	209,5	18,2	73,0	6,3	867,6	75,4
Ponte dos Ciganos	1.372,4	1150,0	76,8	6,7	70,7	6,1	1002,5	87,2
Derocal	6.430,7	1150,0	65,0	5,6	183,8	16,0	901,2	78,4
São Sebastião	33.614,6	1150,0	48,2	4,2	131,5	11,4	970,3	84,4
Fazenda Coqueiro	6.360,7	1172,0	13,4	1,1	18,5	1,6	1140,0	97,3
Ponte Preta	576,0	1200,0	216,5	18,0	154,3	12,9	829,2	69,1
Ponte do Picão	847,5	1200,0	77,0	6,4	44,9	3,7	1078,1	89,8
Presidente Juscelino - Jusante	3.994,5	1200,0	410,8	34,2	195,8	16,3	593,4	49,4
Nova Vida - Montante	7.743,6	1200,0	48,9	4,1	160,5	13,4	990,5	82,5
Porto Alegre	41.158,7	1200,0	191,4	16,0	173,5	14,5	835,1	69,6
Fazenda Carvalho	3.156,5	1220,0	244,4	20,0	211,5	17,3	764,1	62,6
Várzea da Palma	26.517,4	1220,2	202,1	16,6	155,0	12,7	863,1	70,7
Vespasiano	723,1	1221,9	182,2	14,9	171,6	14,0	868,0	71,0
Ponte da Taquara	8.792,9	1238,8	218,3	17,6	229,0	18,5	791,6	63,9
Arinos - Montante	11.757,0	1245,6	204,7	16,4	179,0	14,4	861,8	69,2
Santa Rosa	12.951,9	1267,6	207,9	16,4	196,9	15,5	862,7	68,1
máximo	46.884,7	1267,6	410,8	34,2	263,0	23,9	1140,0	97,3
mínimo	447,1	938,2	13,4	1,1	15,2	1,6	528,0	49,4
média	12.355,8	1110,6	126,6	11,3	138,7	12,4	845,3	76,3
mediana	7.280,3	1100,0	77,6	7,5	149,4	13,0	862,9	76,1

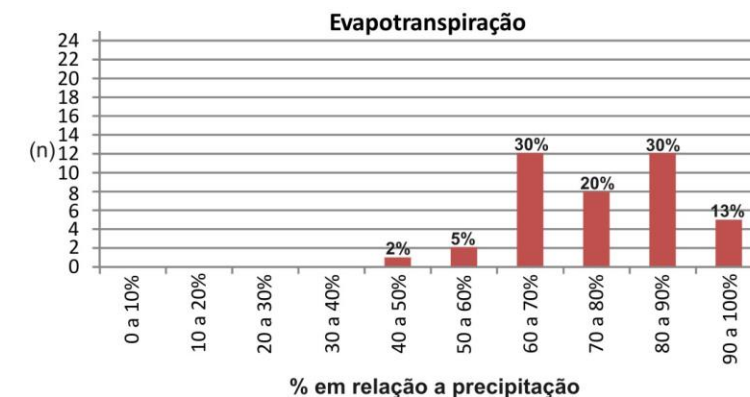
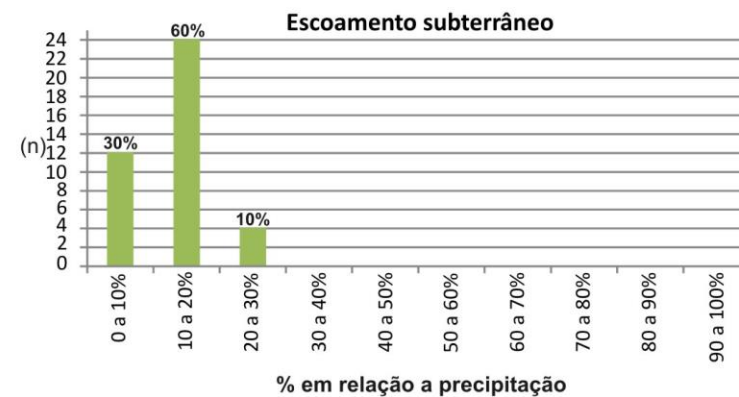
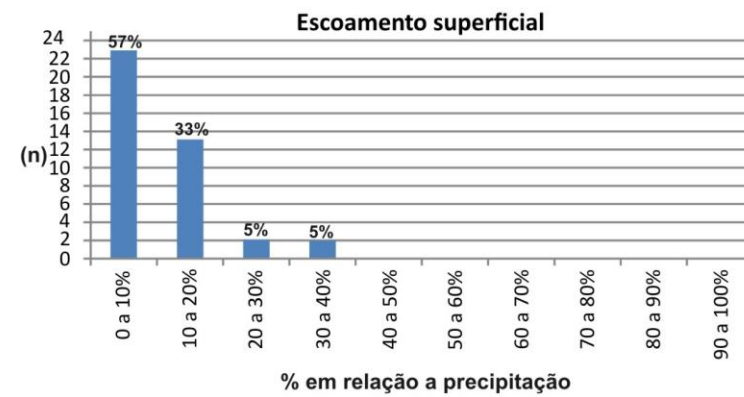
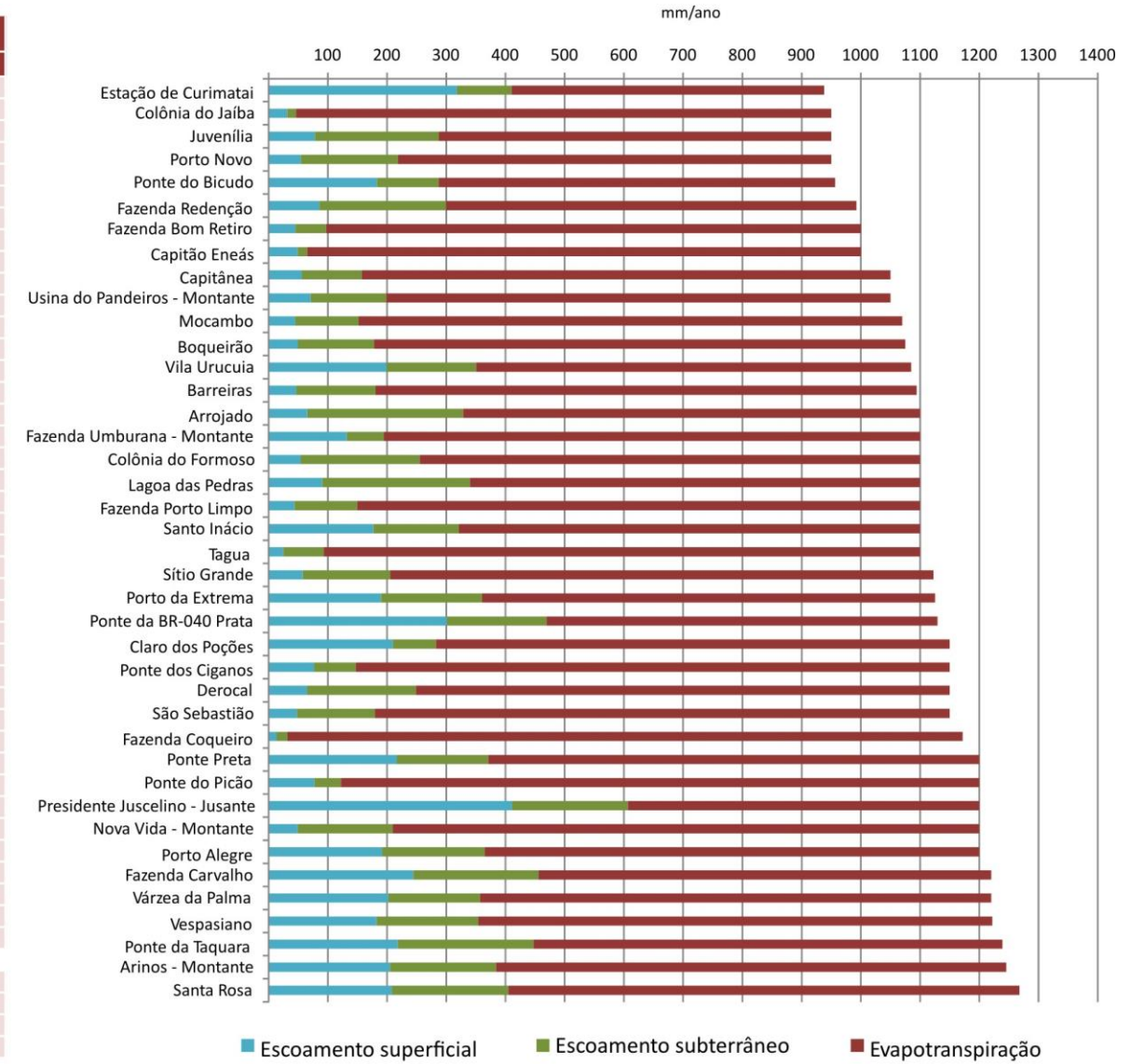


Figura 2.25 - Balanço hídrico no Domínio Isoietal II



Interessante salientar que 20 das 40 estações analisadas apresentaram percentual de escoamento subterrâneo superior ao percentual de escoamento superficial, conforme observado nas Figuras 3.23 e 3.25. Dentre as 20 estações de notável contribuição hídrica subterrânea, 19 se encontram em rios cujas cabeceiras estão localizadas no contexto do Chapadão Urucuia, mostrando a importância do Aquífero Urucuia como mantenedor das vazões nas calhas fluviais de importantes afluentes do rio São Francisco no oeste Baiano.

Neste mesmo contexto, faz-se extremamente importante ressaltar que a análise apresentada para o cômputo das recargas no Chapadão do Urucuia ficou subestimada em virtude de não terem sido considerados nos cálculos, os exutórios que vertem em sua borda oeste, junto às cabeceiras das drenagens formadoras do rio Paranã, bacia do rio Tocantins, porção ocidental da Serra Geral de Goiás.

Em visita de campo ao referido domínio, foram evidenciados volumes expressivos de água em inúmeras cabeceiras de drenagem provenientes dos referidos arenitos, incluindo alguns locais que se utilizam desse potencial hídrico para geração de energia elétrica, como observado pela presença das Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) na região de São Domingos.

Além disso, há de se considerar a relevância do uso das águas subterrâneas na irrigação de culturas extensivas que ocupam vastas superfícies do topo do Chapadão, cuja exploração através de poços profundos soma-se nesse balanço como retirada de água do sistema. Desse modo, a recarga para as bacias estudadas no Chapadão Urucuia deve ser ainda maior do que apontam os valores obtidos nesse trabalho.

ANA (2017), em concordância com Gaspar (2006), CPRM & UFBA (2007) e Amorim Jr. & Lima (2007), atestam que existe no Sistema Aquífero Urucuia um divisor hidrogeológico de direção aproximada Norte-Sul o qual divide o fluxo regional da água subterrânea, sendo esse não coincide com o divisor hidrográfico. Foi demonstrada e calculada a descarga do Sistema Aquífero Urucuia (SAU) em direção aos afluentes do rio Tocantins, como os rios Paranã, Manuel Alves e Rio do Sono. ANA (2017) estimou a contribuição subterrânea proveniente do SAU para a bacia do rio Tocantins em 215 m<sup>3</sup>/s.

De forma geral, a recarga média estimada para toda a área do SAU por ANA (2017) foi de 217 mm anuais, valor que corresponde a 18,5% da precipitação média anual. Esses valores foram obtidos com base nos resultados da avaliação hidrológica das vazões das estações fluviométricas que drenam o SAU, no período de 1975 a 2005, considerando a área das bacias hidrogeológicas. Seis postos fluviométricos foram utilizados nessa avaliação: Formosa do Rio Preto (Médio/Baixo Rio Grande); São Sebastião (Alto Rio Grande); Santa Maria da Vitória (Rio Corrente); Lagoa das Pedras (Rio Carinhanha); Capitânea (Rio Carinhanha); Usina dos Pandeiros Montante (Pandeiros/Pardo/Mangai).

Tomando como referência os resultados do escoamento subterrâneo (dado em percentual em relação as chuvas) das estações São Sebastião, Lagoa das Pedras, Capitânea e Usina dos Pandeiros Montante, apresentados na Figura 2.25, o valor médio de recarga no SAU equivale a 14%, um pouco inferior ao valor obtido por ANA (2017). Para os cálculos foi considerado o traçado da bacia hidrográfica, e não o contorno da bacia hidrogeológica, o que justifica a diferença dos resultados. Além disso, a série histórica analisada não é coincidente, sendo diferente também a metodologia empregada na análise dos hidrogramas. Portanto, os valores percentuais de recarga média obtidos nos dois estudos são coerentes tendo em vista a proposta e a metodologia aplicada nas avaliações.

### **2.3.3 Balanço Hídrico no Domínio Isoietal III**

O Domínio Isoietal III (Figura 2.26) conforma-se ao longo de 218.315 km<sup>2</sup> onde estão localizadas apenas 3 estações que cumprem os critérios para a análise (ver item 2.2). A área estudada por meio das estações selecionadas constitui 28.546 km<sup>2</sup>, sendo a menor das bacias aquela traçada para a estação rio Verde II (7.008,2 km<sup>2</sup>) e a maior bacia aquela definida para a estação Abreus (12.091,0). São apresentados na Tabela 3.6, e descritos a seguir, os valores médios anuais obtidos na análise das séries históricas (valores calculados a partir dos hidrogramas): precipitação, vazão total, vazão total específica, escoamento superficial, escoamento subterrâneo e descarga subterrânea específica.

O valor máximo de precipitação observado no Domínio Isoietal III corresponde a 646,1

mm/ano, na estação Rio Verde II. O valor médio de precipitação para o grupo corresponde 529,3 mm/ano e o valor mínimo 460,0 mm/ano na estação Abreus.

Os hidrogramas analisados para as 3 estações, apresentaram vazões totais nas seções avaliadas entre 0,8 m<sup>3</sup>/s (Abreus) e 2,5 m<sup>3</sup>/s (Rio Verde II), com valor médio para o grupo equivalente a 1,33 m<sup>3</sup>/s e mediana igual a 0,8 m<sup>3</sup>/s (Figura 2.27). A vazão total específica das bacias varia entre 0,06 l/s.km<sup>2</sup> (Abreus) e 0,36 l/s.km<sup>2</sup> (Rio Verde II), com valor médio do grupo equivalente a 0,17 l/s.km<sup>2</sup> e mediana igual a 0,7 l/s.km<sup>2</sup> (Figura 2.28).

Os valores de escoamento subterrâneo máximo e mínimo calculados para esse mesmo conjunto de estações correspondem a 0,4 m<sup>3</sup>/s (Abreus) e 0,3 m<sup>3</sup>/s (Jaguaraci) respectivamente, sendo o valor médio do grupo igual a 0,5 m<sup>3</sup>/s e mediana igual a 0,4 m<sup>3</sup>/s. Calculando-se a descarga subterrânea específica para as bacias, os valores variam entre 0,03 l/s.km<sup>2</sup> (Jaguaraci) e 0,1 l/s.km<sup>2</sup> (Rio Verde II). O valor médio da descarga subterrânea específica do grupo avaliado é igual a 0,06 l/s.km<sup>2</sup> e o valor da mediana foi de 0,04 l/s.km<sup>2</sup>.

Após o cálculo do valor de evapotranspiração, e tendo como comparação os valores de precipitação, as parcelas do balanço hídrico no Domínio Isoietal III variam da seguinte maneira (Figura 2.29):

- O escoamento superficial calculado está entre 0,2% e 1,3% dos valores de chuva. O maior valor percentual de escoamento superficial foi calculado para a estação Rio Verde II, partindo do hidrograma do rio Verde, e o menor valor percentual foi obtido na estação Abreus, utilizando o hidrograma do rio Pacuí. Todas as estações apresentam percentual de escoamento superficial menores que 10% das chuvas.
- O escoamento subterrâneo foi estimado entre 0,2% e 0,5% das chuvas. O escoamento subterrâneo teve o percentual máximo calculado para os dados da estação Rio Verde II, e o menor valor percentual do escoamento subterrâneo foi calculado na estação Jaguaraci, no rio Jacaré. Todas as estações apresentam percentual de escoamento subterrâneo inferior a 10% das chuvas.
- A evapotranspiração foi determinada entre 98,2% e 99,6% dos valores de chuva, com valor máximo obtido na estação Abreus, e valor mínimo calculado na

estação Rio Verde II. Todas as estações apresentam valor de evapotranspiração entre 90 e 100% do valor das chuvas.

A estação Abreus apresentou valor de escoamento subterrâneo um pouco acima do valor de escoamento superficial (Figura 2.29).

**Tabela 2.6 - Parcelas do balanço hídrico no Domínio Isoietal III**

Legenda	Estação Fluviométrica	Curso d'água	Área a montante da estação	Vazão total	Vazão total específica	Escoamento superficial	Escoamento subterrâneo	Descarga subterrânea específica	Precipitação média anual
			km <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> s	l/s.km <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> s	m <sup>3</sup> s	L/s.km <sup>2</sup>	mm
65	Rio Verde II	Rio Verde	7008,24	2,55	0,36	1,83	0,72	0,10	646,08
66	Jaguaraci	Rio Jacaré ou Vereda do Romão	9446,66	0,67	0,07	0,36	0,31	0,03	481,67
67	Abreus	Rio Pacuí	12091,03	0,77	0,06	0,31	0,46	0,04	460,00
<b>Média</b>			<b>9515,3</b>	<b>1,33</b>	<b>0,17</b>	<b>0,83</b>	<b>0,50</b>	<b>0,06</b>	<b>529,25</b>
<b>Máximo</b>			<b>12091,0</b>	<b>2,55</b>	<b>0,36</b>	<b>1,83</b>	<b>0,72</b>	<b>0,10</b>	<b>646,08</b>
<b>Mínimo</b>			<b>7008,2</b>	<b>0,67</b>	<b>0,06</b>	<b>0,31</b>	<b>0,31</b>	<b>0,03</b>	<b>460,00</b>
<b>Mediana</b>			<b>9446,7</b>	<b>0,77</b>	<b>0,07</b>	<b>0,36</b>	<b>0,46</b>	<b>0,04</b>	<b>481,67</b>

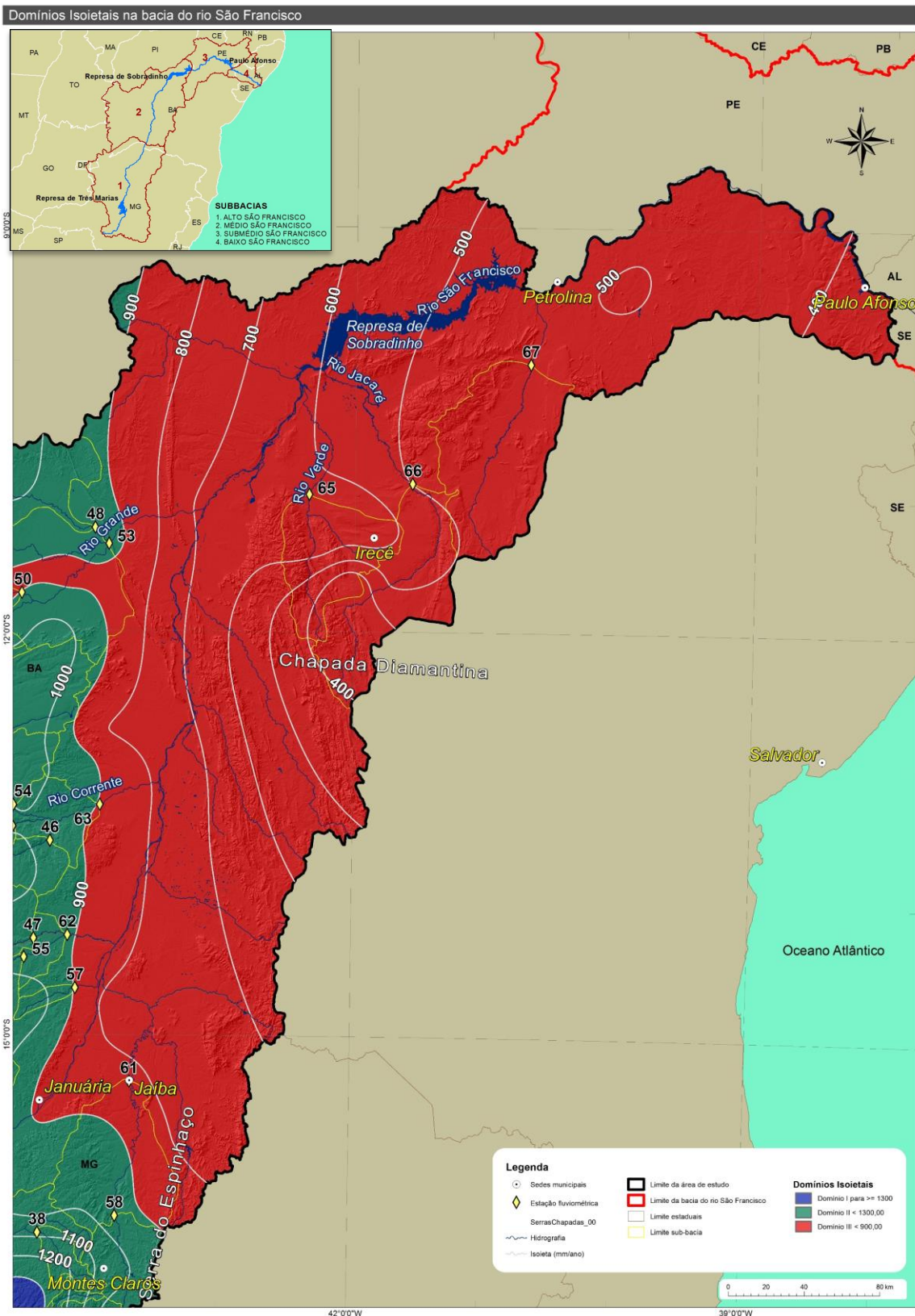
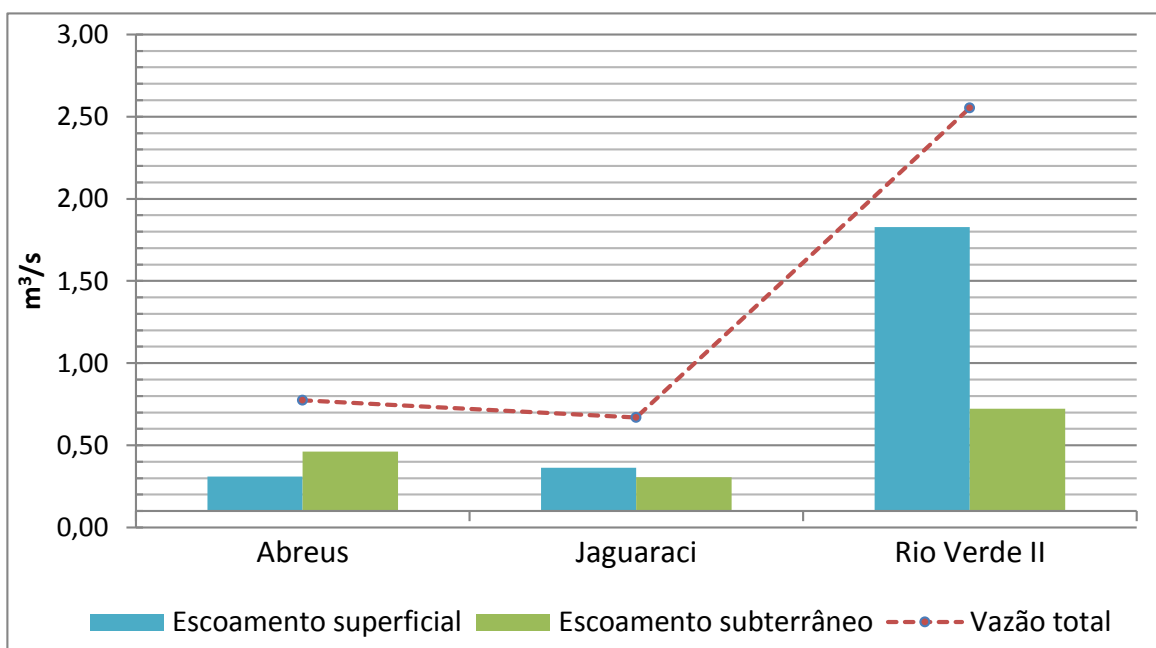
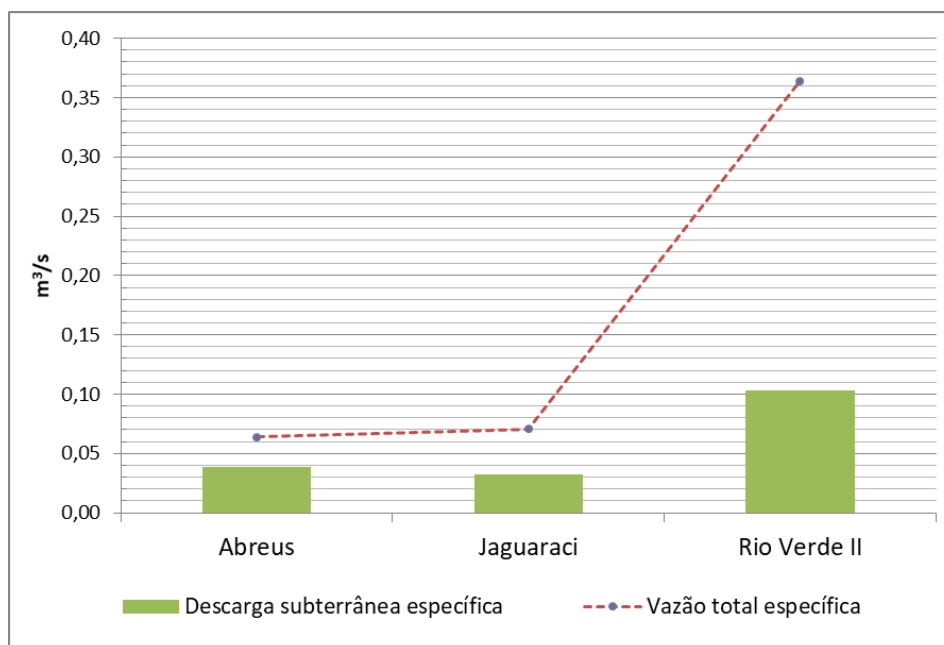


Figura 2.26 - Domínio Isoietal III



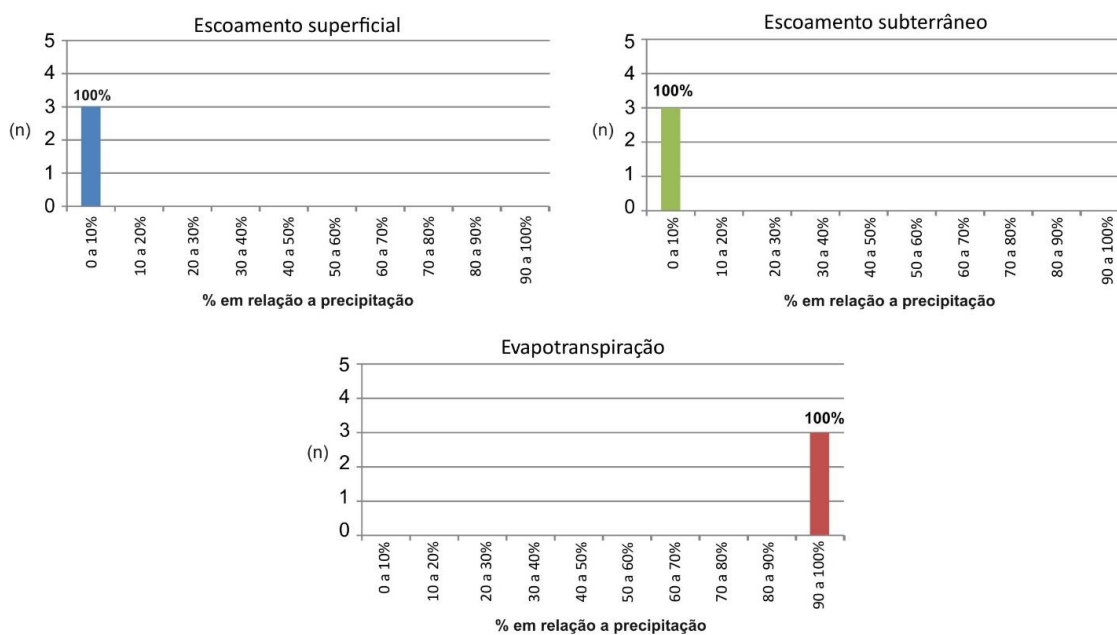
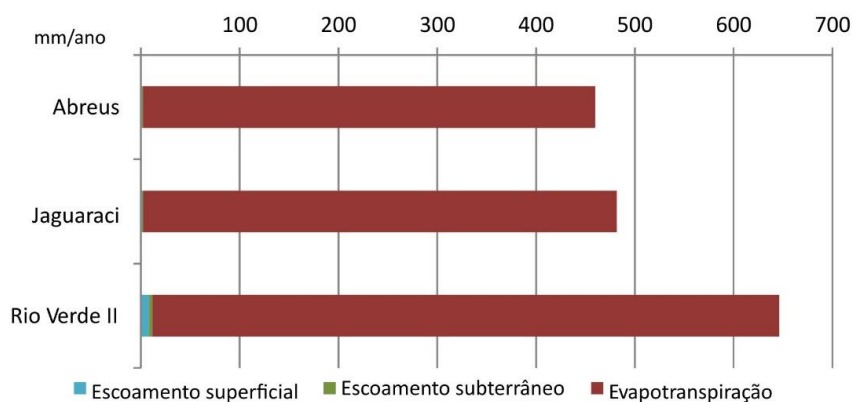
**Figura 2.27 - Escoamento superficial, escoamento subterrâneo e vazão total obtidos a partir dos hidrogramas das três estações situadas no Domínio Isoietal III**



**Figura 2.28 - Descarga subterrânea específica e vazão específica total por bacia no Domínio Isoietal III**

## DOMÍNIO ISOIETAL III - BALANÇO HÍDRICO

Estação fluviométrica	Área da bacia a montante da estação  km <sup>2</sup>	Precipitação média anual  mm	Escoamento superficial		Escoamento subterrâneo		Evapotranspiração	
			mm	%	mm	%	mm	%
Abreus	12.091,0	460,0	0,8	0,2	1,2	0,3	458,0	99,6
Jaguaraci	9.446,7	481,7	1,2	0,3	1,0	0,2	479,4	99,5
Rio Verde II	7.008,2	646,1	8,2	1,3	3,3	0,5	634,6	98,2
máximo	12.091,0	646,1	8,2	1,3	3,3	0,5	634,6	99,6
mínimo	7.008,2	460,0	0,8	0,2	1,0	0,2	458,0	98,2
média	9.515,3	529,3	3,4	0,6	1,8	0,3	524,0	99,1
mediana	9.446,7	481,7	1,2	0,3	1,2	0,3	479,4	99,5



**Figura 2.29 - Balanço Hídrico completo no Domínio Isoietal III**



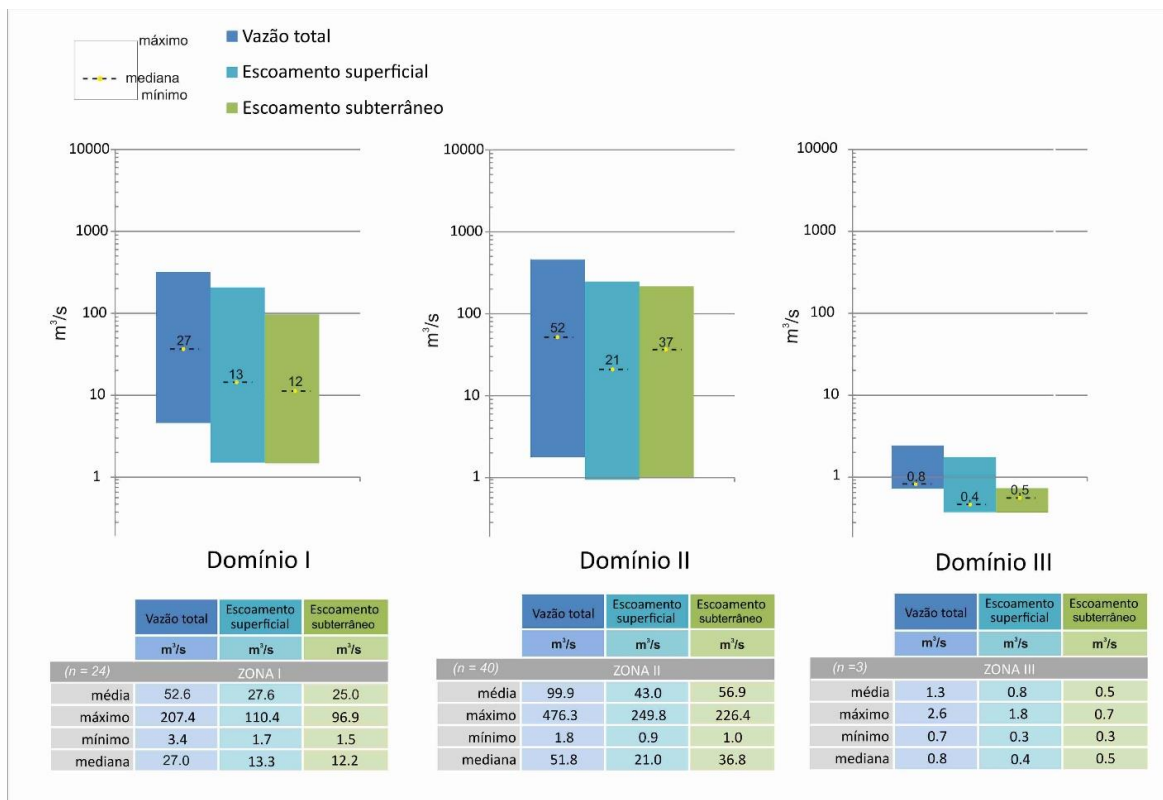
### **2.3.4 Análise Comparativa entre os Domínios**

Analisando-se a vazão total e os valores calculados para o escoamento superficial e subterrâneo ao longo dos três Domínios Isoietais, observa-se que os valores máximos absolutos dos três parâmetros são mais elevados no Domínio Isoietal II, bem como os valores da mediana das três variáveis analisadas (Figura 2.30). Esse resultado reflete não somente a extensão das bacias ali analisadas, mas, também, seu posicionamento mais a jusante, aproximando-se seus prolongamentos a regiões lindeiras do nível de base representado pela calha do rio São Francisco.

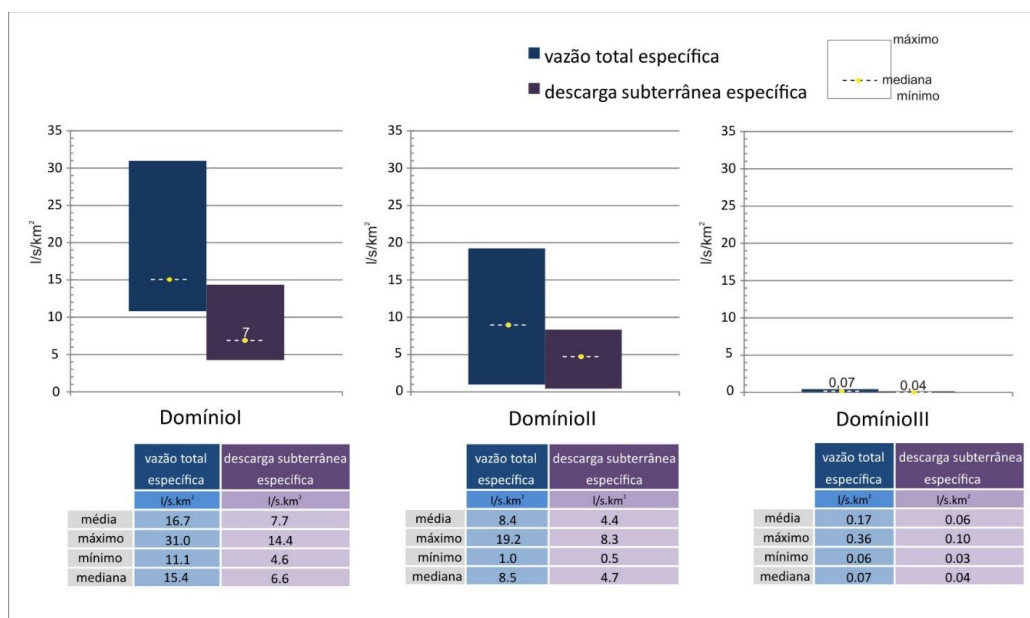
Além disso, os dados mostraram que em 20 estações no Domínio Isoietal II o escoamento subterrâneo é maior que o escoamento superficial. Dentre essas, 19 estações estão posicionadas em afluentes do rio São Francisco cujas cabeceiras dissecam o Aquífero Urucuia. Os cálculos feitos para os dados das estações do rio Arrojado (Estação Arrojado), do rio Formoso (Estação Colônia do Formoso) e do rio Branco (Estação Nova Vida - montante), por exemplo, indicam contribuição subterrânea média equivalente a 80%, 79% e 77%, respectivamente, em relação aos valores de vazão total dos cursos d'água nessas estações. Outras 11 estações em contexto geológico semelhante apresentam valores de contribuição subterrânea média acima de 70%. São valores muito elevados que mostram claramente o potencial do aquífero Urucuia. Valores de contribuição subterrânea tão elevados como esses, tendo em comparação a vazão total dos cursos d'água, não são encontrados em nenhuma estação analisada na bacia do rio São Francisco.

Entretanto, cumpre ressaltar que a vazão total específica assim como a descarga subterrânea específica são maiores no Domínio Isoietal I, e diminuem na medida em que se diminui o aporte de chuvas e o gradiente topográfico da bacia do rio São Francisco (Figura 2.31).

Esses valores mostram que as áreas posicionadas no Domínio Isoietal I têm maior capacidade de produção de água por unidade de área do que o Domínio Isoietal II, e este, por sua vez, tem maior capacidade de produção de água por unidade de área do que o Domínio Isoietal III. Entretanto o montante total somado nas áreas analisadas é maior no Domínio Isoietal II.



**Figura 2.30 - Vazão total, escoamento superficial e subterrâneo nos Domínios Isoietais I, II e III**



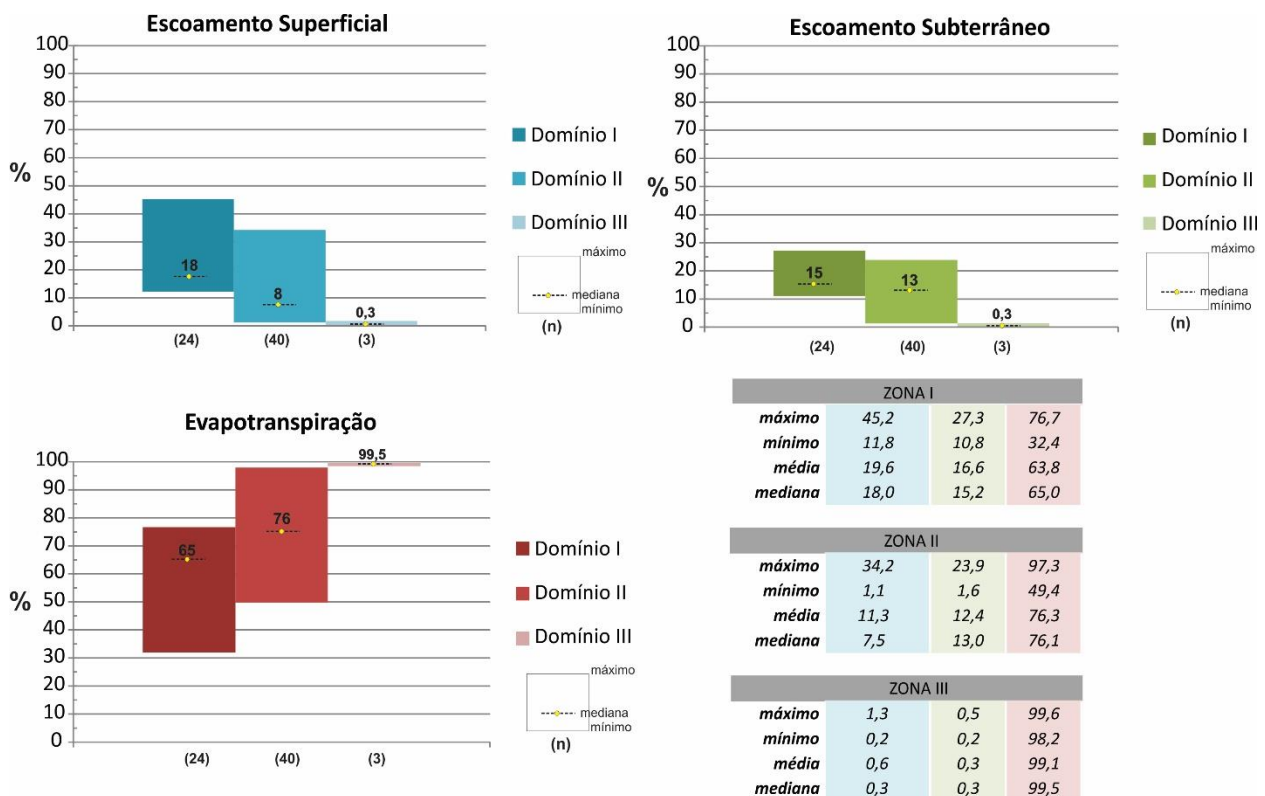
**Figura 2.31 - Vazão total específica e descarga subterrânea específica nos Domínios Isoietais I, II e III**

As zonas de cabeceiras posicionadas sob a zona climática mais úmida do Domínio Isoietal I e os cursos d'água no contexto do Aquífero Urucuia têm um papel de grande importância para a produção de água na bacia do rio São Francisco.

Embora não existam zonas aquíferas extensas como ocorre no Domínio Isoietal II (em decorrência da presença do Sistema Aquífero Urucuia), existem no Domínio Isoietal I condições que favorecem a produtividade dos aquíferos. Essas condições são: presença de fraturas e falhas, chuvas abundantes e um contorno delineado por maciços elevados que favorece a importação de águas subterrâneas para as bacias localizadas nas cabeceiras, contribuindo, assim, para a manutenção de um elevado gradiente hidráulico.

Por outro lado, o Domínio Isoietal III destaca-se por apresentar áreas muito pobres em termos de capacidade de produção de água, pelo fato do balanço hídrico no Domínio Isoietal III ser praticamente deficitário ao longo dos anos hidrológicos, considerando-se que as retiradas de água pelas taxas de evapotranspiração são equivalentes à quantidade de precipitação média anual.

Esse fato é bem destacado quando são analisadas as parcelas do balanço hídrico em termos percentuais em relação aos valores de precipitação (Figura 2.32). O percentual de escoamento superficial é maior no Domínio Isoietal I, diminuindo no Domínio Isoietal II e diminuindo ainda mais no Domínio Isoietal III. Comportamento semelhante é observado para o conjunto de valores calculados para o escoamento subterrâneo, que é máximo no Domínio Isoietal I e mínimo no Domínio Isoietal III. O inverso se observa para a evapotranspiração, que é máxima no Domínio Isoietal III e mínima no Domínio Isoietal I.



**Figura 2.32 - Parcelas do Balanço Hídrico nos Domínios Isoietais I, II e III dadas em percentual, tendo como comparação os valores médios históricos de chuva**

Considerando-se a constituição e estruturação dos litotipos que compõem cada um dos domínios, e que influem na capacidade de recarga subterrânea e na distribuição de água superficial, pode-se afirmar que existe no Domínio Isoietal I e II, de forma geral, uma produção de água subterrânea muito mais elevada. Por outro lado, no Domínio Isoietal III existem áreas onde o excedente hídrico ocorre de forma muito pontual, existindo bacias em condições de recarga extremamente baixas.

Importante destacar, de acordo com os dados levantados, que existe uma variação importante entre os resultados do balanço hídrico das bacias dentro de cada um dos domínios estabelecidos. Como o balanço hídrico naturalmente reflete um conjunto de variáveis climáticas, fisiográficas e geológicas, as variações observadas dentro de cada um dos Domínios Isoietais não podem ser justificadas de forma categórica, uma vez que se torna necessário o detalhamento das variáveis em uma escala maior.

As tendências destacadas acima, bem como algumas das variações identificadas dentro de cada um dos três grandes Domínios Isoietais, são discutidas adiante no

documento onde são apresentadas as diferentes condições hidrogeológicas ao longo da bacia do rio São Francisco. Importante ressaltar que, embora a análise das parcelas hídricas seja aplicada dentro de uma determinada bacia hidrográfica, a análise do cenário hidrogeológico a ser apresentado no estudo, permite apontar em quais bacias verificam-se anomalias entre as relações dos parâmetros identificados no balanço, considerando-se os valores comparativos de forma ponderada e específica.

E, por fim, cumpre ressaltar que todo esse esforço comparativo ainda merecerá nova análise, após terem sido incluídos os cálculos das descargas específicas e totais oriundas dos exutórios do Chapadão Urucuia que drenam toda a porção oeste da Serra Geral de Goiás, conformando parte das cabeceiras dos afluentes da margem direita do Alto Tocantins.

### **2.3.5 Escoamento subterrâneo calculado x vazões de permanência e de referência**

No âmbito da concessão das outorgas de águas superficiais são utilizadas pelos órgãos gestores vazões de referência. Esse item tem como objetivo comparar o escoamento de base obtido pela metodologia adotada nesse estudo (valores de escoamento subterrâneo calculados a partir da análise dos hidrogramas) em relação às vazões de referência:  $Q_{90}/Q_{50}$ ,  $Q_7$  e  $Q_{7/10}$ .

A vazão  $Q_{50}$  representa a vazão que é superada ou igualada em 50% do tempo, e corresponde a uma vazão de 50% de garantia de ocorrência. A vazão  $Q_{90}$ , por sua vez, corresponde à vazão que é superada ou igualada em 90% do tempo, correspondendo a uma vazão com 90% de garantia de ocorrência. Os valores são calculados a partir da curva de permanência de vazões.

A relação  $Q_{90}/Q_{50}$  é utilizada para avaliar o percentual de vazão que provém de águas subterrâneas. Essa relação pode ser comparada à relação de Escoamento Subterrâneo/Vazão média. A Tabela 2.7 apresenta os valores da vazão total nas estações e a vazão equivalente ao escoamento subterrâneo calculado para cada estação. Além disso, apresenta o resultado dos cálculos das vazões  $Q_{90}$ ,  $Q_{50}$ ,  $Q_{90}/Q_{50}$ ,  $Q_7$ ,  $Q_{7/10}$  e escoamento subterrâneo / vazão total. Pode-se observar que os valores de  $Q_{90}/Q_{50}$  tendem a ser próximos dos valores calculados para a razão escoamento subterrâneo / vazão total em muitas das estações (Tabela 2.7).

**Tabela 2.7 - Resultado das vazões de referência para cada estação fluviométrica.**

Código	Estação fluviométrica	Curso d'água	Área km <sup>2</sup>	Vazão m <sup>3</sup> /s	Esc. Sub. m <sup>3</sup> /s	Q90	Q50	Q90/Q50	Esc. Sub / Vazão	Q7	Q7,10
										m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s
40032000	Fazenda Samburá	Rio Samburá	760,35	18,87	10,93	7,87	13,57	0,58	0,58	7,39	5,66
40037000	Fazenda da Barra	Rio Santo Antônio	763,58	23,65	10,55	5,81	11,74	0,50	0,45	5,33	3,32
40050000	Iguatama	Rio São Francisco	5382,1	107,24	58,37	32,19	65,18	0,49	0,54	30,23	20,39
40053000	Calciolândia	Rio São Miguel	329,47	3,95	1,52	0,54	1,57	0,34	0,39	0,57	0,09
40060001	Tapiraí Jusante	Rio Perdição	593,88	12,27	7,33	5,16	9,14	0,56	0,60	5,05	3,86
40070000	Ponte do Chumbo	Rio São Francisco	9963,84	179,81	95,57	54,20	113,00	0,48	0,53	48,99	36,83
40080000	Taquaral	Rib. São Mateus Grande	581,84	10,28	4,6	1,36	4,50	0,30	0,45	1,12	0,55
40500000	Martinho Campos	Rio Picão	759,47	8,43	4,18	2,20	5,05	0,44	0,50	2,32	1,13
40530000	Abaeté	Ribeirão Marmelada	393,79	7,05	2,85	0,67	2,82	0,24	0,40	0,58	0,14
40850000	Ponte da Taquara	Rio Paraopeba	8792,92	124,7	63,84	35,77	82,67	0,43	0,51	32,92	17,38
40975000	Fazenda São Félix	Rio Borrachudo	944,67	27,25	9,03	2,27	6,59	0,34	0,33	2,41	1,37
41050000	Major Porto	Ribeirão Areado	1192,57	19,73	8,27	3,85	9,21	0,42	0,42	3,44	2,12
41075001	Porto do Passarinho	Ribeirão dos Tiros	4135,7	70,85	27,25	13,94	32,90	0,42	0,39	11,77	7,28
41250000	Vespasiano	Ribeirão da Mata	723,07	8,11	3,94	2,25	4,85	0,46	0,49	2,34	0,52
41380000	Ponte Preta	Rio Jabuticabas	576	6,77	2,82	1,67	3,58	0,47	0,42	1,68	0,67
41650002	Ponte do Licínio - Jusante	Rio das Velhas	10569,23	135,9	68,65	45,80	84,20	0,54	0,51	45,13	27,58
41685000	Ponte do Picão	Ribeirão do Picão	847,48	3,28	1,21	0,26	1,31	0,20	0,37	0,37	0,08
41780002	Presidente Juscelino - Jusante	Rio Parauninha	3994,53	76,84	24,8	13,34	31,02	0,43	0,32	12,13	7,42
41818000	Santo Hipólito (ANA/CEMIG)	Rio das Velhas	16634,29	207,36	96,93	62,55	118,31	0,53	0,47	61,76	41,26
41890000	Estação de Curimataí	Rio Curumataí	1371,79	17,84	4,02	1,54	4,94	0,31	0,23	1,53	0,83
41940000	Ponte do Bicudo	Rio do Bicudo	2033,22	18,54	6,73	1,16	6,28	0,19	0,36	1,11	0,13
41990000	Várzea da Palma	Rio das Velhas	26517,38	300,25	130,34	67,50	158,50	0,43	0,43	65,85	39,88
42100000	Claro dos Poções	Rio São Lamberto	447,13	4	1,03	0,29	1,07	0,28	0,26	0,50	0,12
42145498	Fazenda Umburana Montante	Rio Jequitai	6817,01	42,07	13,58	3,34	12,86	0,26	0,32	3,69	0,70
42187000	Ponte dos Ciganos	Rio Pacuí	1372,41	6,42	3,08	1,64	3,54	0,46	0,48	2,08	0,95
42251000	Fazenda Córrego do Ouro	Rio Escuro	1849,39	28,52	15,25	7,43	18,11	0,41	0,54	7,52	3,52
42257000	Barra do Escurinho	Ribeirão do Escurinho	2060,18	26,75	13,5	6,86	17,36	0,40	0,51	6,95	2,83
42290000	Ponte da BR-040 Paracatu	Rio Paracatu	7672,36	100,33	46,17	21,86	52,51	0,42	0,46	20,70	12,72
42365000	Ponte da BR-040 Prata	Rio da Prata	3509,34	52,2	18,69	12,35	27,03	0,46	0,36	13,95	7,36

**Tabela 2.8 - Resultado das vazões de referência para cada estação fluviométrica – Continuação.**

42395000	Santa Rosa	Rio Paracatu	12951,92	166,27	80,86	40,03	93,42	0,43	0,49	38,62	22,52
42435000	Fazenda Barra da Égua	Ribeirão Barra da Égua	1545,5	17,28	7,81	2,30	9,11	0,25	0,45	2,84	0,76
42440000	Fazenda Poções	Rio São Pedro	581,01	8,57	3,77	1,90	4,49	0,42	0,44	1,94	0,95
42600000	Porto dos Poções	Rio Preto	9289,06	114,8	56,34	28,20	71,99	0,39	0,49	30,18	13,29
42690001	Porto da Extrema	Rio Paracatu	30043,28	343,6	162,77	72,08	196,53	0,37	0,47	70,42	33,72
42840000	Veredas	Rio Santo Antônio	219,35	3,36	1,65	1,30	2,29	0,57	0,49	1,24	0,75
42850000	Cachoeira das Almas	Rio do Sono	4211,79	51,72	21,17	8,72	27,58	0,32	0,41	8,36	3,20
42980000	Porto Alegre	Rio Paracatu	41158,72	476,26	226,42	110,87	281,97	0,39	0,48	112,93	53,53
43250002	Buritis-Jusante	Rio Urucuia	2829,42	41,6	15,09	6,57	18,35	0,36	0,36	5,77	2,58
43300000	Fazenda Carvalho	Rio São Domingos	3156,48	45,63	21,17	9,32	28,01	0,33	0,46	8,14	4,12
43429998	Arinos - Montante	Rio Urucuia	11756,95	143,05	66,73	27,22	79,62	0,34	0,47	24,39	11,19
43670000	Vila Urucuia	Rio Urucuia	18495,91	205,51	88,56	37,05	111,42	0,33	0,43	36,60	17,98
43880000	Santo Inácio	Rio Urucuia	23758,98	241,9	108,61	45,33	136,29	0,33	0,45	44,61	21,53
44250000	Usina do Pandeiros - Montante	Rio Pandeiros	3718,57	23,41	15,06	11,68	19,41	0,60	0,64	13,46	8,91
44540000	Fazenda Bom Retiro	Rio Japoré	600,18	1,84	0,98	0,80	1,27	0,63	0,53	0,86	0,54
44630000	Capitão Enéas	Rio Verde Grande	3541,31	7,34	1,81	0,37	1,80	0,21	0,25	1,07	0,00
44670000	Colônia do Jaíba	Rio Verde Grande	12175,09	17,9	5,87	0,55	5,19	0,11	0,33	1,57	0,00
45210000	Lagoa das Pedras	Rio Caririnha	12172,97	131,22	96,34	88,57	117,57	0,75	0,73	93,29	76,80
45220000	Capitânea	Rio Coxá	2488,85	12,42	8,02	6,76	10,48	0,65	0,65	7,34	4,95
45260000	Juvenília	Rio Caririnha	15971,76	145,48	105,91	97,47	129,45	0,75	0,73	102,74	83,24
45740001	Mocambo	Rio Guará	8624,77	41,61	29,28	26,59	37,44	0,71	0,70	27,55	22,41
45770000	Arrojado	Rio Arrojado	5650,21	58,86	47,13	45,28	55,43	0,82	0,80	46,98	41,28
45880000	Colônia do Formoso	Rio Formoso	10200,66	82,48	65,03	60,23	76,85	0,78	0,79	64,31	53,66
45960001	Porto Novo	Rio Corrente	31409,62	217,53	163,58	148,54	195,18	0,76	0,75	156,50	131,32
46415000	Sítio Grande	Rio Grande	5012,81	32,65	23,5	21,20	30,80	0,69	0,72	22,54	16,68
46455000	Derocal	Rio das Fêmeas	6430,72	50,73	37,49	35,48	47,01	0,76	0,74	36,48	30,47
46490000	Fazenda Coqueiro	Rio São Desidério	6360,66	6,44	3,74	3,04	4,74	0,64	0,58	3,32	2,24
46543000	Fazenda Redenção	Rio de Ondas	5322,22	50,59	36,11	34,41	46,08	0,75	0,71	34,10	27,60
46550000	Barreiras	Rio Grande	18959,61	108,51	80,57	58,12	80,50	0,72	0,74	61,33	46,73
46590000	Nova Vida - Montante	Rio Branco	7743,62	51,43	39,42	38,16	47,80	0,80	0,77	38,72	33,89
46610000	São Sebastião	Rio Grande	33614,56	191,52	140,13	130,26	176,70	0,74	0,73	134,76	112,72

**Tabela 2.9 - Resultado das vazões de referência para cada estação fluviométrica – Continuação.**

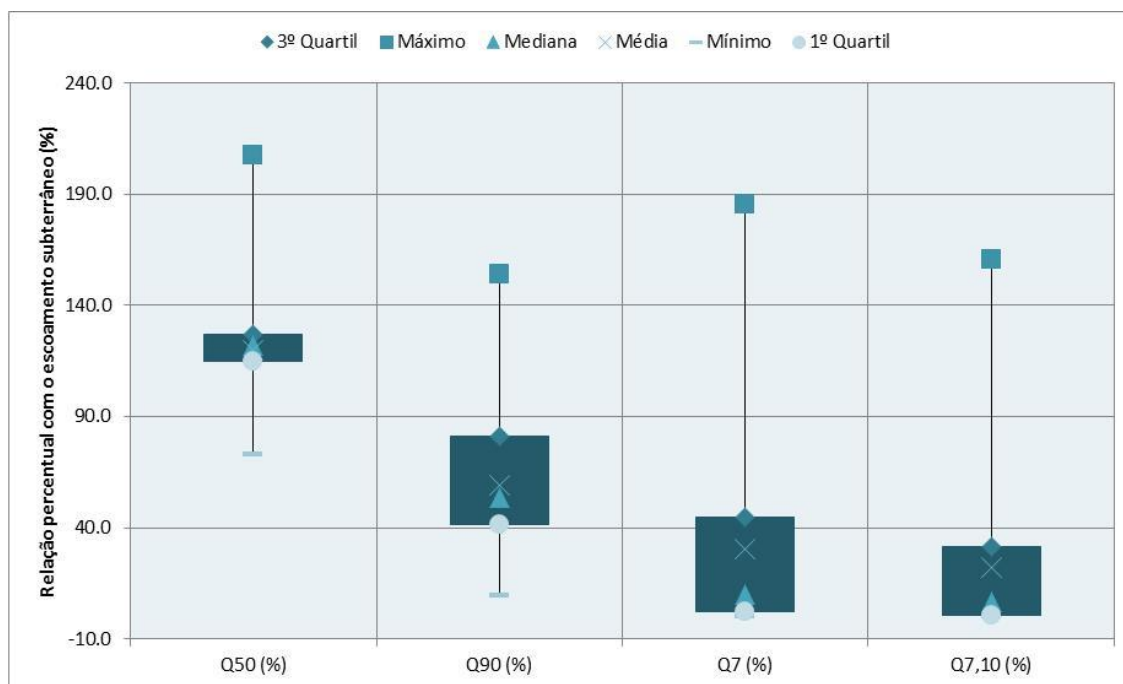
46650000	Tagua	Rio Grande	36564,89	107,95	79,37	122,44	164,65	0,74	0,74	126,85	105,35
46870000	Fazenda Porto Limpo	Rio Preto	22459	106,63	75,65	75,57	94,48	0,80	0,71	74,10	66,87
46902000	Boqueirão	Rio Grande	46884,74	265,07	191,69	185,48	246,61	0,75	0,72	185,50	160,86
47249000	Rio Verde II	Rio Verde	7008,24	2,55	0,72	0,14	0,65	0,21	0,28	0,30	0,00
47480000	Jaguaraci	Rio Jacaré ou Vereda do Romão	9446,66	0,67	0,31	0,12	0,38	0,32	0,46	0,22	0,00
47900000	Abreus	Rio Pacuí	12091,03	0,77	0,46	0,31	0,57	0,55	0,60	0,35	0,16



A vazão  $Q_7$  representa o valor médio da série histórica das vazões mínimas das médias móveis de sete dias, ao longo do período de dados das estações fluviométricas. A vazão mínima das médias móveis de sete dias, considerada ano a ano, também pode ser relacionada à contribuição subterrânea, uma vez que é medida em períodos de baixas vazões, durante a estiagem, quando a vazão superficial é mantida pelo fluxo de base.

A vazão  $Q_{7,10}$  é a vazão mínima média de sete dias consecutivos com um tempo de retorno de dez anos. Ou seja, é calculada a partir do menor valor anual das vazões médias de 7 dias consecutivos, com probabilidade de ocorrência de, em média, uma a cada 10 anos. Essa é a menor e mais restritiva das vazões de referência, porém é a que apresenta maior garantia de ocorrência (próximo de 100%). É definida através da análise estatística das  $Q_7$  de cada ano, ordenando na ordem crescente aplicando-se uma distribuição estatística de vazão mínima (Distribuição de Gumbel ou Weibull, por exemplo).

O gráfico da Figura 2.33 apresenta os diagramas do tipo *box-plot* (1º e 3º quartis, média, mediana, máximo e mínimo) dos valores percentuais representativos das vazões de referência ( $Q_{50}$ ,  $Q_{90}$ ,  $Q_7$  e  $Q_{7,10}$ ) em relação as vazões de escoamento subterrâneo calculados. A Tabela 3.8 corresponde aos valores utilizados para confeccionar o gráfico *box-plot*.



**Figura 2.33 - Gráfico box-plot com a relação percentual entre os valores de Q50, Q90, Q7 e Q7,10 e o escoamento subterrâneo.**

O gráfico box-plot é utilizado para avaliar a distribuição dos dados, permitindo uma comparação visual entre dois ou mais grupos. Os quartis são valores obtidos a partir do conjunto de observações ordenado em ordem crescente que dividem as observações em quatro partes iguais. O 1º quartil é o número maior que 25% das observações e menor que 75%. A mediana marca o valor central do conjunto, onde 50% das observações são maiores que a mediana e 50% são menores. O 3º quartil define o valor maior que 75% dos dados e abaixo de 25%. O valor médio utilizado representa a média aritmética, que corresponde a soma dos valores de cada indivíduo da amostra dividido pelo tamanho amostral ( $n$ ). O valor máximo representa o maior valor do conjunto amostral e o mínimo o menor valor.

**Tabela 2.10 - Estatística descritiva dos valores amostrais de  $Q_{50}$ ,  $Q_{90}$ ,  $Q_7$  e  $Q_{7,10}$ .**

	$Q_{50}$ (%)	$Q_{90}$ (%)	$Q_7$ (%)	$Q_{7,10}$ (%)
<b>Máximo</b>	207.5	154.3	185.5	160.9
<b>3º Quartil</b>	126.8	81.4	44.7	31.3
<b>Mediana</b>	122.0	53.6	10.1	6.5
<b>Média</b>	119.9	59.3	30.6	22.1
<b>1º Quartil</b>	114.6	41.6	2.0	0.8
<b>Mínimo</b>	73.0	9.4	0.2	0.0

Conforme observado nas Figuras 2.34 e 2.35 os valores de  $Q_{50}$  são superiores ao escoamento subterrâneo calculado para a maioria das bacias. Em 88% das bacias (58 de um total de 66) o  $Q_{50}$  teve, em média, valores 24,1% maiores que o escoamento subterrâneo. Os outros 12% das bacias tiveram valores médios 7,1% inferiores ao escoamento subterrâneo (Figura 2.35 e Tabela 2.10).

Conforme observado nas Figuras 2.33 e 2.34, a média e a mediana das porcentagens de  $Q_{90}$  situam-se próximos à metade do valor de escoamento subterrâneo da maioria das bacias. A média e a mediana das porcentagens de  $Q_7$  situam-se abaixo da metade do valor de escoamento subterrâneo da maioria das bacias, enquanto a média e a mediana das porcentagens de  $Q_{7,10}$  são ainda inferiores à vazão de  $Q_7$ , e conseqüentemente ainda menores em relação ao escoamento subterrâneo calculado.

Portanto, o valor médio da série histórica das vazões mínimas ( $Q_7$ ) e a vazão mínima média de sete dias consecutivos com um tempo de retorno de dez anos ( $Q_{7,10}$ ) são valores muito inferiores ao valor do escoamento subterrâneo calculado para as bacias utilizando a análise dos hidrogramas. Além disso, pode-se afirmar que a vazão calculada para o escoamento subterrâneo é menor do que a vazão de referência de 50% de garantia de ocorrência ( $Q_{50}$ ), sendo, entretanto, uma vazão maior do que a vazão de referência de 90% de garantia de ocorrência. Assim, o percentual de vazão que provém de águas subterrâneas em uma dada bacia, utilizando a análise dos hidrogramas adotadas nesse estudo tende a ser maior do que o percentual obtido pela razão  $Q_{90}/Q_{50}$ .

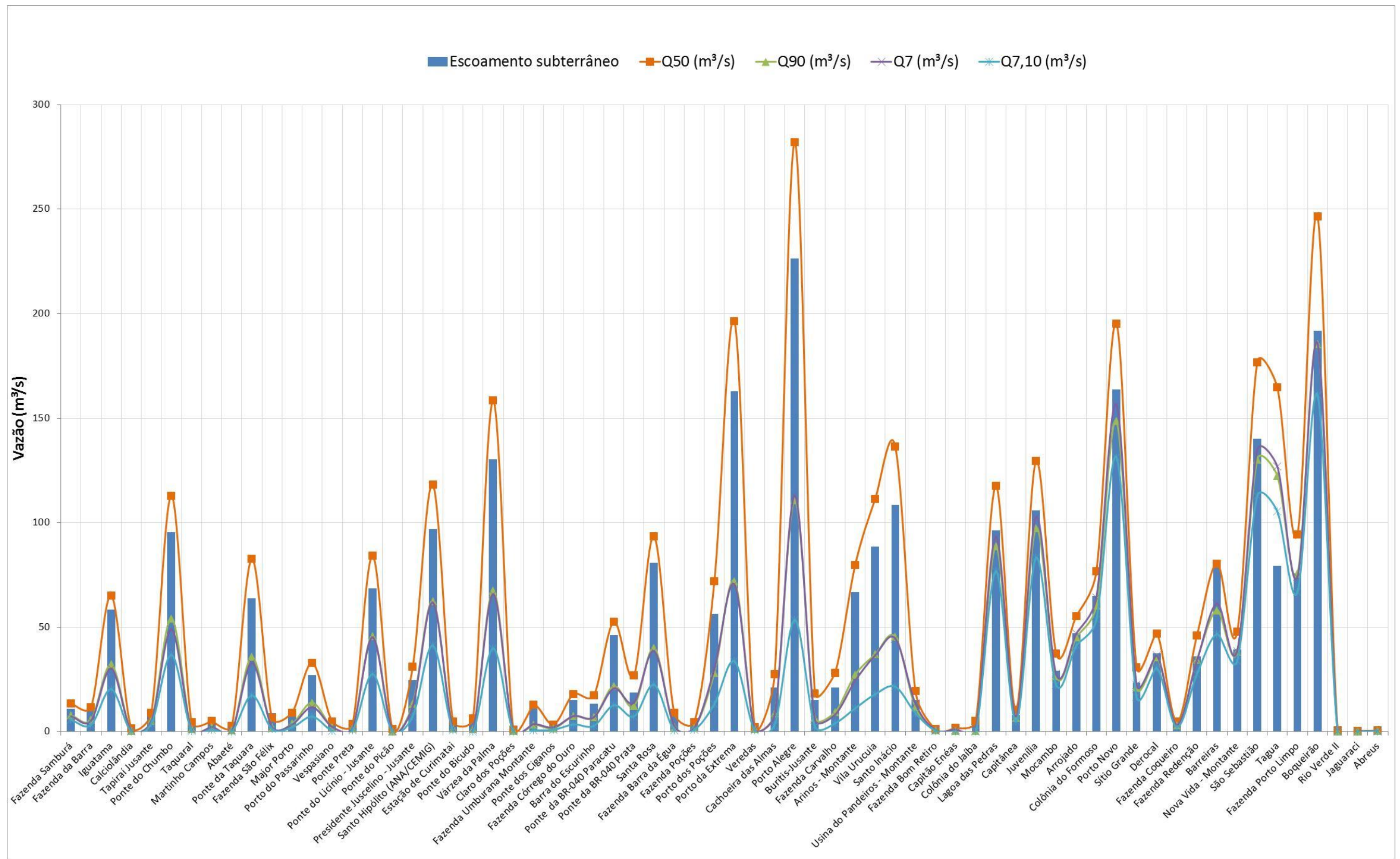


Figura 2.34 - Gráfico comparativo dos valores de vazão do escoamento subterrâneo e as vazões de referência Q50, Q90, Q7 e Q7,10 de cada bacia avaliada.



**Figura 2.35 - Gráfico box plot com a relação percentual entre Q50 e o valor do escoamento subterrâneo.**

**Tabela 2.11 - Estatística descritiva dos valores amostrais de  $Q_{50}$  inferiores e superiores ao escoamento subterrâneo**

	$Q_{50}$ Superior	$Q_{50}$ Inferior
<b>Máximo</b>	107.5	-0.1
<b>3º Quartil</b>	27.7	-0.8
<b>Mediana</b>	23.2	-5.3
<b>Média</b>	24.1	-7.1
<b>1º Quartil</b>	19.0	-10.6
<b>Mínimo</b>	3.0	-27.0

### **3. PROPOSTA DE DIVISÃO EM UNIDADES DE GESTÃO DAS ÁGUAS - UGAS**

As Unidades de Gestão das Águas - UGAs (Figura 3.1) foram criadas em função da necessidade de se estabelecer um espaço físico cujos atributos responsáveis pelo regime de circulação dos fluxos e pelo comportamento hidrológico fossem expressos pela equivalência e similaridade de sua assinatura hidrodinâmica. Tal domínio caracteriza-se por uma condição de contorno coincidente ao traçado dos polígonos das cumeadas que configuram um agrupamento de bacias hidrográficas.

Analisando-se os materiais geológicos, as condições naturais hidroclimatológicas e as relações topográficas e de gradiente hidráulico de modo integrado aos componentes do balanço hídrico é possível conceber quais são os espaços físicos que se constituem em uma fração homogênea e integralizada do sistema hidrológico São Francisco, e que podem ser consideradas como entidades individualizadas de gestão do recurso água, dada à equivalência de suas características intrínsecas, naturalmente, consideradas em uma escala regional de análise.

Ou seja, as UGAs levam em consideração pelos menos três atributos de interesse, quais sejam:

- As variações normais da intensidade de distribuição das precipitações pluviométricas;
- A conformação do relevo e sua forma de distribuição geográfica diante de seus desníveis altimétricos, implicando em um padrão geomorfológico com suas distintas configurações topográficas; e,
- As condicionantes geológicas e estruturais, enquanto materiais responsáveis pela capacidade natural do meio em permitir o armazenamento e a circulação da água.

Foram consideradas através das análises do comportamento das descargas de base de 67 estações fluviométricas e suas bacias de contribuição, os respectivos padrões comportamentais de descarga subterrânea média específica, sendo estas descargas consideradas como um dos principais atributos hidrogeológicos de interesse no reconhecimento das formas de integração dos volumes de água que constituem cada uma das parcelas do balanço hídrico. Entende-se, pois, que o melhor atributo a ser

considerado como o mais representativo na análise integrada entre as águas superficiais e subterrâneas, se refere ao escoamento de base em cada um dos ambientes aquíferos de interesse.

As UGAs possuem características hidrogeológicas que as tornam, sob a ótica de seu comportamento hídrico, no tempo e no espaço, um corpo gerenciável uma vez que pressupõe o entendimento acerca dos fatores que controlam a distribuição volumétrica ponderada dos aportes de água no interior dos sistemas aquíferos.

Esse método leva em consideração a tomada de informações consistidas acerca dos processos de separação dos escoamentos superficial e subterrâneo, tendo sido gerado um conjunto de variáveis médias anuais das estações fluviométricas de interesse, o que possibilitou a compreensão dos diversos fatores julgados essenciais à seleção dos domínios em que estão conformadas as UGAs.

Tendo sido justificados os procedimentos de estudo para reconhecimento de importantes propriedades hidrodinâmicas da BSF e da equivalência acerca da natureza de seus atributos fundamentais, o resultado obtido foi estampado pela delimitação de 10 unidades de gestão, que, de modo contíguo, integram o mosaico da rede de drenagem mantida pelos sistemas aquíferos cársticos e fissuro-cársticos contidas em seu domínio hidrográfico. A Figura 3.1 ilustra a distribuição geográfica das UGAs, suas dimensões e os cursos d'água que as compõem.

Adiante, para cada uma das UGAs, são apresentadas informações sobre o balanço hídrico nas sub-bacias, com destaque para os valores das vazões subterrâneas específicas e a proposição de zonas de recarga.

Em termos de espacialização geográfica das zonas de recarga e descarga foram avaliadas as áreas com suas vocações naturais em função de atributos específicos que levaram em consideração, fundamentalmente, não só a capacidade de determinado tipo de rocha à infiltração, em termos de sua porosidade e condutividade hidráulica natural, mas as condições altimétricas regionais.

Os distintos litotipos presentes na área de estudo foram associados a valores de porosidade efetiva para fluxo (ver capítulo 2, item 2.8) e em seguida, classificados quanto a potencialidade hidrogeológica (Zonas Não-Aquíferas – ZNA, Zonas de Aquíferos Pobres - ZAP e Zonas Aquíferas - ZA).

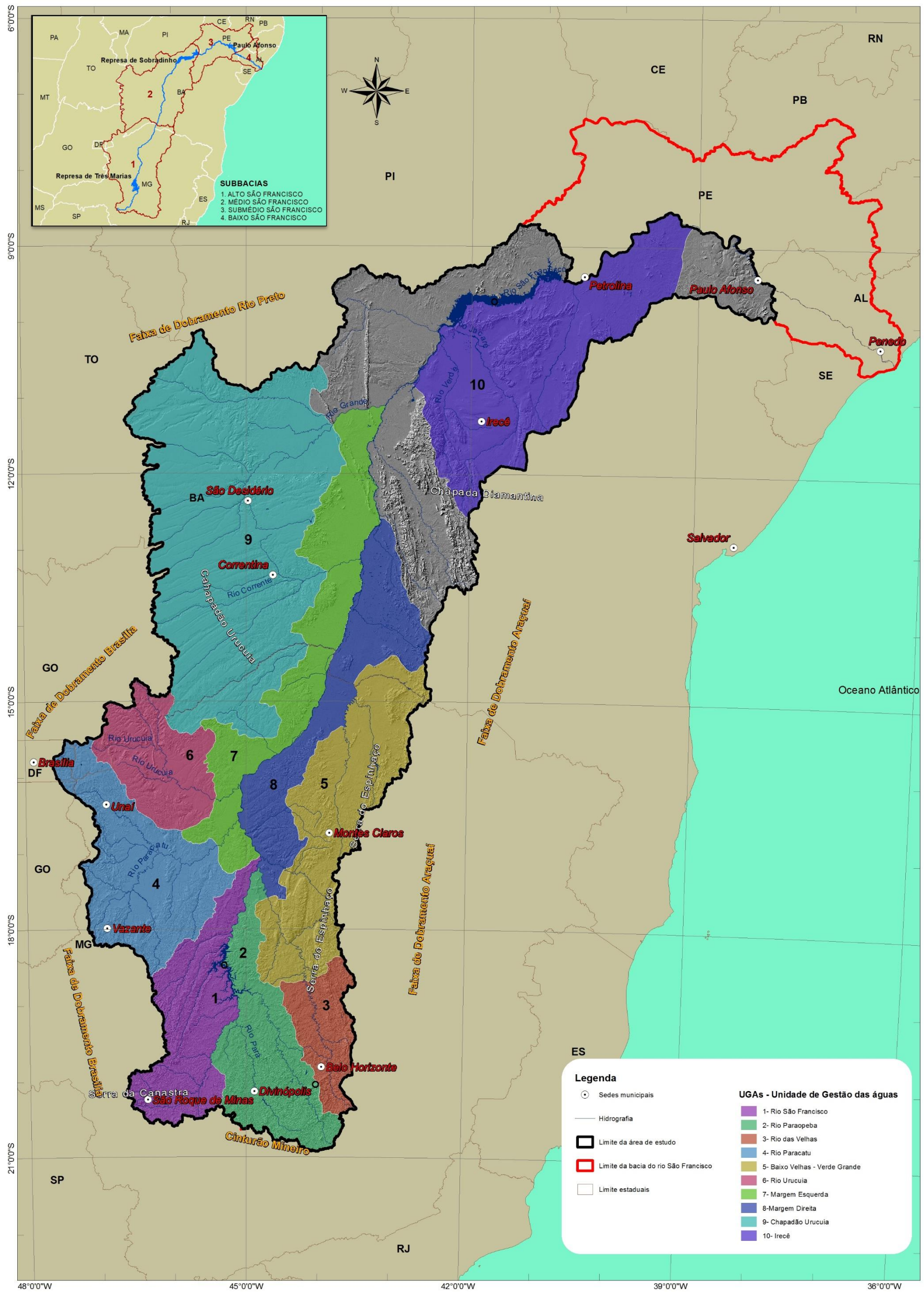


Figura 3.1 - UGAs – Unidades de gestão das águas na bacia do rio São Francisco



A identificação das ofertas hídricas subterrâneas, diante do cenário ambiental e territorial de análise, é contemplada de acordo com as tipologias hidrogeológicas adotadas e distribuídas geograficamente no interior de cada unidade de gestão proposta, onde, naturalmente, os domínios citados acima conformam importantes agentes condicionadores dos processos de recarga e descarga dos aquíferos, mensuradas dentro dos limites de cada UGA.

Por fim, tendo em vista a posição altimétrica dos litotipos, que tem grande influência no gradiente hidráulico e na velocidade dos fluxos, as classes de recarga foram estabelecidas, conforme mostra a Tabela 3.1. Desse modo, as áreas de recarga contidas nas UGAs compreendem o seu espaço subdividido em áreas com menor ou maior potencial à absorção dos volumes infiltrados pelas precipitações pluviométricas.

Importante enfatizar, que os mapas apresentados têm como finalidade mostrar onde estão as áreas cujos atributos naturais tem maior capacidade intrínseca para absorver as águas das chuvas e contribuir para a descarga fluvial. Entretanto, a recarga efetiva irá ocorrer somente se o montante das chuvas for superior ao montante da evapotranspiração, e, ainda, se tal excedente hídrico ocorrer em zonas com potencial efetivo de recarga.

Foi ainda destacada nos mapas das UGAs uma diferenciação dos corpos hídricos superficiais, tendo em vista uma classificação inicial das zonas de descarga potenciais ao longo da bacia. Estas foram separadas, diante da escala de abordagem do referido estudo, em três grupos: descargas locais, intermediárias e regionais.

As descargas de caráter local referem-se àquelas drenagens vinculadas diretamente à manutenção dos fluxos de base das microbacias tributárias dos talwegues mais elevados, ou seja, encontram-se situadas em zonas de relevo mais acidentado e de altimetria mais elevada, majoritariamente, embora em diversas zonas mais arrasadas e rebaixadas do relevo também possam existir essas drenagens que recebem os aportes de contribuição local de fluxos oriundos de suas próprias vizinhanças.

Tabela 3.1 - Classificação das zonas de recarga utilizando os critérios geologia, altimetria e porosidade efetiva para fluxo.

CLASSIFICAÇÃO DAS ZONAS DE RECARGA POTENCIAL	
<b>ZONAS DE FLUXO DESPREZÍVEL (ZFD)</b>	
<b>GEOLOGIA</b>	Em geral estão representados pelos tipos litológicos compreendidos por rochas de afiliação argilosa - folhelhos, argilito e siltitos, ou por material de origem vulcânica - basaltos, diques de rochas máficas; materiais de origem metamórfica tais como os filitos, xistos e metabásicas em geral.
<b>TOPOGRAFIA / ALTIMETRIA</b>	Todos os intervalos de relevo.
<b>DOMÍNIOS HIDROGEOLÓGICOS / POROSIDADE EFETIVA PARA FLUXO</b>	Referem-se às zonas não-aquíferas (ZNA), onde o potencial hidrogeológico é incipiente ou desprezível, cujos valores de porosidade efetiva são iguais ou menores que 2,5%.
Nota: Nestes domínios a matriz rochosa encontra-se muito fechada, com porosidades efetivas para fluxo praticamente ausentes e baixo grau de interconexão hidráulica. Propriedades hidrogeológicas vinculadas a ambientes de muito baixa condutividade hidráulica e baixa transmissividade, aquitardes e aquifugos - funcionando predominantemente como zonas impermeáveis.	
<b>ZONAS DE RECARGA RESTRITA (ZRR)</b>	
<b>GEOLOGIA</b>	Em geral estão representados pelos tipos litológicos compreendidos pelos complexos cristalinos ou certos tipos de xistos e associações vulcano-sedimentares, margas e siltitos.
<b>TOPOGRAFIA / ALTIMETRIA</b>	Altitude entre 500 m e 800 m.
<b>DOMÍNIOS HIDROGEOLÓGICOS / POROSIDADE EFETIVA PARA FLUXO</b>	Referem-se às Zonas de Aquíferos Pobres (ZAP), cujos valores de porosidade encontram-se entre 2,5 e 7,5%.
<b>ZONAS DE RECARGA DISCRETA (ZRD)</b>	
<b>GEOLOGIA</b>	Em geral estão representados pelos tipos litológicos compreendidos pelos complexos cristalinos maciços fraturados, dolomitos, xistos fraturados e associações de rochas metapelíticas com lentes carbonáticas ou de coberturas pelíticas sobre cálcio-xistos, associações arcoseanas com margas e siltitos associados a carbonatos impuros das unidades Paraopeba Indiviso e Canastra, etc.
<b>TOPOGRAFIA / ALTIMETRIA</b>	Altitude menor que 500 m.
<b>DOMÍNIOS HIDROGEOLÓGICOS / POROSIDADE EFETIVA PARA FLUXO</b>	Referem-se às Zonas de Aquíferos Pobres (ZAP), onde o potencial hidrogeológico é um pouco mais elevado, cujos valores de porosidade encontram-se em faixas entre 2,5% e 7,5%.
<b>ZONAS DE RECARGA MEDIANA (ZRM<sub>e</sub>)</b>	
<b>GEOLOGIA</b>	Em geral estão representados pelos tipos litológicos compreendidos pelos complexos cristalinos maciços fraturados, dolomitos, xistos fraturados e associações de rochas metapelíticas com lentes carbonáticas ou de coberturas pelíticas sobre cálcio-xistos, associações arcoseanas com margas e siltitos associados a carbonatos impuros das unidades Paraopeba Indiviso e Canastra, etc.
<b>TOPOGRAFIA / ALTIMETRIA</b>	Altitude entre 800 m e 2020 m.
<b>DOMÍNIOS HIDROGEOLÓGICOS / POROSIDADE EFETIVA PARA FLUXO</b>	Referem-se às Zonas de Aquíferos Pobres (ZAP), cujos valores de porosidade encontram-se em faixas entre 2,5% a 7,5%.
<b>ZONAS DE RECARGA MODERADA (ZRM<sub>o</sub>)</b>	
<b>GEOLOGIA</b>	Em geral estão representados pelos tipos litológicos compreendidos por depósitos aluvionares, coberturas detrito-lateríticas ferruginosas, calcários dolomíticos associados a rochas metapelíticas e outras associações quartzíticas, metarenitos, dolomitos e ardóseas.
<b>TOPOGRAFIA / ALTIMETRIA</b>	Altitude menor que 500 m.
<b>DOMÍNIOS HIDROGEOLÓGICOS / POROSIDADE EFETIVA PARA FLUXO</b>	Referem-se às Zonas Aquíferas (ZA) cujos valores de porosidade efetiva encontram-se em faixas entre 7,5% e 20%. Podem se associar a zonas de pouca espessura não-saturada.
<b>ZONAS DE RECARGA ELEVADA (ZRE)</b>	
<b>GEOLOGIA</b>	Em geral estão representados pelos tipos litológicos compreendidos pelos depósitos aluvionares, coberturas detrito-lateríticas ferruginosas, calcários dolomíticos associados a rochas metapelíticas e outras associações quartzíticas, metarenitos, dolomitos e ardóseas.
<b>TOPOGRAFIA / ALTIMETRIA</b>	Altitude entre 500 m e 800 m.
<b>DOMÍNIOS HIDROGEOLÓGICOS / POROSIDADE EFETIVA PARA FLUXO</b>	Referem-se às Zonas Aquíferas (ZA) cujos valores de porosidade efetiva encontram-se em faixas entre 7,5% e 20%.
<b>ZONAS DE RECARGA ÓTIMA (ZRO)</b>	
<b>GEOLOGIA</b>	Em geral estão representados pelos tipos litológicos compreendidos pelos depósitos aluvionares, coberturas detrito-lateríticas ferruginosas, calcários dolomíticos associados a rochas metapelíticas e outras associações quartzíticas, metarenitos e dolomitos e ardóseas.
<b>TOPOGRAFIA / ALTIMETRIA</b>	Altitude entre 800 m e 2020 m.
<b>DOMÍNIOS HIDROGEOLÓGICOS / POROSIDADE EFETIVA PARA FLUXO</b>	Referem-se às Zonas Aquíferas (ZA) cujos valores de porosidade efetiva estão entre 7,5 % e 20%.

As descargas consideradas intermediárias referem-se às zonas representadas pelos níveis de base intermediários, os quais estão vinculados às calhas de drenagem coletoras das bacias contribuintes do rio SF, ou seja, aquelas que funcionam como zonas receptoras de todos os aportes oriundos das descargas locais e, também, compreendem as demais redes de fluxo existentes em sua bacia de contribuição.

Já as descargas regionais são assumidas pelos domínios compreendidos tanto pelo talvegue do rio SF, como pelas planícies aluviais que aparecem de modo mais evidente, em seus trechos de jusante, aproximadamente a partir da confluência com o rio das Velhas.

De interesse imediato à gestão dos aquíferos, os compartimentos altimétricos que ficam individualizados a partir da separação natural entre os domínios de fluxos elevados, intermediários e regionais, devem necessariamente ser distinguidos e caracterizados quanto às faixas de variação de suas respectivas reservas renováveis, vivas e permanentes, conforme suas relações hidráulicas com cada um desses compartimentos que se delimitam, em profundidade, pelas cotas materializadas junto aos talvegues das referidas drenagens, por onde escoam os fluxos de base. Este deverá ser um tema específico e importante a ser abordado futuramente, tornando-se mais simples a gestão e o reconhecimento dos critérios de avaliação das disponibilidades hídricas, dada a sua relação direta com os respectivos usos das águas subterrâneas.

Utilizando-se o balanço hídrico e os critérios de análise das zonas de recarga e de descarga, foi possível se identificar diferenças que não podem ser justificadas pelas vazões subterrâneas específicas médias encontradas entre bacias vizinhas, cujos materiais constituintes se mostram equivalentes em termos de sua distribuição. Assim, a ocorrência de valores completamente anômalos sugere necessariamente a importação de águas de domínios exteriores, uma vez que não é possível se contabilizar os aportes somente a partir das áreas das bacias onde tais excessos se manifestam. Desse modo, a única possibilidade reside, pois, na conexão entre bacias ou entre ambientes cuja conformação litoestratigráfica permite o aporte de água subterrânea por meio de estruturas que regionalmente estejam conectadas.

Estas anomalias foram observadas de modo evidente tanto ao longo do sistema conformado pelos aquíferos do Chapadão do Urucuia, num regime de exportação de água para os setores ocidentais, como nos limites de cabeceiras conformadas pelas faixas compreendidas pelas rochas quartzíticas da serra da Canastra para o interior da BSF, conforme verificado na UGA 1.

### **3.1 UGA 1 – Rio São Francisco**

A UGA 1 (Figura 3.2 e 3.3, Anexo I) estende-se ao longo de 30.856,29 km<sup>2</sup>, abarcando 13 bacias delimitadas a partir das estações fluviométricas selecionadas para os estudos hidrológicos. Com áreas que variam de 219,40 km<sup>2</sup> a 9.963,80 km<sup>2</sup>, representadas por Veredas e Ponte do Chumbo, respectivamente, tais bacias constituem parte dos subdomínios IIA, IIB e IIIA (conforme descrito no capítulo 3, item 3.2).

As vazões subterrâneas médias específicas relativas à maior parte das cabeceiras de drenagem do Alto Curso SF, em sua porção sudoeste, são as mais elevadas da bacia do rio São Francisco, com valor médio superior a 10,9 L/s.km<sup>2</sup>. Em paralelo, as bacias alongadas situadas logo ao norte da estação Barra do Funchal (Porto Indaiá, Fazenda São Felix e Porto do Passarinho), expressam valores de descarga subterrânea média específica também elevadas (7,5 L/s.km<sup>2</sup>) quando comparadas aos materiais que frequentemente constituem parte do substrato regional, geralmente associados as rochas vulcano-sedimentares do Grupo Mata da Corda, siltitos e pelitos do Grupo Paraopeba Indiviso ou os metassiltitos da Formação serra da Saudade.

As estações que podem ser agrupadas perante esses índices elevados de descarga subterrânea específica são: Fazenda Samburá (14,37 L/s.km<sup>2</sup>), Fazenda da Barra (13.82 L/s.km<sup>2</sup>), Iguatama (10.84 L/s.km<sup>2</sup>), Tapiraí Jusante (12.34 L/s.km<sup>2</sup>), Taquaral (7.9 L/s.km<sup>2</sup>), Ponte do Chumbo (9.6 L/s.km<sup>2</sup>), Fazenda São Felix (9.55 L/s.km<sup>2</sup>), Major Porto (6.93L/s.km<sup>2</sup>), Porto indaiá (6.54 L/s.km<sup>2</sup>), Porto do Passarinho (6.59 L/s.km<sup>2</sup>), Veredas (7.52 L/s.km<sup>2</sup>), Abaeté (7.23 L/s.km<sup>2</sup>) e Calciolândia (4.63 L/s.km<sup>2</sup>). A única exceção recai sobre a bacia conformada pela estação Calciolândia. De forma geral, o valor médio para a descarga subterrânea específica na UGA 1 corresponde a 9,07 L/s.km<sup>2</sup>, e o valor da mediana 7,91 L/s.km<sup>2</sup>.

Situada numa porção cujas médias pluviométricas nas bacias estudadas variam de 1.345 mm a 1.660 mm, tem em sua porção sudoeste, especificamente nas bacias delimitadas pelas estações Fazenda Samburá, Fazenda da Barra e Tapiraí Jusante, as maiores médias de pluviosidade e de vazões subterrâneas específicas encontradas na bacia do rio São Francisco.

Dentre as bacias analisadas dentro da UGA 1, há de se ressaltar aquela estabelecida pela Estação Fazenda Samburá, cuja descarga subterrânea específica média é de 14.37 L/s.km<sup>2</sup>, embora mais de 98% de seus materiais constituintes sejam representados por rochas do Grupo Canastra, classificadas como Zonas de Recarga Mediana (ZRMe - Figura 3.2).

Ao Sul, a presença da serra da Canastra, e um conjunto de serras associadas a Faixa Brasília que topograficamente se alonga por toda a extensão oeste, exterior à bacia do SF, denota a ocorrência de proeminentes estruturas de direção aproximada NW-SE e E-W e que muito provavelmente devem ser responsáveis pela exportação de água dos compartimentos da Faixa Brasília para a BSF, via falhas e fraturas de cunho regional. Isso significa, que apesar do conjunto dos maciços apresentar características de ZRMe, a configuração de suas descontinuidades em zonas específicas cria “corredores” que comunicam hidrogeologicamente os maciços e refletem vazões específicas anômalas para certas bacias.

As Zonas de Recarga Ótima (ZRO - Figura 3.2) dentro da UGA 1 ocorrem associadas às áreas topograficamente elevadas onde afloram principalmente os depósitos inconsolidados, as rochas do Grupo Areado e as rochas carbonáticas do Grupo Bambuí. Essas zonas ocorrem na porção norte da UGA 1, especificamente na bacia do ribeirão dos Tiros e a sul, na cabeceira do rio Samburá, Ajudas e em algumas áreas próximas a calha do rio São Francisco entre São Roque de Minas e Piumhi. Destacam-se ainda as zonas de recarga ótima localizadas em áreas de afloramento de rochas carbonáticas nos municípios de Pains, Arcos e Iguatama.

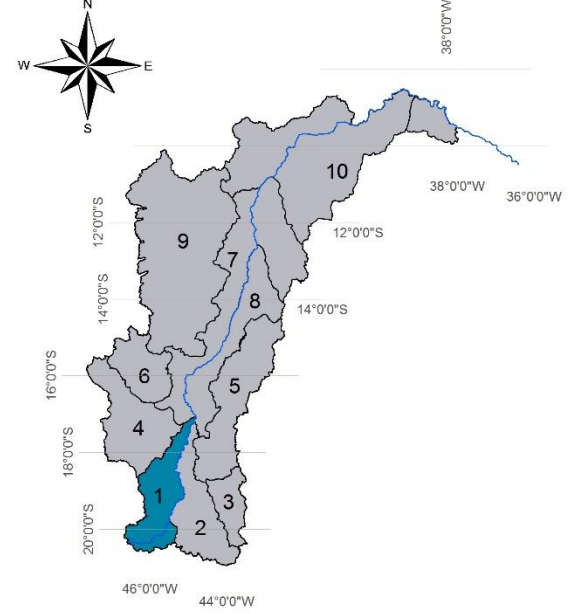
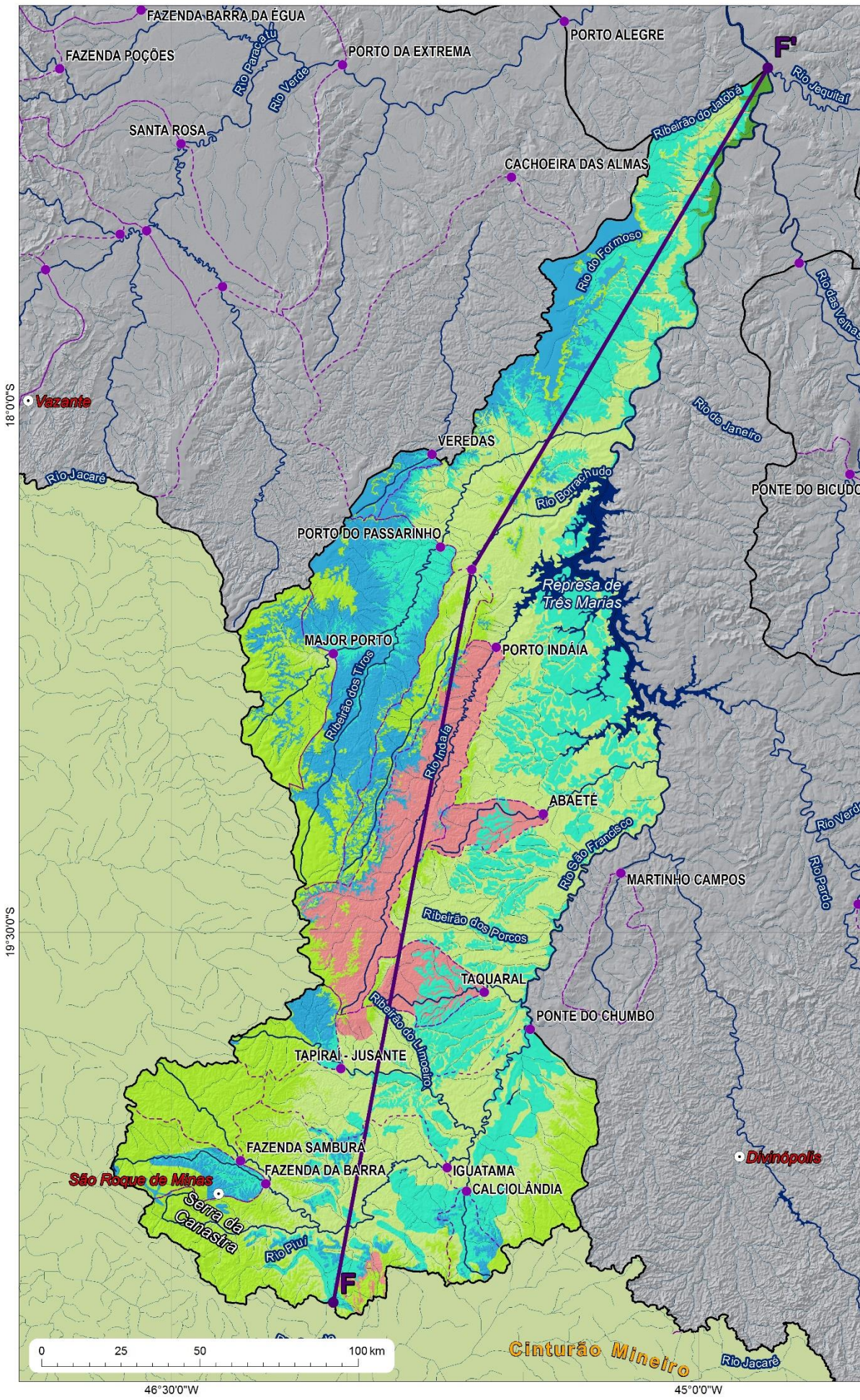
No entorno dessas localidades, em áreas de cotas pouco mais baixas do relevo ocorrem as Zonas de Recarga Elevada (ZRE) associadas aos mantos de cobertura detrito-lateríticas e alguns depósitos aluvionares. Importante lembrar que embora exista

boa permeabilidade nos depósitos aluvionares esses sedimentos podem não estar em condições de recarga efetiva, caso o nível d'água no vale for elevado e a zona não saturada pouco espessa.

As ZRE se estendem ainda para norte, do município de Luz até Morada Nova de Minas, cobrindo as Zonas de Recarga Discreta (ZRD) compostas essencialmente pelos litotipos silto-arenosos da Formação Três Marias, litotipos silto-argilosos da Formação Serra de Santa Helena e da Formação Serra da Saudade.

UGA Rio São Francisco - Zonas de recarga e descarga

Mapas de localização



Legendas

- Estações fluviométricas
  - Sedes municipais
  - Linha seção
  - Zonas de descarga local
  - Zonas de descarga intermediária
  - Zonas de descarga regional
  - Limite UGA
  - Limite sub-bacias
- Zonas de recarga**
- ZFD - ZONAS DE FLUXO DESPREZÍVEL
  - ZRR - ZONAS DE RECARGA RESTRITA
  - ZRD - ZONAS DE RECARGA DISCRETA
  - ZRMe - ZONAS DE RECARGA MEDIANA
  - ZRMo - ZONAS DE RECARGA MODERADA
  - ZRE - ZONAS DE RECARGA ELEVADA
  - ZRO - ZONAS DE RECARGA OTIMA

Perfil topográfico esquemático representativo UGA São Francisco

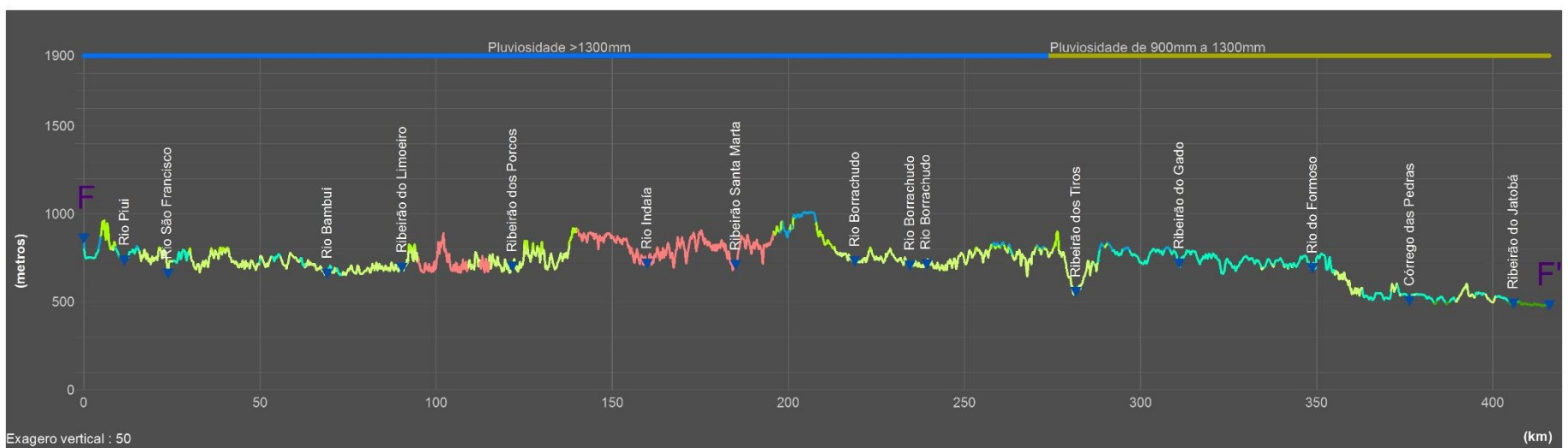
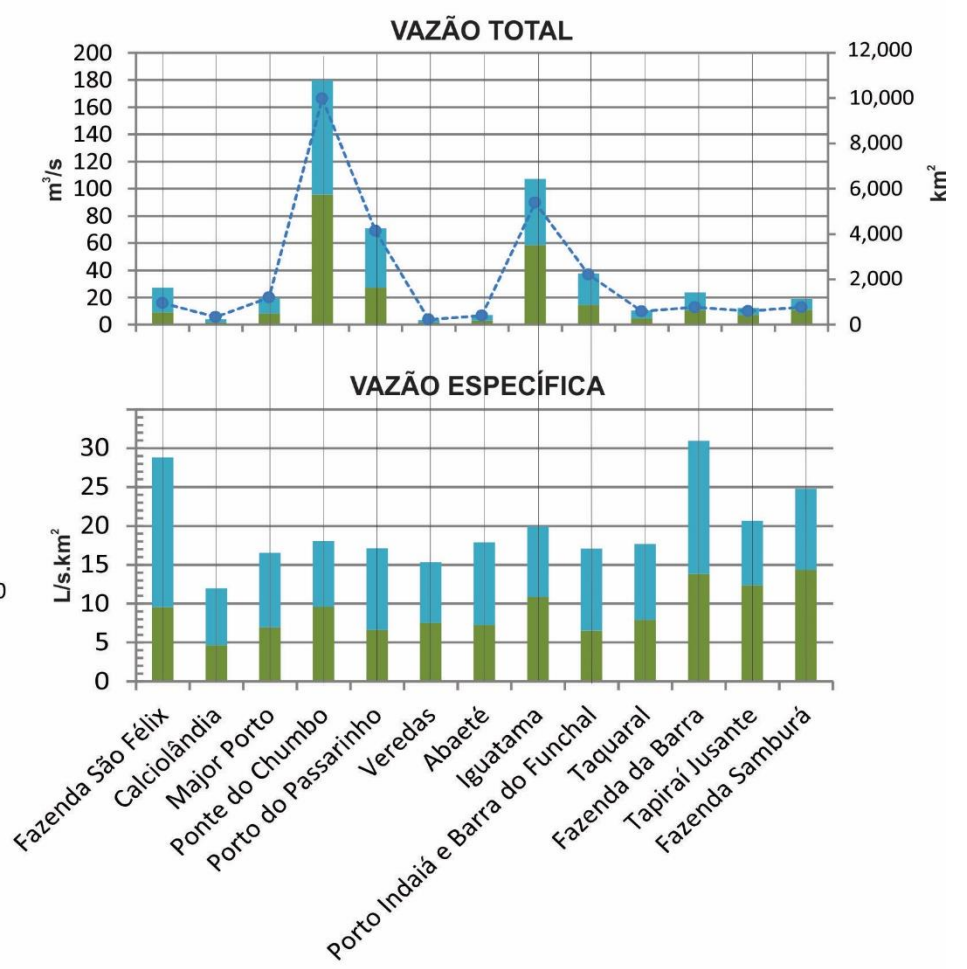
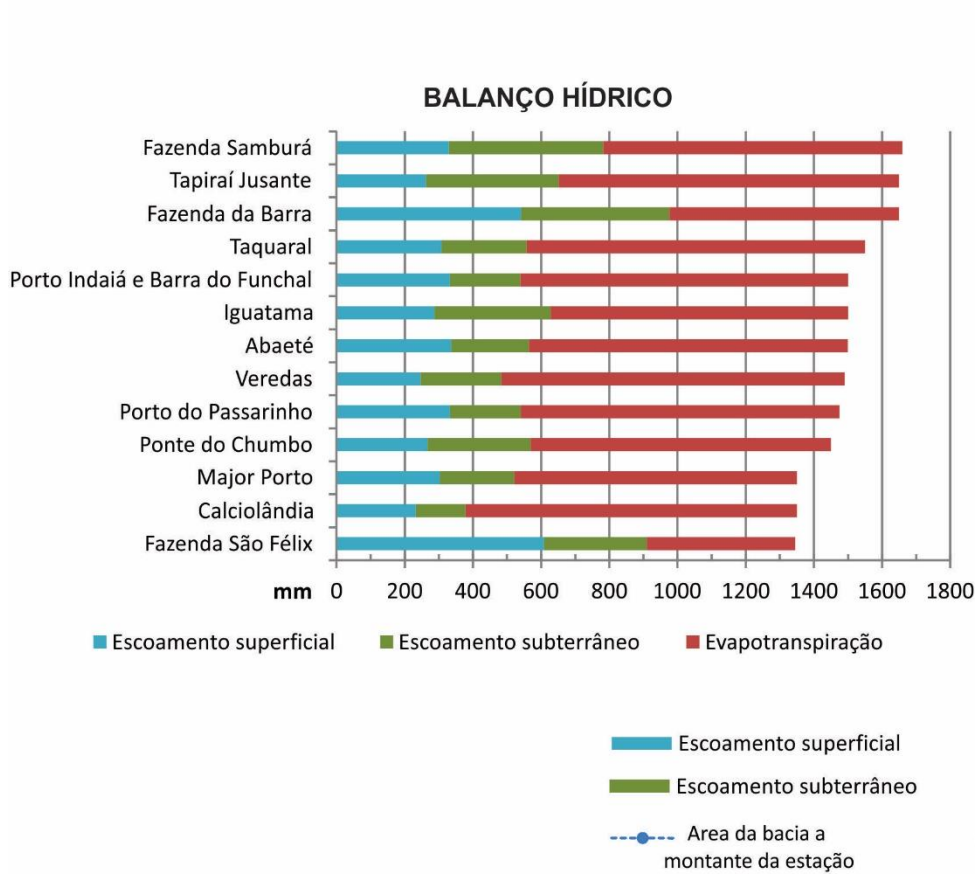


Figura 3.2 - UGA 1 – Rio São Francisco

UGA 1 - Rio São Francisco		Área da bacia a montante da estação km <sup>2</sup>	Precipitação média anual mm	Escoamento total na estação		Escoamento superficial				Escoamento subterrâneo				Evapotranspiração	
Estação Fluviométrica	Curso d'água			vazão m <sup>3</sup> /s	vazão específica l/s.km <sup>2</sup>	vazão m <sup>3</sup> /s	vazão específica l/s.km <sup>2</sup>	valor ponderado pela precipitação %	mm	vazão m <sup>3</sup> /s	vazão específica l/s.km <sup>2</sup>	valor ponderado pela precipitação %	mm	valor ponderado pela precipitação %	mm
Fazenda São Félix	Rio Borrachudo	944.7	1345.2	27.25	28.84	18.2	19.3	45.2	608.2	9.03	9.56	22.4	301.3	32.4	435.6
Calciolândia	Rio São Miguel	329.5	1350.0	3.95	11.99	2.4	7.3	17.2	232.1	1.52	4.63	10.8	145.9	72.0	972.0
Major Porto	Ribeirão Areado	1,192.6	1350.3	19.73	16.54	11.5	9.6	22.4	302.9	8.27	6.93	16.2	218.7	61.4	828.7
Ponte do Chumbo	Rio São Francisco	9,963.8	1450.0	179.81	18.05	84.2	8.5	18.4	266.6	95.57	9.59	20.9	302.5	60.8	880.9
Porto do Passarinho	Ribeirão dos Tiros	4,135.7	1475.0	70.85	17.13	43.6	10.5	22.5	332.5	27.25	6.59	14.1	207.8	63.4	934.7
Veredas	Rio Santo Antônio	219.4	1490.0	3.36	15.33	1.7	7.8	16.5	246.4	1.65	7.52	15.9	237.2	67.5	1006.5
Abaeté	Ribeirão Marmelada	393.8	1500.0	7.05	17.90	4.2	10.7	22.4	336.3	2.85	7.23	15.2	228.1	62.4	935.5
Iguatama	Rio São Francisco	5,382.1	1500.0	107.24	19.93	48.9	9.1	19.1	286.3	58.37	10.85	22.8	342.0	58.1	871.6
Porto Indaiá e Barra do Funchal	Rio Indaiá	2,206.7	1500.0	37.73	17.10	23.3	10.6	22.2	332.8	14.44	6.54	13.8	206.3	64.1	960.9
Taquaral	Rib. São Mateus Grande	581.8	1550.0	10.28	17.67	5.7	9.8	19.9	308.0	4.60	7.91	16.1	249.4	64.0	992.7
Fazenda da Barra	Rio Santo Antônio	763.6	1650.0	23.65	30.97	13.1	17.2	32.8	540.8	10.55	13.82	26.4	435.7	40.8	673.4
Tapiraí Jusante	Rio Perdição	593.9	1650.0	12.27	20.66	4.9	8.3	15.9	262.4	7.33	12.34	23.6	389.2	60.5	998.4
Fazenda Samburá	Rio Samburá	760.4	1660.0	18.87	24.81	7.9	10.4	19.8	329.4	10.93	14.37	27.3	453.1	52.9	877.5
média		2,112.9	1497.7	40.16	19.76	20.7	10.7	22.6	337.3	19.41	9.07	18.9	285.9	58.5	874.5
máximo		9,963.8	1660.0	179.81	30.97	84.2	19.3	45.2	608.2	95.57	14.37	27.3	453.1	72.0	1006.5
mínimo		219.4	1345.2	3.36	11.99	1.7	7.3	15.9	232.1	1.52	4.63	10.8	145.9	32.4	435.6
mediana		763.6	1500.0	19.73	17.90	11.5	9.8	19.9	308.0	9.03	7.91	16.2	249.4	61.4	934.7



Estação	Litologias principais na bacia a montante da estação	vazão subterrânea específica (l/s.km <sup>2</sup> )	Subdomínio geológico
Calciolândia	Sete Lagoas (65.66%), Subgrupo-Paraopeba (31.10%), Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas (3.23%)	4.63	II A
Porto Indaiá/Barra do Funchal	Serra da Saudade (75.88%), Mata da Corda (10.58%), Areado (8.15%)	6.54	II B
Porto do Passarinho	Paraopeba (43.44%), Mata da Corda (26.24%), Areado (25.36%)	6.59	II B
Major Porto	Mata da Corda (41.19%), Paraopeba (36.85%), Areado (21.96%)	6.93	II B
Abaeté	Serra de Santa Helena (56.24%), Serra da Saudade (24.22%), Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas (18.20%)	7.23	III A
Veredas	Coberturas detrito-lateríticas (46.66%), Areado (45.02%), Mata da Corda (8.02%)	7.52	II B
Taquaral	Serra de Santa Helena (59.63%), Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas (31.58%), Serra da Saudade (8.78%)	7.91	III A
Fazenda São Félix	Paraopeba (49.34%), Areado (20.33%), Mata da Corda (14.52%)	9.56	II B
Ponte do Chumbo	Paraopeba (64.70%), Canastra Indiviso (21.94%), Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas (13.47%)	9.59	III A
Iguatama	Paraopeba (46.64%), Canastra Indiviso (33.06%), Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas (11,15%)	10.85	II A
Tapiraí Jusante	Canastra Indiviso (57.33%), Paraopeba (37.90%), Mata da Corda (3.84%)	12.34	II A
Fazenda da Barra	Canastra Indiviso (59.31%), Paraopeba (37.26%), Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas (3.26%)	13.82	II A
Fazenda Samburá	Canastra Indiviso (98.64%), Paraopeba (1.36%)	14.37	II A

Figura 3.3 - Dados do balanço hídrico e principais litologias nas estações localizadas dentro da UGA 1 – Rio São Francisco



As áreas com características mais desfavoráveis a recarga foram agrupadas na classe Zona de Recarga Desprezível (ZRD), que ocupam essencialmente as áreas onde afloram os litotipos da Formação serra da Saudade em drenagens secundárias ao longo do vale do rio Indaiá. As demais áreas representam Zonas de Recarga Reduzida (ZRR) ou Zonas de Recarga Moderada (ZRMo).

Os hidrogramas das 13 estações analisadas dentro da UGA 1 apresentaram vazões totais avaliadas entre 3,36 m<sup>3</sup>/s (Veredas) e 179,81 m<sup>3</sup>/s (Ponte do Chumbo), com valor médio do conjunto equivalente a 40,16 m<sup>3</sup>/s e mediana igual a 17,90 m<sup>3</sup>/s. Esses valores refletem um conjunto de atributos fisiográficos, dentre eles a área das bacias, a declividade e o substrato geológico diferenciado.

A vazão total específica calculada (considerando todo o fluxo superficial e subterrâneo) oscilou entre 11,99 l/s.km<sup>2</sup> (Calciolândia) e 30,97 l/s.km<sup>2</sup> (Fazenda da Barra), com média e mediana iguais a 19,76 l/s.km<sup>2</sup> e 17,90 l/s.km<sup>2</sup>, respectivamente para todo o conjunto.

Os valores de vazão do escoamento superficial mínimo e máximo calculados corresponderam a 1,70 m<sup>3</sup>/s (Veredas) e 84,20 m<sup>3</sup>/s (Ponte do Chumbo), sendo o valor médio do conjunto igual a 20,70 m<sup>3</sup>/s e mediana de 11,50 m<sup>3</sup>/s. A descarga subterrânea, por sua vez, alcançou o valor mínimo de 1,52 m<sup>3</sup>/s (Calciolândia) e máximo de 95,57 m<sup>3</sup>/s (Ponte do Chumbo), com média equivalente a 19,41 m<sup>3</sup>/s e mediana a 9,03 m<sup>3</sup>/s.

A partir dos valores de precipitação e escoamento (superficial e subterrâneo) foram calculados os valores de evapotranspiração. Tendo como base os valores de precipitação, o escoamento superficial foi estimado entre 15,9% (Tapiraí Jusante) e 45,2% (Fazenda São Félix), com valores de média e mediana correspondentes a 22,6% e 19,9%, respectivamente. Cinquenta e quatro por cento das estações apresentaram percentual de escoamento superficial entre 15% e 20% das chuvas, enquanto as demais registraram taxas mais elevadas, entre 22% e 45% dos valores de precipitação.

O escoamento subterrâneo obteve porcentagens entre 10,8% (Calciolândia) e 27,3% (Fazenda Samburá), com média equivalente a 18,9% e mediana igual a 16,2%.

Cinquenta e quatro por cento das bacias obtiveram percentual de escoamento subterrâneo entre 10% e 20%, com os demais alcançando taxas um pouco mais elevadas, entre 20% e 27%.

A evapotranspiração alcançou valores entre 32,4% (Fazenda São Félix) e 72,0% (Calciolândia), com valor médio de 58,5% e mediana de 61,4%. Apenas 15% das estações obtiveram percentuais inferiores a 41%, com os demais postos registrando valores entre 53% e 72% da precipitação.

Sobre o escoamento subterrâneo é importante ressaltar que para algumas estações é provável que o valor esteja subestimado. As estações Fazenda da Barra, Calciolândia e Porto do Passarinho têm grande parte de suas bacias classificadas como Zonas de Recarga Ótima ou Elevada, embora os valores de descarga subterrânea específica não se destaquem entre as demais estações. Esse resultado é compatível com áreas de recarga cárstica, onde a flutuação observada no hidrograma não reflete de fato o cômputo total do fluxo subterrâneo a montante, já que as feições cársticas propiciam um fluxo concentrado, que podem ter pontos de descarga desarticulados das calhas fluviais onde as estações de referência estão posicionadas.

A sub-bacia a montante da estação de Calciolândia tem como substrato predominante os calcários da Formação Sete Lagoas, sendo que, essa mesma litologia aflora em áreas das bacias Fazenda da Barra, Tapiraí Jusante, Veredas e Porto do Passarinho. Nessas áreas, estudos específicos devem ser aplicados para a determinação das parcelas do balanço hídrico no carste, especialmente para a estimativa dos valores da descarga subterrânea.

Quanto às zonas de descarga superficial, a maior parte das drenagens na UGA 1 correspondem a drenagens receptoras de fluxos locais. As exceções são os rios São Francisco, rio Samburá, rio Santo Antônio, rio Perdição, ribeirão São Mateus Grande, ribeirão Marmelada, rio Indaiá, rio Borrachudo, ribeirão dos Tiros, que são classificados como zonas de descarga intermediária.

### 3.2 UGA 2 – Rio Paraopeba

As cabeceiras que se conformam na porção extrema do centro sul da bacia do SF apresentam uma ampla distribuição de rochas cristalinas, metassedimentares e sedimentares cuja importância no cômputo dos volumes aportados para o interior do sistema cárstico da BSF integra os volumes escoados junto à margem direita de seu alto curso. Essa faixa central do alto curso do rio SF envolve basicamente as bacias dos rios Pará e Paraopeba, cujas cabeceiras situam-se em porções exteriores ao sistema cárstico-fissural do aquífero Bambuí drenando esse sistema somente no médio e baixo curso dos referidos rios.

As porções do baixo curso do rio Paraopeba integram-se à calha do rio SF já nas zonas de remanso do reservatório de Três Marias. Os domínios vinculados à calha central do SF remetem a uma condição muito dependente do comportamento hidrogeológico das bacias tributárias situadas a montante. Potencializam a ocorrência de zonas de descarga regionais, traduzindo caso a caso, as condições de trânsito que se vinculam a um determinado tipo majoritário de rocha em uma dada bacia.

Desse modo, as zonas receptoras vinculadas às cabeceiras centrais do rio SF refletem um condicionamento de volumes aportados preponderantemente a partir de sistemas aquíferos constituídos por rochas cristalinas. Embora os materiais que constituem esses sistemas não apresentem potencial hidrogeológico elevado, constituindo Zonas de Recarga Mediana ou Discreta, na maior parte dos casos, a estruturação geológica, a altimetria e a grande extensão permitem um aporte subterrâneo significativo.

A UGA 2 abarca uma área de aproximadamente 32.765 km<sup>2</sup>, onde estão duas bacias selecionadas para os estudos hidrológicos, a montante das estações de Martinho Campos (759,5 km<sup>2</sup>) e Ponte da Taquara (8.792,9 km<sup>2</sup> - Figuras 3.4 e 3.5, hidrogramas no Anexo II), no Subdomínio IIIA.

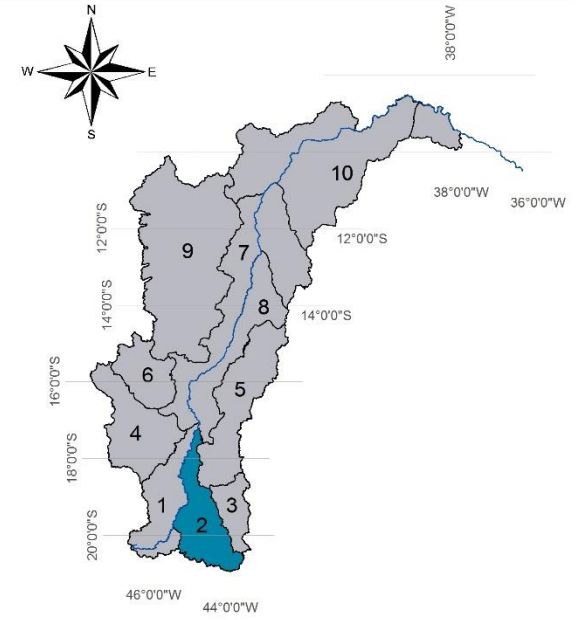
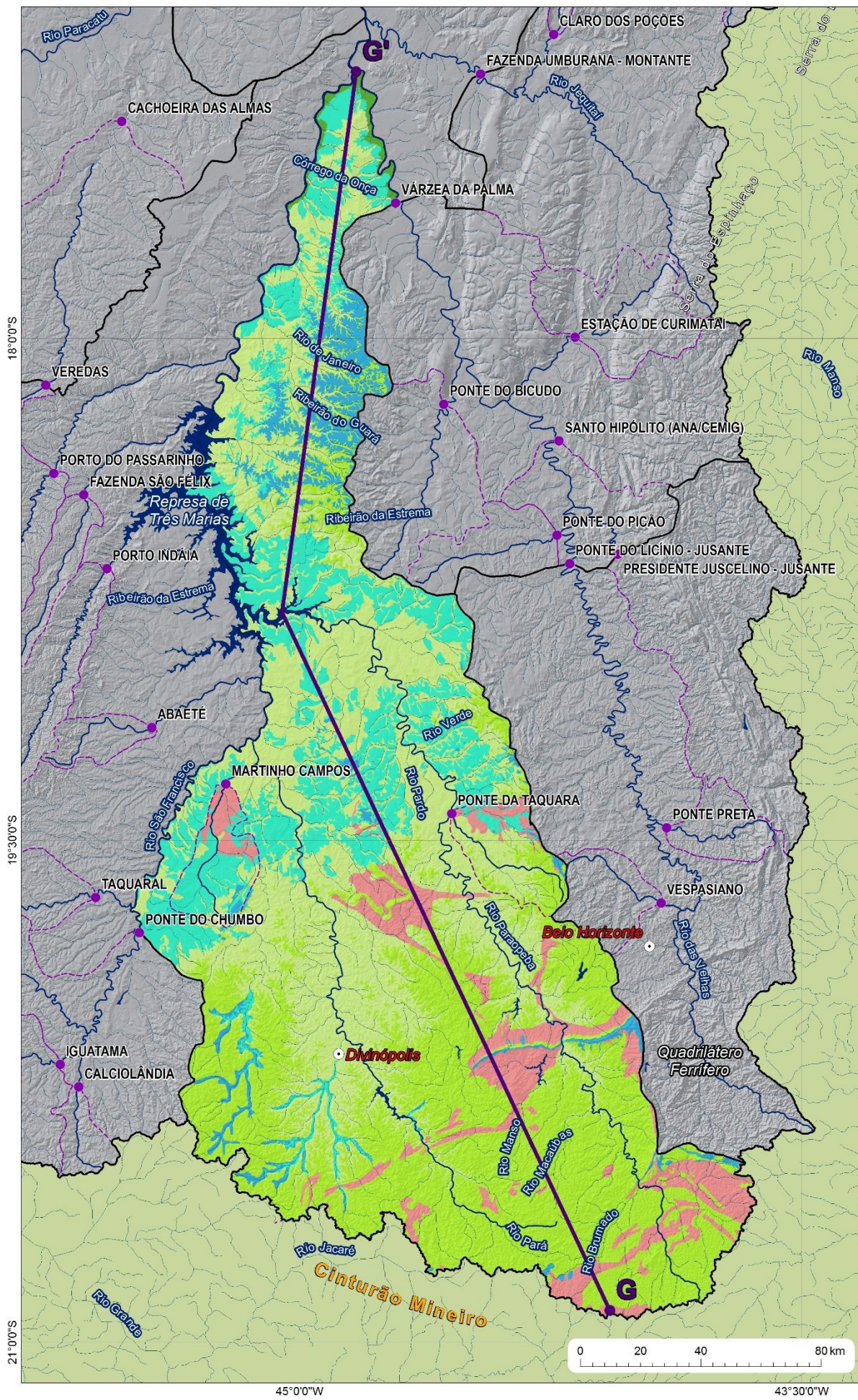
Assentada majoritariamente sobre as rochas do Complexo Belo Horizonte, a bacia da estação Ponte da Taquara é dotada de menor valor de pluviosidade média (1.238,8 mm), e apresenta um maior valor de descarga subterrânea específica média (7,26 L/s.km<sup>2</sup>) quando comparada a Martinho Campos (5,50 l/s.km<sup>2</sup>), onde predominam as

rochas da Formação serra de Santa Helena parcialmente exposta entre as coberturas detrito-lateríticas.

Os valores de vazão total obtidos por meio da análise dos hidrogramas é de 8,43 m<sup>3</sup>/s em Martinho Campos e 124,70 m<sup>3</sup>/s na estação Ponte da Taquara. A vazão total específica do escoamento alcançou valores mais próximos, entre 11,10 l/s.Km<sup>2</sup> (Martinho Campos) e 14,18 l/s.km<sup>2</sup> (Ponte da Taquara).

UGA Rio Paraopeba - Zonas de recarga e descarga

Mapas de localização



Legendas

- Sedes municipais
  - Estações fluviométricas
  - Linha seção
  - Zonas de descarga local
  - Zonas de descarga intermediária
  - Zonas de descarga regional
  - Limite UGA
  - Limite sub-bacias
- Zonas de recarga**
- ZFD - ZONAS DE FLUXO DESPREZÍVEL
  - ZRR - ZONAS DE RECARGA RESTRITA
  - ZRD - ZONAS DE RECARGA DISCRETA
  - ZRM<sub>e</sub> - ZONAS DE RECARGA MEDIANA
  - ZRM<sub>o</sub> - ZONAS DE RECARGA MODERADA
  - ZRE - ZONAS DE RECARGA ELEVADA
  - ZRO - ZONAS DE RECARGA OTIMA

Perfil topográfico esquemático representativo UGA Rio Paraopeba

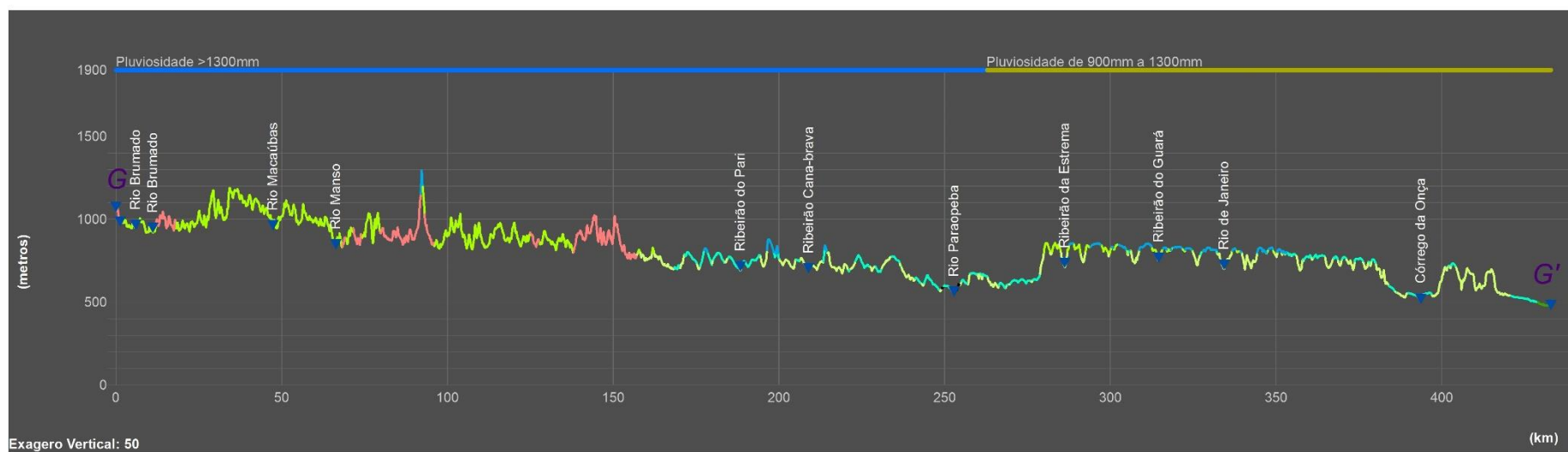
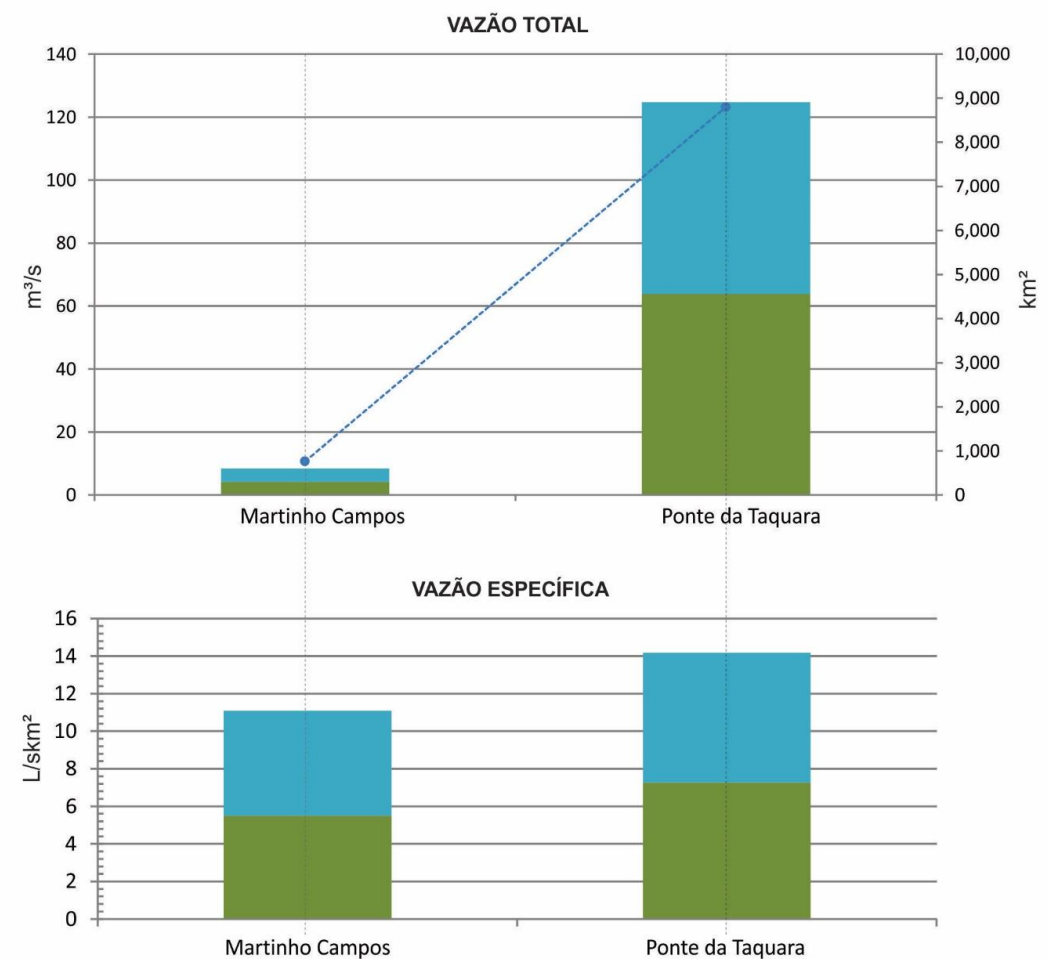
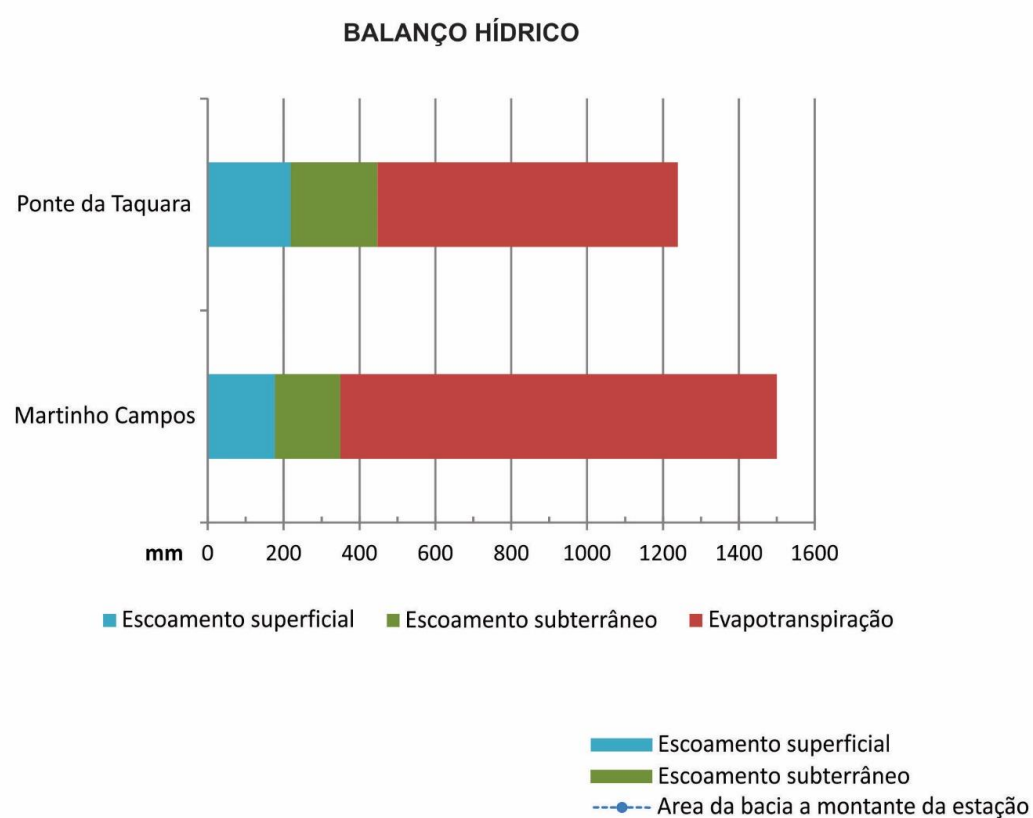


Figura 3.4 - UGA 2 – Paraopeba

UGA 2 - Rio Paraoepeba		Area da bacia a montante da estação	Precipitação média anual	Escoamento total na estação		Escoamento superficial				Escoamento subterrâneo				Evapotranspiração	
				vazão	vazão específica	vazão	vazão específica	valor ponderado pela precipitação	vazão	vazão específica	valor ponderado pela precipitação	valor ponderado pela precipitação	valor ponderado pela precipitação		
Estação Fluviométrica	Curso d'água	km <sup>2</sup>	mm	m <sup>3</sup> /s	l/s.km <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s	l/s.km <sup>2</sup>	%	mm	m <sup>3</sup> /s	l/s.km <sup>2</sup>	%	mm	%	mm
Martinho Campos	Rio Picão	759.5	1500.0	8.43	11.10	4.25	5.60	11.8	176.5	4.18	5.50	11.6	173.4	76.7	1150.1
Ponte da Taquara	Rio Paraoepeba	8,792.9	1238.8	124.70	14.18	60.87	6.92	17.6	218.3	63.84	7.26	18.5	229.0	63.9	791.6
média		4,776.2	1369.4	66.57	12.64	32.56	6.26	14.70	197.40	34.01	6.38	15.05	201.20	70.3	970.9
máximo		8,792.9	1500.0	124.70	14.18	60.87	6.92	17.60	218.30	63.84	7.26	18.50	229.00	76.7	1150.1
mínimo		759.5	1238.8	8.43	11.10	4.25	5.60	11.80	176.50	4.18	5.50	11.60	173.40	63.9	791.6
mediana		4,776.2	1369.4	66.57	12.64	32.56	6.26	14.70	197.40	34.01	6.38	15.05	201.20	70.3	970.9



Estação	Litologias principais na bacia a montante da estação	vazão subterrânea específica mínima (L/s.km <sup>2</sup> )	Subdomínio geológico
Martinho Campos	Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas (55.43%), Serra de Santa Helena (24.62%), Divinópolis (9.08%)	5.50	III A
Ponte da Taquara	Belo Horizonte (71.76%), Serra de Santa Helena (16.84%), Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas (5.01%)	7.26	III A

Figura 3.5 - Dados do balanço hídrico e principais litologias nas estações localizadas dentro da UGA 2 – Paraopeba

A vazão média do escoamento superficial foi calculada em 4,25 m<sup>3</sup>/s para Martinho Campo e 60,87 m<sup>3</sup>/s para Ponte da Taquara, enquanto a vazão do escoamento subterrâneo média foi de 4,18 m<sup>3</sup>/s e 63,84 m<sup>3</sup>/s, respectivamente. Tais valores revelam um comportamento similar das duas estações, com valores de escoamentos superficiais bem próximos dos valores de escoamentos subterrâneos.

Em relação ao balanço hídrico, o escoamento superficial representa 11,8% da precipitação em Martinho Campos e 17,6% em Ponte da Taquara. Já o escoamento subterrâneo alcançou porcentagens de 11,6% (Martinho Campos) e 18,5% (Ponte da Taquara) da chuva. A evapotranspiração, por sua vez, obteve a parcela mais significativa, respondendo por 76,7% da chuva em Martinho Campos e 63,9% em Ponte da Taquara.

Em termos do potencial de recarga, as Zonas de Recarga Ótima na UGA 2 ocorrem de forma fragmentada, e correspondem às rochas metassedimentares paleoproterozoicas da serra do Curral e das serranias nos municípios de Ouro Preto e Congonhas, coberturas aluvionares em cotas elevadas (cabeceira dos rios Lambari e Itapecirica), morros residuais onde afloram os calcários da Formação Lagoa do Jacaré e coberturas detrito-lateríticas ferruginosas em cotas elevadas.

Uma área grande a norte da UGA 2 foi classificada como Zona de Recarga Elevada, formada pelas coberturas detrito-lateríticas ferruginosas. As demais áreas foram classificadas como Zonas de Recarga Moderada (ZRMo – no extremo norte da UGA 2) como Recarga Mediana (ZRMe), como Recarga Discreta (ZRD) e como Recarga Desprezível (ZRD). As ZRD na UGA 2 marcam as zonas onde foram mapeados a ocorrência de xistos (especialmente do Grupo Nova Lima e do Grupo Sabará), rochas metabásicas e metaultramáficas arqueanas e as rochas argilosas da Formação serra de Santa Helena.

Conforme mostra ao mapa da Figura 3.4, as calhas principais dos rios Pará e Paraoapeba são classificadas como zonas de descarga intermediária, sendo os seus afluentes drenagens que manifestam fluxos locais.

### 3.3 UGA 3 – Rio das Velhas

Esse domínio do alto curso do rio SF envolve algumas bacias que têm suas cabeceiras em porções exteriores ao sistema cárstico-fissural do aquífero Bambuí, mas que a jusante, tem importantes áreas desenvolvidas sobre esse aquífero (próximo às cidades de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Lagoa Santa, Vespasiano e Matozinhos. A UGA 3 (Figuras 3.6 e 3.7) abrange 14.563,82 km<sup>2</sup> e compreende 4 bacias selecionadas, sendo três delas situadas no Subdomínio IVA (Ponte do Licínio - Jusante, Ponte Preta e Vespasiano) e uma no Subdomínio IVB (Presidente Juscelino - Jusante).

As bacias de Ponte Preta, Ponte do Licínio-Jusante, Vespasiano e Presidente Juscelino - Jusante, apesar de conterem grandes áreas em regiões constituídas por rochas cristalinas e quartzíticas, são avaliadas de forma a integrar os cálculos das descargas que adentram os sistemas conformados pelo sistema aquífero Bambuí, no interior da BSF (Figuras 3.6 e 3.7).

De modo similar ao compartimento vizinho, a oeste, apresenta valores relativamente elevados de descarga subterrânea específica média (5,76 L/s.km<sup>2</sup>), considerando-se que os materiais constituintes não apresentam potencial hidrogeológico elevado - o alto curso do rio Paraopeba exhibe granitos e gnaisses do complexo Bonfim. De modo distinto, ocorre ao longo do alto curso do rio das Velhas, no extremo sudeste da bacia, a presença das rochas do Quadrilátero Ferrífero, as quais comportam, além das formações ferríferas, coberturas concrecionárias e uma forte estruturação geotectônica que favorece o fluxo por meio de fraturas e falhas.

Na área delimitada pela bacia vinculada à estação fluviométrica Ponte do Licínio Jusante (rio das Velhas) verifica-se que nas áreas das cabeceiras das drenagens estão presentes os materiais geológicos de maior potencial hídrico, enquanto que, em toda a porção de seu médio e baixo curso, distribuem-se os metassiltitos da Formação serra de Santa Helena (47%), compondo Zonas de Recarga Discreta (ZRD) ou Zonas de Recarga Mediana (ZRMe).

A UGA 3 localiza-se em uma área cujos valores médios de pluviosidade variam entre 1.200 mm e 1.350 mm. A bacia de Ponte do Licínio – Jusante está na porção mais chuvosa (áreas topograficamente elevadas próximas ao Quadrilátero Ferrífero e nas



proximidades de Cordisburgo) e apresenta o maior valor de descarga subterrânea específica média (6,50 L/s.km<sup>2</sup>). Em contrapartida, Presidente Juscelino - Jusante e Ponte Preta registraram as menores médias pluviométricas (1.200 mm), com esta última obtendo o menor valor de descarga subterrânea específica (4,89 l/s.km<sup>2</sup>) da UGA 3.

As vazões totais calculadas por meio da análise dos hidrogramas (Anexo III) variaram bastante, de 6,77 m<sup>3</sup>/s (Ponte Preta) a 135,90 m<sup>3</sup>/s (Ponte do Licínio – Jusante), com média de 56,91 m<sup>3</sup>/s e mediana igual a 42,48 m<sup>3</sup>/s. A vazão total específica obtida está entre 11,22 l/s.km<sup>2</sup> (Vespasiano) e 19,24 l/s.km<sup>2</sup> (Presidente Juscelino – Jusante), com média de 13,77 l/s.km<sup>2</sup> e mediana igual a 12,31 l/s.km<sup>2</sup>.

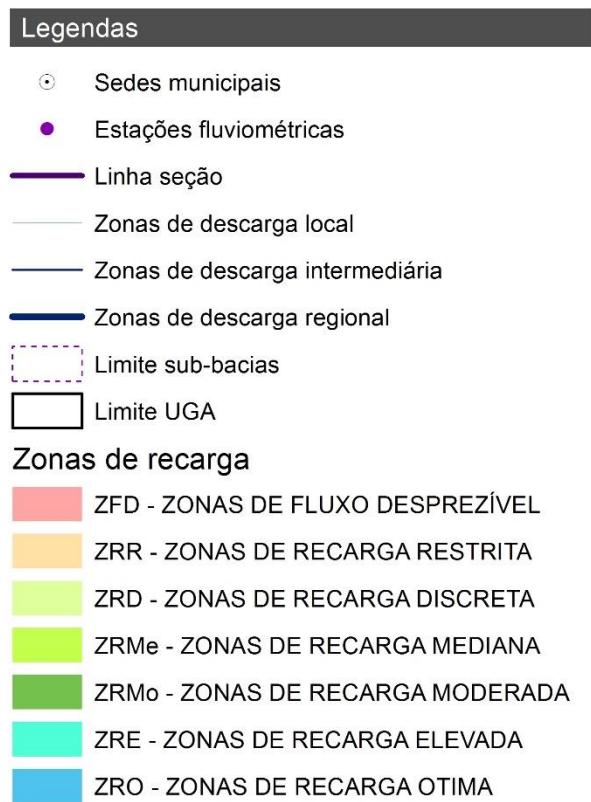
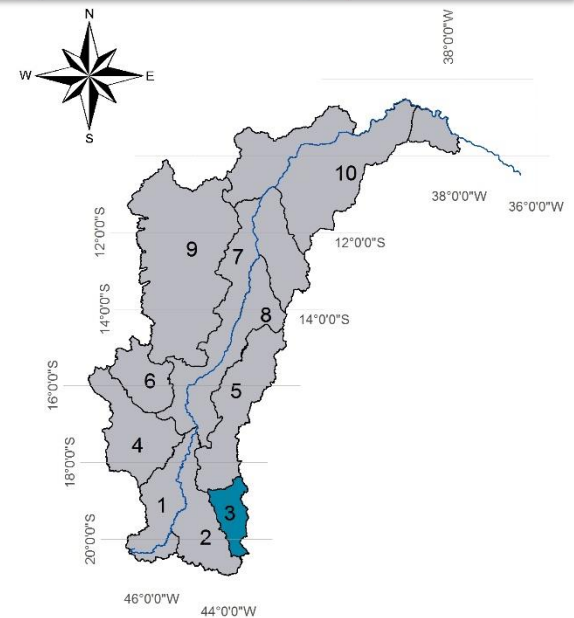
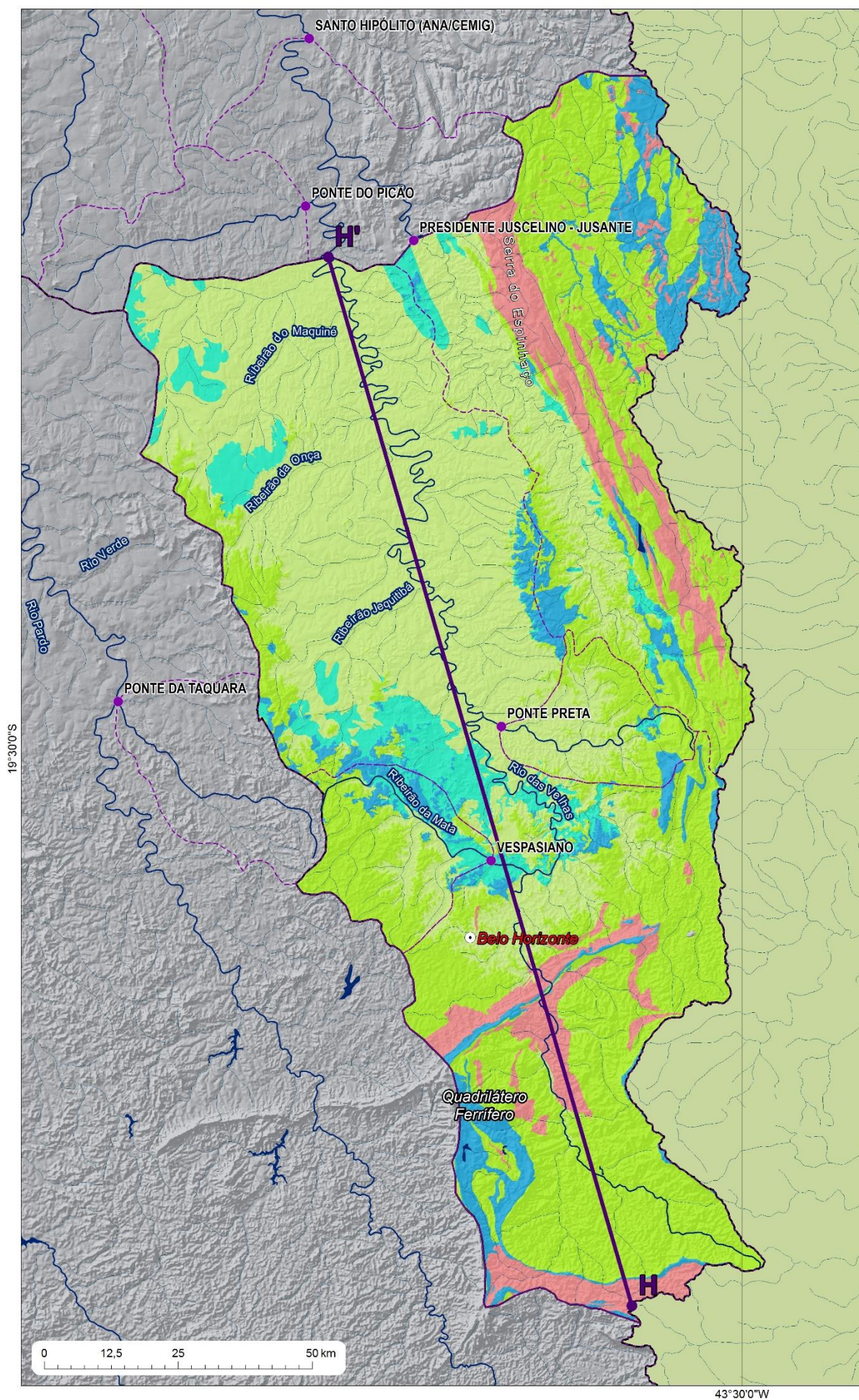
Em relação ao escoamento superficial, o valor mínimo correspondeu a 3,95 m<sup>3</sup>/s (Ponte Preta) e o maior a 52,04 m<sup>3</sup>/s (Presidente Juscelino – Jusante), com média de 31,86 m<sup>3</sup>/s e mediana de 28,11 m<sup>3</sup>/s. O escoamento subterrâneo, por sua vez, teve o seu menor valor igual a 2,82 m<sup>3</sup>/s (Ponte Preta) e o maior equivalente a 68,65 m<sup>3</sup>/s (Ponte do Licínio – Jusante), com média de 25,05 m<sup>3</sup>/s e mediana igual a 14,37m<sup>3</sup>/s.

Utilizando os valores de precipitação como referência, o escoamento superficial calculado variou de 14,9% (Ponte do Licínio – Jusante) a 34,2% (Presidente Juscelino – Jusante), com valores de média e mediana correspondentes a 20,5% e 16,5%, respectivamente. Setenta e cinco por cento das estações tem valores de escoamento superficial inferiores a 20% da chuva. O escoamento subterrâneo revelou porcentagens entre 12,9% (Ponte Preta) e 16,3% (Presidente Juscelino – Jusante), com média e mediana iguais a 14,6%. Todas as estações apresentaram porcentagens próximas no que se refere ao escoamento subterrâneo calculado.

A evapotranspiração foi calculada entre 49,4% (Presidente Juscelino – Jusante) a 71,0% (Vespasiano), com média de 64,9% e mediana igual a 69,6%. Apenas uma estação (Presidente Juscelino – Jusante) registrou valor inferior a 50% para a evapotranspiração.

As estações da UGA 3, de modo geral, apresentaram maior porcentagem de participação do escoamento superficial em relação ao escoamento total, sendo a estação Ponte do Licínio – Jusante (que representa a maior parte da UGA 3) a única a

ter um comportamento diferente. Em relação ao balanço hídrico, a bacia a montante da estação Presidente Juscelino – Jusante mostrou equilíbrio no que diz respeito às taxas de escoamentos (superficial e subterrâneo) e evapotranspiração.



Perfil topográfico esquemático representativo UGA Rio das Velhas

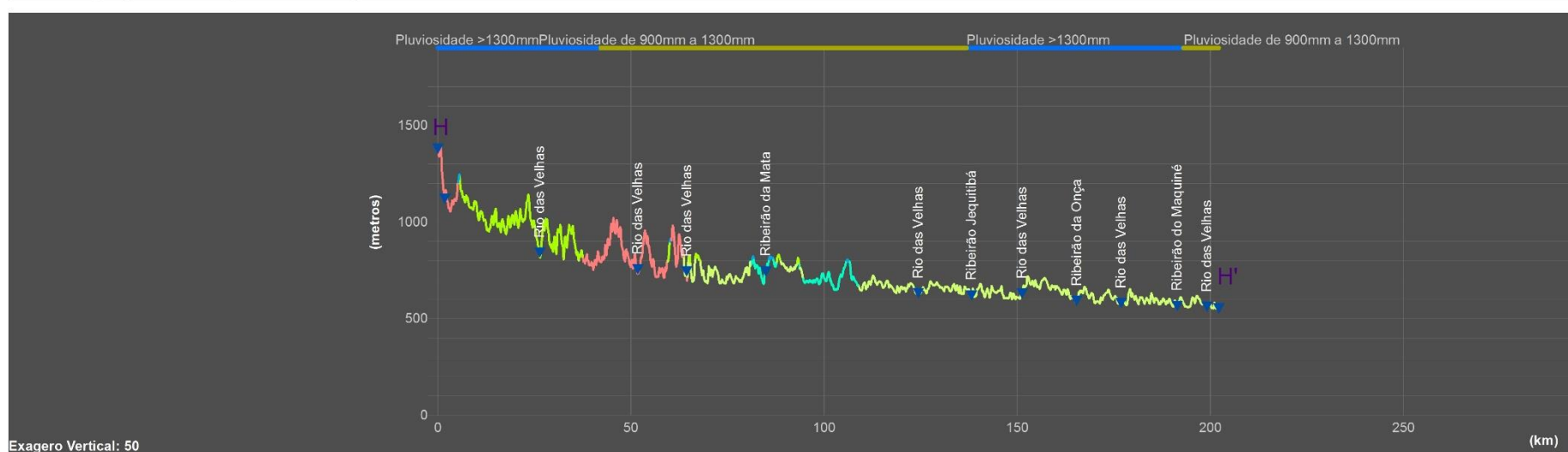


Figura 3.6 - UGA 3 – Rio das Velhas

UGA 3 - Rio das Velhas		Área da bacia a montante da estação	Precipitação média anual	Escoamento total na estação		Escoamento superficial				Escoamento subterrâneo				Evapotranspiração	
Estação Fluviométrica	Curso d'água			vazão	vazão específica	vazão	vazão específica	valor ponderado pela precipitação	vazão	vazão específica	valor ponderado pela precipitação	valor ponderado pela precipitação	%	mm	
		km <sup>2</sup>	mm	m <sup>3</sup> /s	l/s.km <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s	l/s.km <sup>2</sup>	%	mm	m <sup>3</sup> /s	l/s.km <sup>2</sup>	%	mm	%	mm
Vespasiano	Ribeirão da Mata	723.1	1221.9	8.11	11.22	4.18	5.78	14.9	182.2	3.94	5.44	14.0	171.6	71.0	868.0
Ponte do Licínio - Jusante	Rio das Velhas	10,569.2	1350.0	135.90	12.86	67.25	6.36	14.9	200.7	68.65	6.50	15.2	204.8	70.0	944.5
Presidente Juscelino - Jusante	Rio Parauninha	3,994.5	1200.0	76.84	19.24	52.04	13.03	34.2	410.8	24.80	6.21	16.3	195.8	49.4	593.4
Ponte Preta	Rio Jabuticabas	576.0	1200.0	6.77	11.76	3.95	6.86	18.0	216.5	2.82	4.89	12.9	154.3	69.1	829.2
média		3,965.7	1243.0	56.91	13.77	31.86	8.01	20.5	252.6	25.05	5.76	14.6	181.6	64.9	808.8
máximo		10,569.2	1350.0	135.90	19.24	67.25	13.03	34.2	410.8	68.65	6.50	16.3	204.8	71.0	944.5
mínimo		576.0	1200.0	6.77	11.22	3.95	5.78	14.9	182.2	2.82	4.89	12.9	154.3	49.4	593.4
mediana		2,358.8	1211.0	42.48	12.31	28.11	6.61	16.5	208.6	14.37	5.83	14.6	183.7	69.6	848.6

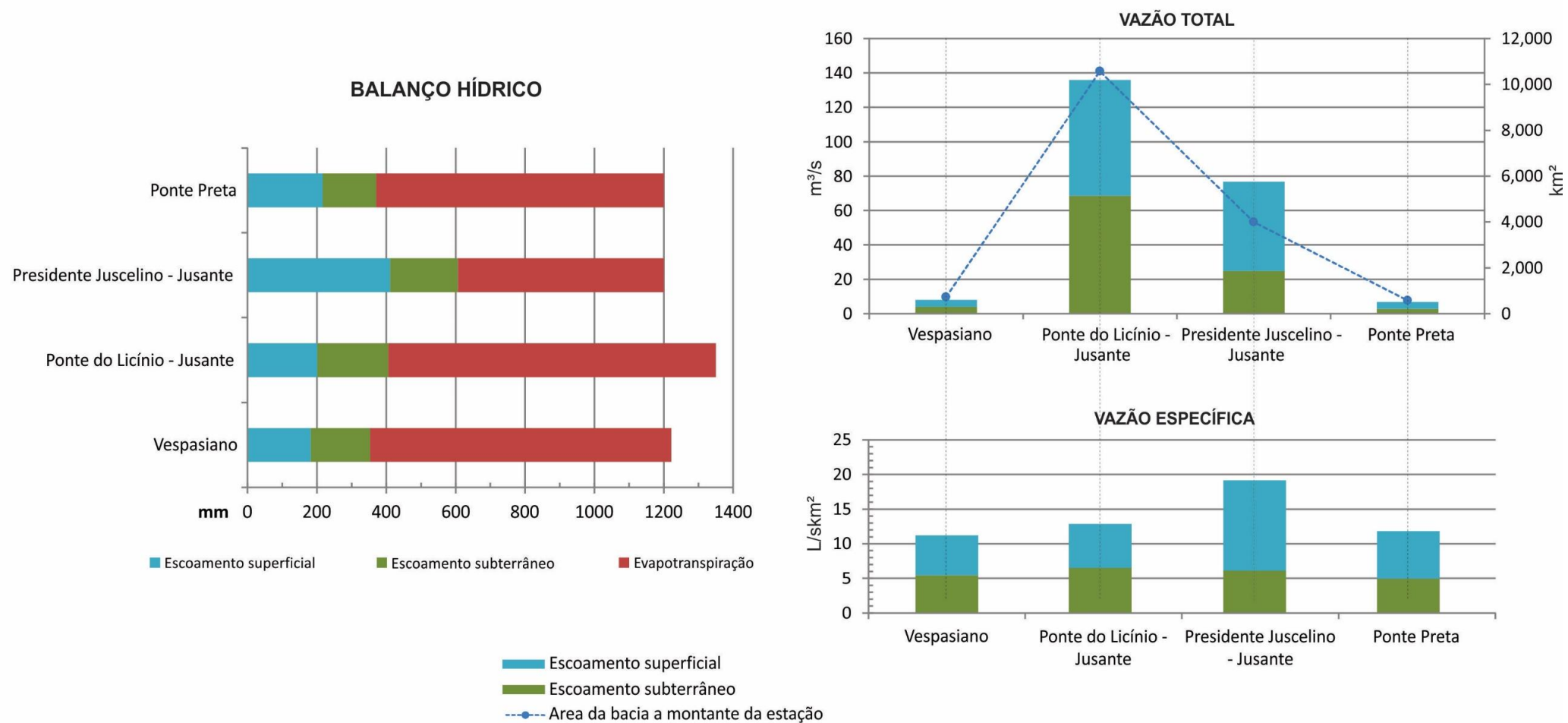


Figura 3.7 - Dados do balanço hídrico e principais litologias nas estações localizadas dentro da UGA 3 – Rio das Velhas

### 3.4 UGA 4 – Rio Paracatu

A UGA 4 – Paracatu, a sudoeste da BSF, abrange grande parte das cabeceiras de drenagem da bacia do rio Paracatu, que atravessam o Domínio I - Vazante e parte do Domínio IIC - Grupo Bambuí deformado W. Tal área é caracterizada do ponto de vista hidrográfico por divisores estabelecidos em cotas altimétricas que oscilam entre os 700 mNM e os 950 mNM, refletindo a separação hidrográfica entre as bacias dos rios Paracatu e Paranaíba.

Conforme apresentado na Figura 4.8, a UGA Paracatu tem vasta ocorrência de zonas de recarga elevada e recarga ótima (ZRO e ZRE). Essas ocorrências associam-se as extensas áreas de coberturas detrito-lateríticas ferruginosas, áreas onde afloram carbonatos do Grupo Vazante e rochas sedimentares do Grupo Areado. A UGA 4 está sob regime de chuvas anuais médias entre 1.100 mm e 1.400 mm, o que faz com que tais área de elevada porosidade apresentem potencial para recargas efetivas, especialmente aquelas posicionadas nas cotas mais altas. Destaca-se no mapa, no extremo oeste, a presença de Zonas de Recarga Desprezível, relacionadas aos filitos e xistos da Formação Paracatu.

A UGA 4 é composta por 11 bacias, abrangendo uma área de 40.939,75 km<sup>2</sup>. As bacias desta região apresentam áreas que variam de 581 km<sup>2</sup> a 41.158,70 km<sup>2</sup>, sendo Fazenda Poções e Porto Alegre aquelas que possuem menor e maior área, respectivamente (Figuras 3.8 e 3.9).

Os valores de descarga subterrânea específica apresentam-se em torno de 6,0 L/s.km<sup>2</sup> (Figura 4.9). As estações que podem ser agrupadas perante esses índices de descarga específica média são: Barra do Escurinho (6.51 L/s.km<sup>2</sup>), Fazenda Poções (6.49 L/s.km<sup>2</sup>), Fazenda Barra da Égua (5.05 L/s.km<sup>2</sup>), Ponte da BR-040 Paracatu (6.07 L/s.km<sup>2</sup>), Porto da Extrema (5.41 L/s.km<sup>2</sup>), Porto dos Poções (6.06 L/s.km<sup>2</sup>), Santa Rosa (6.24 L/s.km<sup>2</sup>), Cachoeira das Almas e (5.02 L/s.km<sup>2</sup>), Porto Alegre (5.05 L/s.km<sup>2</sup>); Ponte da BR-040 Prata (5.32 L/s.km<sup>2</sup>) e Fazenda Córrego do Ouro (8.24 L/s.km<sup>2</sup>)

A bacia conformada pelo rio Escuro junto a estação Fazenda Córrego do Ouro mostra valor acima da média (8.24 L/s.km<sup>2</sup>), sendo considerada uma anomalia positiva em

termos de aporte de descargas de base, com um deflúvio subterrâneo médio superior às demais bacias, em torno de 37,5%. Observa-se a presença de materiais de baixo potencial hidrogeológico (ZRD), tais como os filitos carbonosos da Unidade Paracatu. Porém, também ocorrem dentro da bacia os carbonatos carstificados do Grupo Vazante.

Nesse caso, interpretam-se, a princípio, condições semelhantes aquelas descritas no extremo sudoeste da UGA 1 - São Francisco, onde as estruturas geológicas decorrentes da interação da borda do cráton com a faixa de dobramento Brasília podem ter importante papel no incremento da permeabilidade e do aporte de água, permitindo a ocorrência de zonas de recarga efetiva localizadas e interconexão de unidades hidrogeológicas fora da bacia, ainda que as rochas que compõem os maciços tenham porosidade efetiva para fluxo reduzida. Entretanto, tais considerações devem ser avaliadas em estudos de maior detalhe.

Ressalta-se ainda, que toda a bacia associada a estação Fazenda Córrego do Ouro se encontra sob um regime de chuvas mais elevado, estando localizada dentro do Domínio Isoietal I (Capítulo 3, item 3.1.1), cuja média de chuvas anuais é maior que 1.300 mm.

A Fazenda Córrego do Ouro, dentre todo o conjunto das 11 bacias estudadas dentro da UGA 4 – Paracatu tem o maior valor de pluviosidade (1.393,1 mm). O menor valor de pluviosidade está associado à bacia da estação Porto da Extrema, com 1.125,4 mm/ano.

A partir dos hidrogramas das estações selecionadas na UGA 4 (Anexo IV) foram calculadas vazões totais entre 8,57 m<sup>3</sup>/s (Fazenda Poções) e 476,26 m<sup>3</sup>/s (Porto Alegre), com média de 126,03 m<sup>3</sup>/s e mediana de 52,20 m<sup>3</sup>/s para as 11 bacias. A vazão total específica variou de 11,18 l/s.km<sup>2</sup> (Fazenda Barra da Égua) a 15,42 l/s.km<sup>2</sup> (Fazenda Córrego do Ouro), e o valor médio calculado foi de 12,98 l/s.km<sup>2</sup> e mediana igual a 12,84 l/s.km<sup>2</sup>.

A vazão média de escoamento superficial variou de 4,80 m<sup>3</sup>/s (Fazenda Poções) a 249,84 m<sup>3</sup>/s (Porto Alegre), com média do conjunto igual a 66,68 m<sup>3</sup>/s e mediana de 33,51 m<sup>3</sup>/s. O menor valor de escoamento subterrâneo equivale a 3,77 m<sup>3</sup>/s (Fazenda

Poções) e o maior a 226,42 m<sup>3</sup>/s (Porto Alegre), sendo a média do conjunto para esse parâmetro de 59,34 m<sup>3</sup>/s e mediana igual a 21,17 m<sup>3</sup>/s.

Tendo como base os valores da chuva, a porcentagem do escoamento superficial estimado variou de 14,5% (Fazenda Barra da Égua) a 26,7% (Ponte da BR-040 Prata), com média de 17,2% e mediana igual 16,4%. Apenas a estação Ponte da BR-040 Prata registrou porcentagem superior a 20%, com os demais postos alcançando taxas mais baixas em relação à precipitação, entre 14,5% e 18,8%.

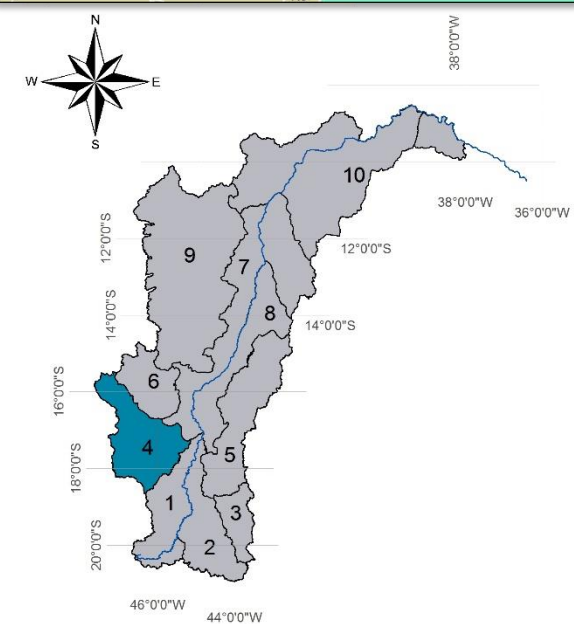
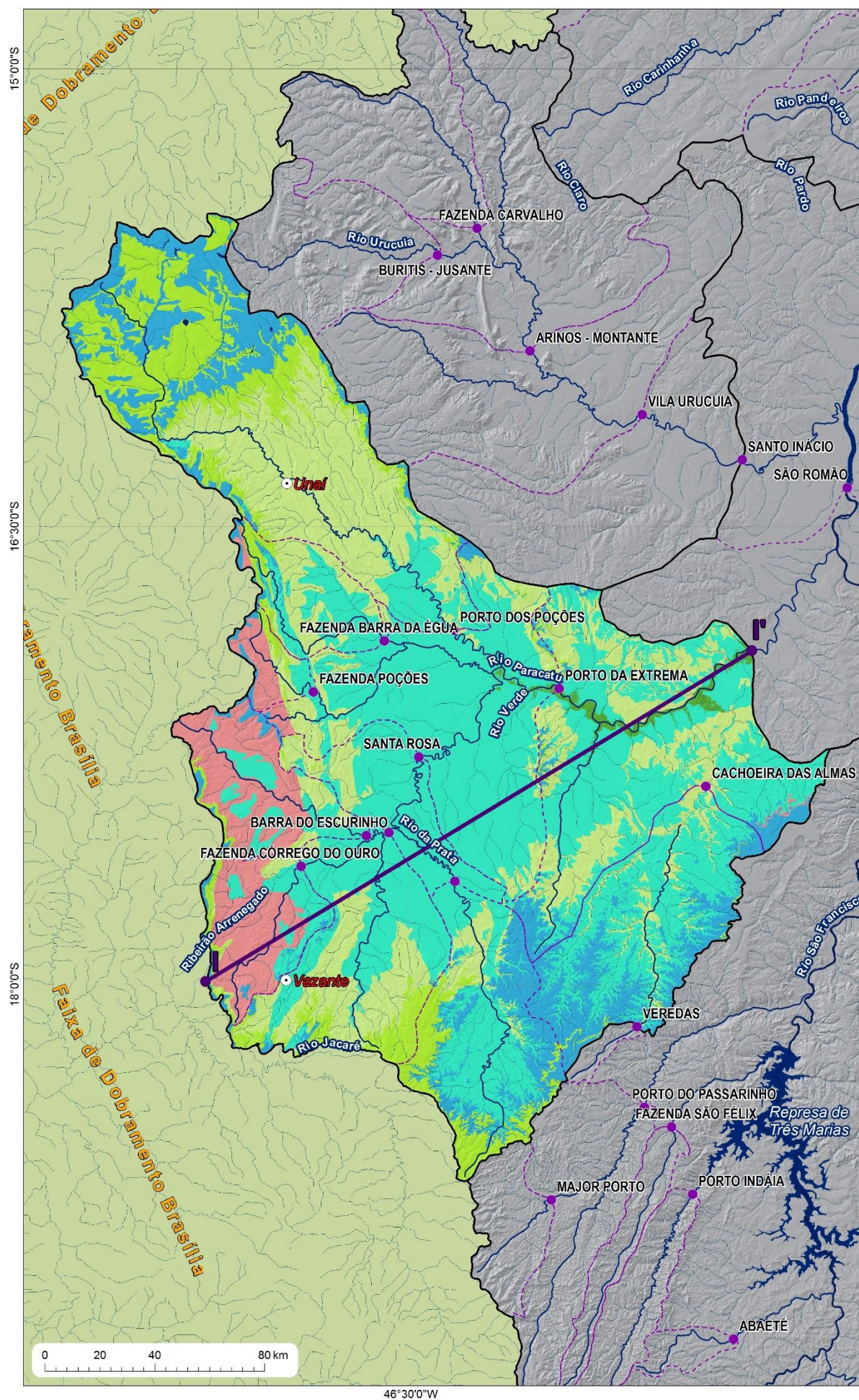
O escoamento subterrâneo obteve porcentagens entre 12,0% (Fazenda Barra da Égua) e 18,7% (Fazenda Córrego do Ouro), com média de 14,7% e mediana de 14,8. Mais de 80% das estações apresentaram taxas de escoamento subterrâneo entre 14% e 15,5%.

A parcela de evapotranspiração variou entre 58,5% (Ponte da BR-040 Prata) e 73,5% (Fazenda Barra da Égua) da precipitação, com média equivalente a 68,1% e mediana igual a 68,6%. Apenas Ponte da BR-040 Prata obteve um valor abaixo de 60% de evapotranspiração.

De modo geral, nas estações da UGA 4 os valores percentuais de escoamento superficial foram superiores aos de escoamento subterrâneo.

UGA Rio Paracatu - Zonas de recarga e descarga

Mapas de localização



Legendas

- Sedes municipais
  - Estações fluviométricas
  - Linha seção
  - Zonas de descarga local
  - Zonas de descarga intermediária
  - Zonas de descarga regional
  - Limite UGA
  - Limite sub-bacias
- Zonas de recarga**
- ZFD - ZONAS DE FLUXO DESPREZÍVEL
  - ZRR - ZONAS DE RECARGA RESTRITA
  - ZRD - ZONAS DE RECARGA DISCRETA
  - ZRMe - ZONAS DE RECARGA MEDIANA
  - ZRMo - ZONAS DE RECARGA MODERADA
  - ZRE - ZONAS DE RECARGA ELEVADA
  - ZRO - ZONAS DE RECARGA OTIMA

Perfil topográfico esquemático representativo UGA Paracatu

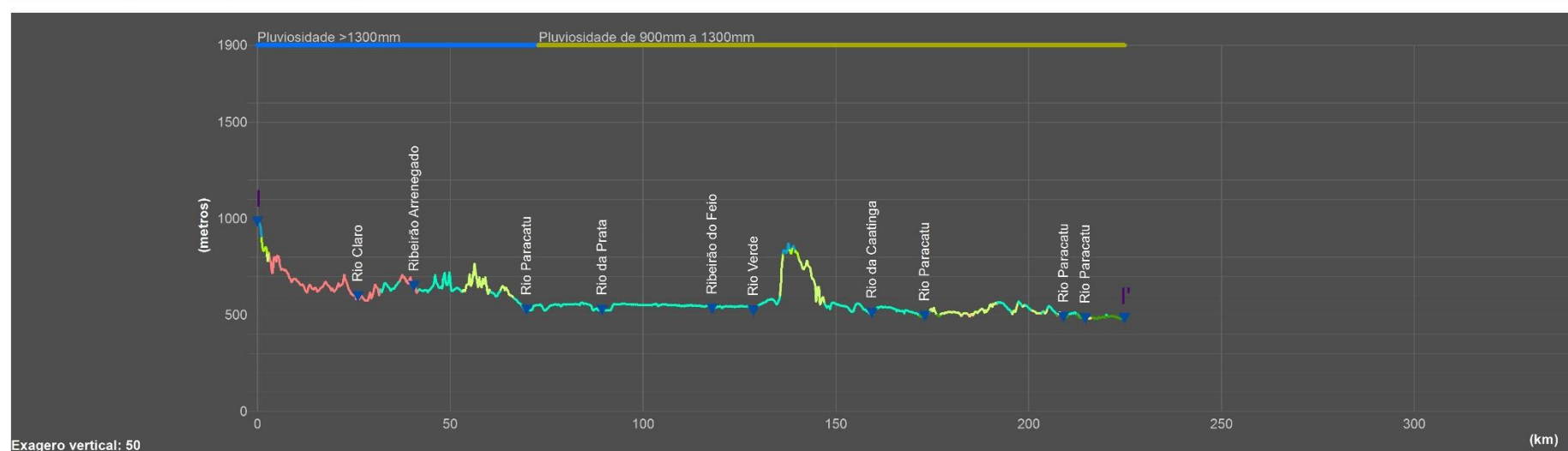
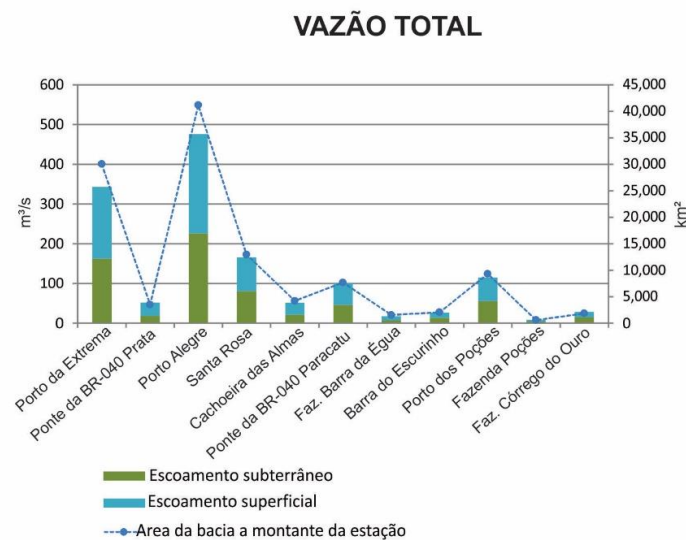
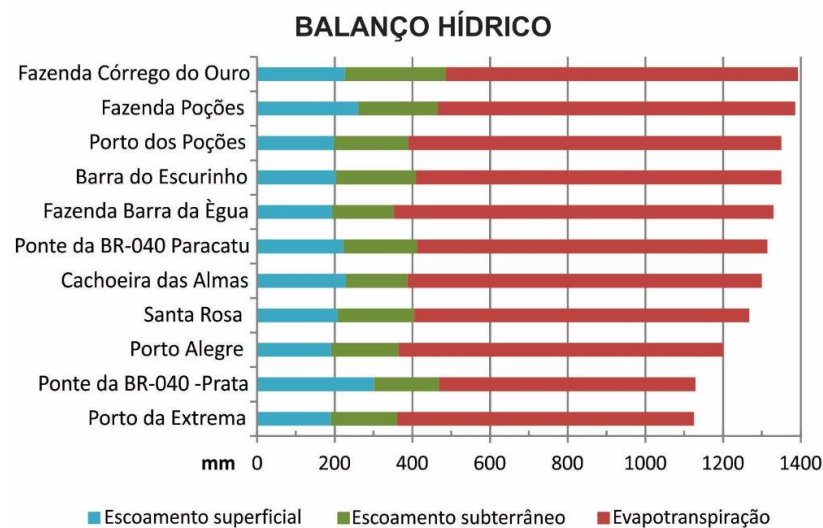


Figura 3.8 - UGA 4 – Rio Paracatu



UGA 4 - Rio Paracatu		Area da bacia a montante da estação	Precipitação média anual	Escoamento total na estação		Escoamento superficial				Escoamento subterrâneo				Evapotranspiração	
Estação Fluviométrica	Curso d'água			vazão	vazão específica	vazão	vazão específica	valor ponderado pela precipitação		vazão	vazão específica	valor ponderado pela precipitação		valor ponderado pela precipitação	
		km <sup>2</sup>	mm	m <sup>3</sup> /s	l/s.km <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s	l/s.km <sup>2</sup>	%	mm	m <sup>3</sup> /s	l/s.km <sup>2</sup>	%	mm	%	mm
Porto da Extrema	Rio Paracatu	30,043.3	1125.4	343.60	11.44	180.82	6.02	16.9	189.8	162.77	5.42	15.2	170.9	68.0	764.7
Ponte da BR-040 -Prata	Rio da Prata	3,509.3	1129.6	52.20	14.87	33.51	9.55	26.7	301.1	18.69	5.32	14.9	167.9	58.5	660.5
Porto Alegre	Rio Paracatu	41,158.7	1200.0	476.26	11.57	249.84	6.07	16.0	191.4	226.42	5.50	14.5	173.5	69.6	835.1
Santa Rosa	Rio Paracatu	12,951.9	1267.6	166.27	12.84	85.40	6.59	16.4	207.9	80.86	6.24	15.5	196.9	68.1	862.7
Cachoeira das Almas	Rio do Sono	4,211.8	1300.0	51.72	12.28	30.56	7.26	17.6	228.8	21.17	5.03	12.2	158.5	70.2	912.7
Ponte da BR-040 Paracatu	Rio Paracatu	7,672.4	1314.4	100.33	13.08	54.16	7.06	16.9	222.6	46.17	6.02	14.4	189.8	68.6	902.1
Fazenda Barra da Égua	Ribeirão Barra da Égua	1,545.5	1330.0	17.28	11.18	9.47	6.13	14.5	193.3	7.81	5.05	12.0	159.3	73.5	977.4
Barra do Escurinho	Ribeirão do Escurinho	2,060.2	1350.0	26.75	12.98	13.25	6.43	15.0	202.9	13.50	6.55	15.3	206.6	69.7	940.5
Porto dos Poções	Rio Preto	9,289.1	1350.0	114.80	12.36	58.45	6.29	14.7	198.4	56.34	6.07	14.2	191.3	71.1	960.3
Fazenda Poções	Rio São Peddro	581.0	1386.0	8.57	14.75	4.80	8.26	18.8	260.6	3.77	6.49	14.8	204.6	66.4	920.8
Fazenda Córrego do Ouro	Rio Escuro	1,849.4	1393.1	28.52	15.42	13.27	7.18	16.2	226.3	15.25	8.24	18.7	260.0	65.1	906.9
média		10,443.0	1286.0	126.03	12.98	66.68	6.98	17.2	220.3	59.34	5.99	14.7	189.0	68.1	876.7
máximo		41,158.7	1393.1	476.26	15.42	249.84	9.55	26.7	301.1	226.42	8.24	18.7	260.0	73.5	977.4
mínimo		581.0	1125.4	8.57	11.18	4.80	6.02	14.5	189.8	3.77	5.03	12.0	158.5	58.5	660.5
mediana		4,211.8	1314.4	52.20	12.84	33.51	6.59	16.4	207.9	21.17	6.02	14.8	189.8	68.6	906.9



Estação	Litologias principais na bacia a montante da estação	vazão subterrânea específica mínima (l/s.km <sup>2</sup> )	Subdomínio geológico
Cachoeira das Almas	Areado (70.79%), Três Marias (10.85%), Coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas (7.77%)	5.03	III B
Fazenda Barra da Égua	Vazante Unidade A (35.78%), Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas (31.11%), Vazante Unidade B (17.11%)	5.05	II C
Ponte da BR-040 Prata	Areado (53.43%), Mata da Corda (21.48%), Três Marias (9.23%)	5.32	II C
Porto da Extrema	Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas (28.02%), Paraopeba (21.04%), Paracatu (9.97%)	5.42	II C
Porto Alegre	Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas (25.79%), Paraopeba (15.70%), Areado (15.03%)	5.50	III B
Ponte da BR-040 Paracatu	Paracatu (32.34%), Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas (26.06%), Vazante Unidade A (12.97%)	6.02	II C
Porto dos Poções	Paraopeba (54.85%), Coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas (17.03%), Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas (7.91%)	6.07	II C
Santa Rosa	Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas (25.51%), Paracatu (19.74%), Areado (14.54%)	6.24	II C
Fazenda Poções	Paracatu (47.45%), Vazante Unidade A (28.70%), Vazante Unidade B (11.94%)	6.49	I
Barra do Escurinho	Paracatu (59.38%), Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas (25,17%), Vazante Unidade A (7.97%)	6.55	I
Fazenda Córrego do Ouro	Paracatu (61,18%), Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas (15,44%), Vazante Unidade B (11,40%)	8.24	I

Figura 3.9 - Dados do balanço hídrico e principais litologias nas estações localizadas dentro da UGA 4 – Rio Paracatu

### 3.5 UGA 5 – Baixo Velhas – Verde Grande

A UGA 5 abrange uma área de 49.259,37 km<sup>2</sup> e abarca ao todo 10 bacias selecionadas, sendo a de menor dimensão representada por Claro dos Poções (447,10 km<sup>2</sup>) e a de maior área por Várzea da Palma (26.517,40 km<sup>2</sup> - Figuras 4.10 e 4.11). Dentro da UGA Baixo Velhas-Verde Grande estão os sistemas cárstico-fissurais da região de Montes Claros e Jaíba, muito ricos em feições cársticas de superfície e importantes como recurso hídrico subterrâneo.

As estações que foram analisadas dentro da UGA 5, com suas respectivas vazões subterrâneas específicas médias são: Ponte do Picão (1,42 L/s.km<sup>2</sup>), Ponte do Bicudo (3,31 L/s.km<sup>2</sup>), Fazenda Umburana Montante (1,99 L/s.km<sup>2</sup>), Claro dos Poções (2,32 L/s.km<sup>2</sup>), Ponte dos Ciganos (2,24 L/s.km<sup>2</sup>) e Colônia do Jaíba (0,48 L/s.km<sup>2</sup>). Tendo em vista as condições pluviométricas, geológicas e geomorfológicas do ambiente conformado ao redor dessas bacias, foram aglutinadas as áreas contíguas que abrangem os terrenos da margem direita do rio SF, constituídos essencialmente pelos materiais pertencentes às formações serra de Santa Helena e Grupo Paraopeba Indiviso.

Grande parte da UGA 5 compreende Zonas de Recarga Elevada e algumas Zonas de Recarga Ótima, constituídas essencialmente pelas rochas da Formação Lagoa do Jacaré, do Grupo Urucuia, coberturas detrito-lateríticas e depósitos aluvionares. As áreas desfavoráveis à recarga constituem faixas alongadas e estreitas onde afloram litotipos argilosos, ou com intercalações de argilosas do Supergrupo Espinhaço, corpos ígneos máficos e xistos.

Situada em uma porção bastante heterogênea sob o ponto de vista pluviométrico, visto que as faixas dos valores médios de chuva nas bacias selecionadas variam de 938,2 mm (Estação de Curimataí) a 1.500 mm (Santo Hipólito – ANA/CEMIG), a UGA 5 apresenta vazões subterrâneas específicas médias também diversas, sendo o menor valor identificado em Colônia do Jaíba (0,48 l/s.km<sup>2</sup>) e o maior (5,83 l/s.km<sup>2</sup>) em Santo Hipólito - ANA/CEMIG (5,83 l/s.km<sup>2</sup>).

As vazões totais obtidas por meio dos hidrogramas (Anexo V) apresentam nítida heterogeneidade, variando de 3,28 m<sup>3</sup>/s (Ponte do Picão) a 300,25 m<sup>3</sup>/s (Várzea da

Palma), com média de 62,50m<sup>3</sup>/s e mediana igual a 17,87 m<sup>3</sup>/s. A vazão total específica calculada esteve entre 1,47 l/s.km<sup>2</sup> (Colônia do Jaíba) e 13,01 l/s.km<sup>2</sup> (Estação de Curimataí), com média de 7,31 l/s.km<sup>2</sup> e mediana equivalente a 7,57 l/s.km<sup>2</sup>.

Os valores de escoamento superficial mínimo e máximo calculado para as bacias correspondem a 2,1 m<sup>3</sup>/s (Ponte do Picão) e 169,9 m<sup>3</sup>/s (Várzea da Palma), com média de 36 m<sup>3</sup>/s e mediana de 11,9 m<sup>3</sup>/s. Já o escoamento subterrâneo variou entre 1,03 m<sup>3</sup>/s (Claro dos Poções) e 130,34 m<sup>3</sup>/s (Várzea da Palma), com valor médio de 26,46 m<sup>3</sup>/s e mediana igual a 4,95 m<sup>3</sup>/s.

Tendo como base os valores de precipitação, o escoamento superficial calculado foi estimado entre 3,3% (Colônia do Jaíba) e 33,9% (Estação de Curimataí), com porcentagem média equivalente a 13,5% e mediana igual a 13,0%. Quarenta por cento das estações obtiveram taxas inferiores a 10% de escoamento superficial, enquanto os demais 60% registraram de 12% a 33,9% do total da pluviosidade.

O escoamento subterrâneo foi calculado entre 1,6% (Capitão Enéas e Colônia do Jaíba) a 12,7% (Várzea da Palma) das chuvas, com média igual a 7,1% e mediana equivalente a 6,2%. Setenta por cento das estações apresentaram valores inferiores a 10% das chuvas para o valor de escoamento subterrâneo.

A evapotranspiração variou entre 56,3% (Estação de Curimataí) e 95,1% (Colônia do Jaíba), com média de 79,4% e mediana igual a 78,9%. Somente 20% das estações apresentaram valores de evapotranspiração inferiores a 70% das chuvas.

Nota-se que todas as estações da UGA 5 apresentaram taxas de escoamento superficial superiores às de escoamento subterrâneo, sendo as taxas de evapotranspiração muito superiores as demais parcelas do balanço hídrico.

Mantendo-se a análise das bacias primárias em relação ao posicionamento das estações fluviométricas, ou seja, aquelas bacias delimitadas pela primeira estação útil de monitoramento ao longo de seu curso, pôde-se analisar junto ao extremo leste da BSF as relações entre as descargas subterrâneas específicas médias e seus materiais constituintes. Diante dessa análise foram separadas 6 bacias cuja descarga

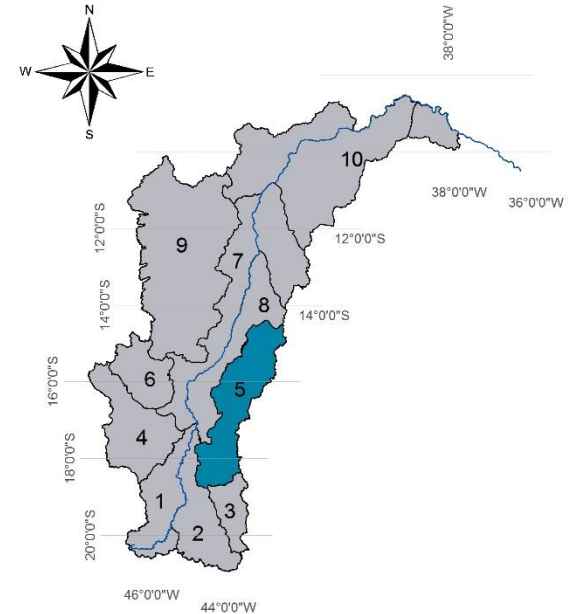
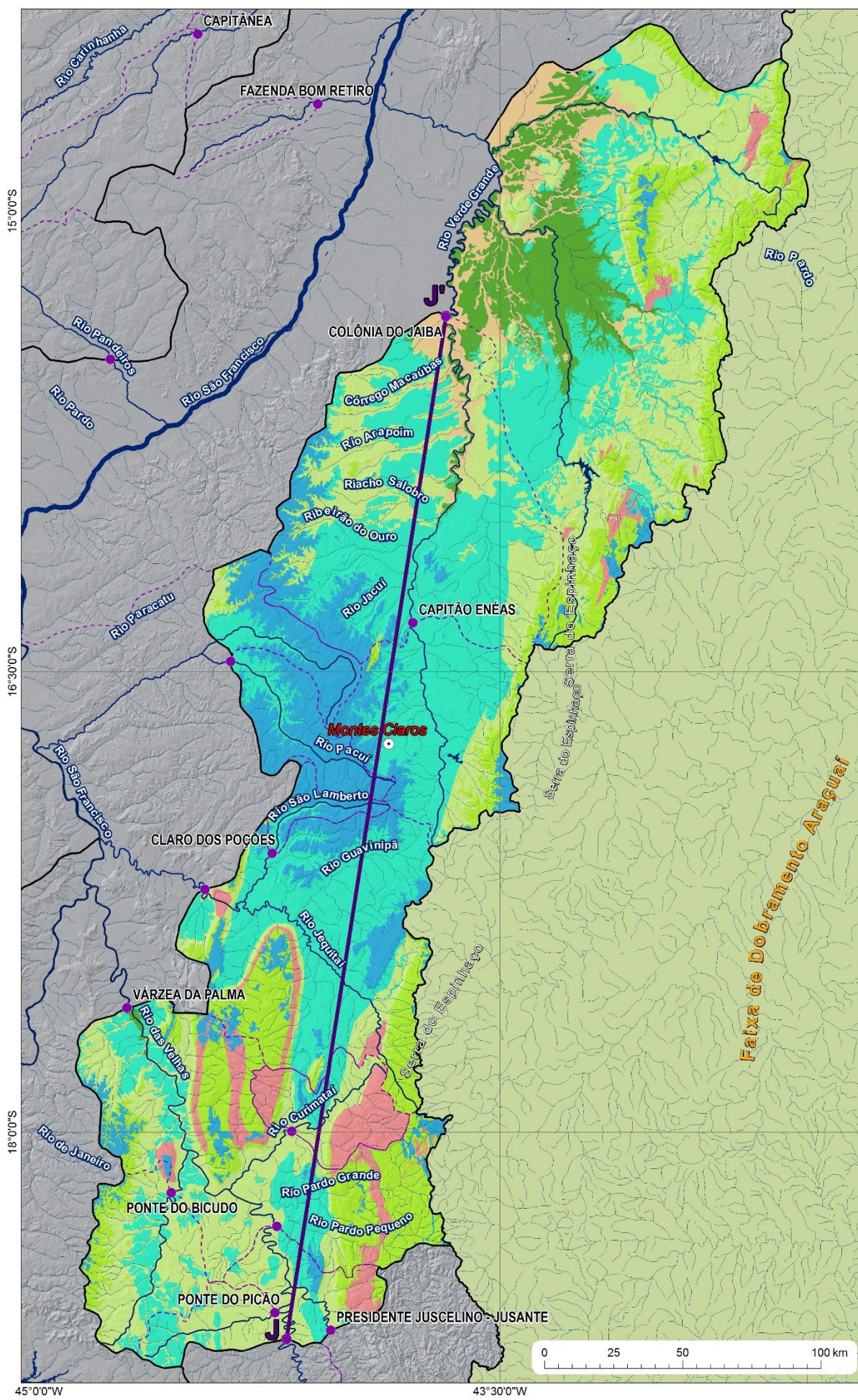
subterrânea média revelou um valor considerado muito baixo, em face das condições litológicas locais e da distribuição de chuvas em nível local / regional, obtendo-se uma média de apenas 2,71 L/s.km<sup>2</sup>.

Os materiais que representam majoritariamente esse compartimento específico da UGA 5 estão representados por rochas pelíticas, seja da Formação serra de Santa Helena, seja da Formação Lagoa do Jacaré, induzindo, de certo modo, a uma diminuição das taxas de infiltração e, por conseguinte, dos processos de recarga. No entanto, considerando-se a conformação de um substrato calcário e a propensão do ambiente à dissolução química, as formas de interconexão hidráulica em escala regional são inevitáveis, ressaltando-se as imediações do município de Montes Claros, junto às cabeceiras do rio Verde Grande.

Como discutido nos referidos estudos, foi observada a grande amplitude de variação dos limites entre os divisores que são assumidos normalmente para as bacias hidrográficas, tendo sido apontados argumentos técnicos que indicam à necessidade de se assumir para o domínio em apreço a ocorrência de perdas naturais de escoamento subterrâneo para bacias vizinhas, volumes estes frequentemente não computados junto às descargas de base em uma dada estação, posto que a dinâmica de fluxos no ambiente cárstico ocorre prioritariamente no meio subterrâneo.

UGA Baixo Velhas - Verde Grande - Zonas de recarga e descarga

Mapas de localização



Legendas

- ⊙ Sedes municipais
- Estações fluviométricas
- Linha seção
- Zonas de descarga local
- Zonas de descarga intermediária
- Zonas de descarga regional
- ▭ Limite UGA
- ▭ Limite sub-bacia
- Zonas de recarga
- ZFD - ZONAS DE FLUXO DESPREZÍVEL
- ZRR - ZONAS DE RECARGA RESTRITA
- ZRD - ZONAS DE RECARGA DISCRETA
- ZRMm - ZONAS DE RECARGA MEDIANA
- ZRMo - ZONAS DE RECARGA MODERADA
- ZRE - ZONAS DE RECARGA ELEVADA
- ZRO - ZONAS DE RECARGA ÓTIMA

Perfil topográfico esquemático representativo UGA Baixo Velhas Verde Grande

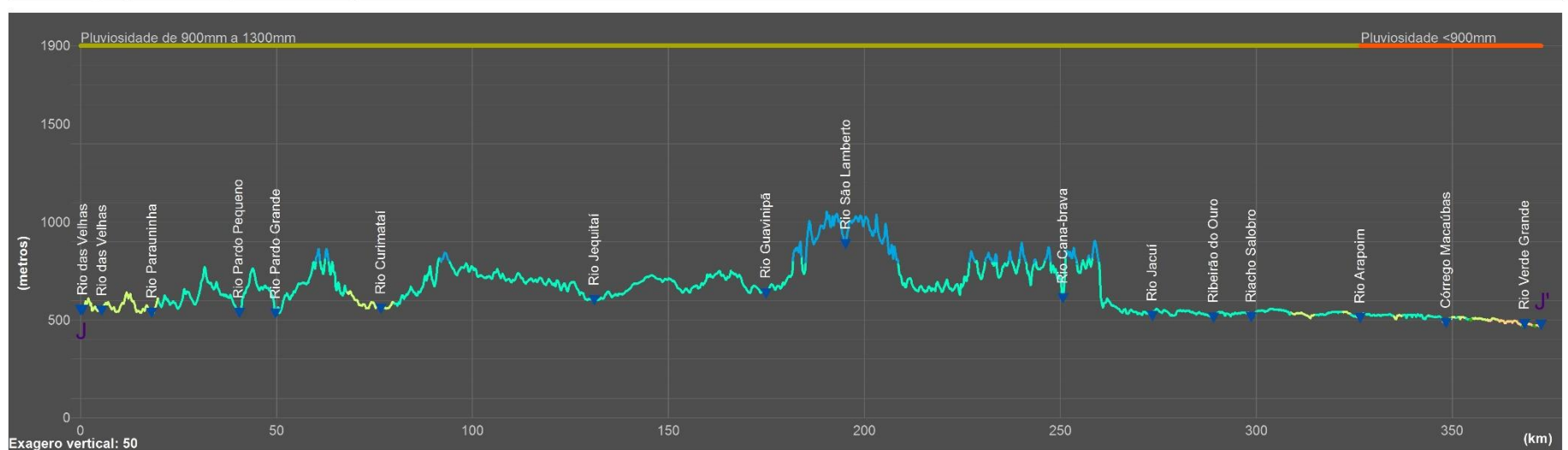
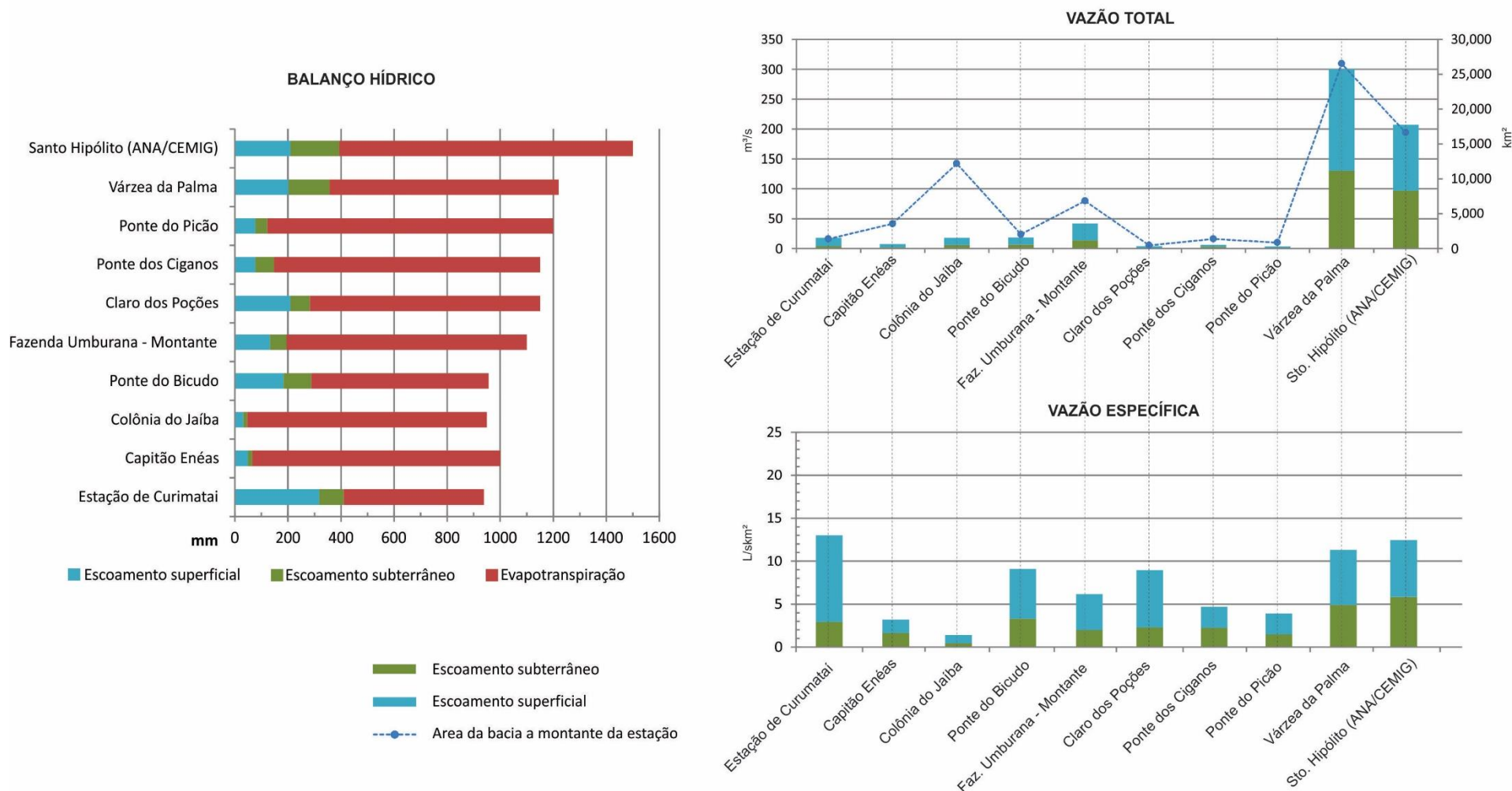


Figura 3.10 - UGA 5 – Baixo Velhas – Verde Grande

UGA 5 - Baixo Velhas- Verde Grande		Área da bacia a montante da estação	Precipitação média anual	Escoamento total na estação		Escoamento superficial				Escoamento subterrâneo				Evapotranspiração	
				vazão	vazão específica	vazão	vazão específica	valor ponderado pela precipitação	vazão	vazão específica	valor ponderado pela precipitação	valor ponderado pela precipitação	valor ponderado pela precipitação		
Estação Fluviométrica	Curso d'água	km <sup>2</sup>	mm	m <sup>3</sup> /s	l/s.km <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s	l/s.km <sup>2</sup>	%	mm	m <sup>3</sup> /s	l/s.km <sup>2</sup>	%	mm	%	mm
Estação de Curumataí	Rio Curumataí	1,371.8	938.2	17.84	13.01	13.8	10.1	33.9	317.7	4.02	2.93	9.9	92.5	56.3	528.0
Capitão Enéas	Rio Verde Grande	3,541.3	1000.0	7.34	2.07	5.5	1.6	4.9	49.3	1.81	1.63	1.6	16.1	93.5	934.7
Colônia do Jaíba	Rio Verde Grande	12,175.1	950.0	17.90	1.47	12.0	1.0	3.3	31.2	5.87	0.48	1.6	15.2	95.1	903.6
Ponte do Bicudo	Rio do Bicudo	2,033.2	956.5	18.54	9.12	11.8	5.8	19.1	183.1	6.73	3.31	10.9	104.4	69.9	669.0
Fazenda Umbrurana - Montante	Rio Jequitáí	6,817.0	1100.0	42.07	6.17	28.5	4.2	12.0	131.8	13.58	1.99	5.7	62.8	82.3	905.4
Claro dos Poções	Rio São Lambertito	447.1	1150.0	4.00	8.96	3.0	6.6	18.2	209.5	1.03	2.31	6.3	73.0	75.4	867.6
Ponte dos Ciganos	Rio Pacuí	1,372.4	1150.0	6.42	4.68	3.3	2.4	6.7	76.8	3.08	2.24	6.1	70.7	87.2	1002.5
Ponte do Picão	Ribeirão do Picão	847.5	1200.0	3.28	3.87	2.1	2.4	6.4	77.0	1.21	1.42	3.7	44.9	89.8	1078.1
Várzea da Palma	Rio das Velhas	26,517.4	1220.2	300.25	11.32	169.9	6.4	16.6	202.1	130.34	4.92	12.7	155.0	70.7	863.1
Santo Hipólito (ANA/CEMIG)	Rio das Velhas	16,634.3	1500.0	207.36	12.47	110.4	6.6	14.0	209.4	96.93	5.83	12.3	183.8	73.8	1106.9
média		7,175.7	1116.5	62.50	7.31	36.0	4.7	13.5	148.8	26.46	2.71	7.1	81.8	79.4	885.9
máximo		26,517.4	1500.0	300.25	13.01	169.9	10.1	33.9	317.7	130.34	5.83	12.7	183.8	95.1	1106.9
mínimo		447.1	938.2	3.28	1.47	2.1	1.0	3.3	31.2	1.03	0.48	1.6	15.2	56.3	528.0
mediana		2,787.3	1125.0	17.87	7.57	11.9	5.0	13.0	157.5	4.95	2.28	6.2	71.9	78.9	904.5



Estação	Litologias principais na bacia a montante da estação	vazão subterrânea específica mínima (l/s.km <sup>2</sup> )	Subdomínio geológico
Colônia do Jaíba	Lagoa do Jacaré (23.90%), Lagoa do Jacaré calcário (17.63%), Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas (17.01%)	0.48	III D
Ponte do Picão	Serra de Santa Helena (68.88%), Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas (28.11%), Lagoa do Jacaré (3.01%)	1.42	IV A
Fazenda Umbrurana Montante	Lagoa do Jacaré (47.45%), Galho do Miguel (13.98%), Coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas (8.60%)	1.99	IV A
Ponte dos Ciganos	Lagoa do Jacaré (29.39%), Coberturas detrito-lateríticas com concreções feruginosas (19.84%), Uruçuia (17.01%)	2.24	III D
Claro dos Poções	Lagoa do Jacaré (81.09%), Coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas (12.08%), Lagoa do Jacaré calcário (3.77%)	2.31	IV A
Estação de Curumataí	Galho do Miguel (28.38%), Serra de Santa Helena (23.07%), Lagoa do Jacaré calcário (10.52%)	2.93	IV B
Ponte do Bicudo	Serra de Santa Helena (50.47%), Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas (24.90%), Três Marias (20.08%)	3.31	IV A
Várzea da Palma	Serra de Santa Helena (37.88%), Galho do Miguel (8.863%), Coberturas detrito-lateríticas feruginosas (6.56%)	4.92	III B
Santo Hipólito (ANA/CEMIG)	Serra de Santa Helena (42.78%), Belo Horizonte (9.59%), Nova Lima associação ressedimentada (4.32%)	5.83	IV B
Capitão Enéas	Lagoa do Jacaré (49.75%), Lagoa do Jacaré calcário (22.60%), Lagoa do Jacaré marga (12.70%)	0.51	IV B

Figura 3.11 - Dados do balanço hídrico e principais litologias nas estações localizadas dentro da UGA 5 – Baixo Velhas – Verde Grande

### 3.6 UGA 6 – Rio Urucuia

A UGA 6 estende-se por 23.758,78 km<sup>2</sup> em porções dos Subdomínios IID e IIIB, a norte da UGA 4- Paracatu. Nela se encontram 5 bacias selecionadas (Vila Urucuia, Santo Inácio, Fazenda Carvalho, Arinos Montante, Buritis-Jusante) cujas áreas variam de 2.829,40 km<sup>2</sup> (Buritis – Jusante) a 23.759 m<sup>2</sup> (Santo Inácio, Figuras 3.12 e 3.13).

As cabeceiras dos rios Piratinga, São Domingos e Urucuia ocorrem em cotas altimétricas de 750m NM a 950 mNM, e drenam no sentido sul/sudeste rumo à calha do rio SF. Majoritariamente, ocorrem os sedimentos da Formação Três Marias os quais ocupam cerca de 40% do substrato rochoso regional associado às bacias hidrográficas dos referidos cursos d'água. Ocorrem também de modo expressivo os materiais de cobertura detrito-laterítica com concreções ferruginosas. As rochas calcárias do Grupo Bambuí estão, em geral, cobertas por essas unidades, aflorando nos vales ou próximo das serras alinhadas na direção NW-SE, na porção nordeste da área.

Grande parte da UGA Urucuia é composta por zonas de recarga de alto potencial, sendo essas as áreas classificadas como Zonas de Recarga Ótima e Zonas de Recarga Elevada, que ocorrem atreladas principalmente as áreas de ocorrência das coberturas detrito-lateríticas.

Dentre as bacias selecionadas na UGA 6, o menor valor de pluviosidade foi verificado na bacia da estação Vila Urucuia (1.084,9 mm) e o maior na bacia Buritis - Jusante (1.325 mm).

Os valores de descarga subterrânea específica nas 5 bacias variam de 4,57 l/s.km<sup>2</sup> (Santo Inácio) a 6,71 l/s.km<sup>2</sup> (Fazenda Carvalho). A estação Santo Inácio se encontra já bem próxima a confluência do rio Urucuia com o rio São Francisco, estando posicionada a jusante das demais estações, demarcando a bacia que configura toda a UGA Urucuia. A sub-bacia associada a estação Fazenda Carvalho, por sua vez, encontra-se no rio Japoré, cabeceira do rio Urucuia, em cotas mais elevadas onde predominam coberturas sobre a Formação Três Marias.

Deve-se realçar as bacias associadas as estações Fazenda Carvalho, Buritis Jusante e Arinos Montante, cujos valores de descarga subterrânea específica são 6,71 L/s.km<sup>2</sup>, 5,33 L/s.km<sup>2</sup> e 5,68 L/s.km<sup>2</sup>, respectivamente. Esses valores poderiam ser ainda

maiores. Os compartimentos situados na bacia oposta vinculada ao rio Paranã, em Goiás, denotam traços de drenagem superpostos a zonas de fraturas regionais NNW em meio a rochas carbonáticas do Subgrupo Paraopeba Indiviso, situadas em cotas inferiores (550 a 700 mNM). Muito provavelmente, as zonas de fraturas NNW estão conectadas aos compartimentos da bacia do Urucuia importando parte das águas infiltradas por sobre os materiais de cobertura, e assim, alcançando níveis inferiores vinculados aos carbonatos do Subgrupo Paraopeba.

As vazões totais avaliadas nos hidrogramas das 5 bacias selecionadas (Anexo VI) variaram de 41,60 m<sup>3</sup>/s (Buritis – Jusante) a 241,90 m<sup>3</sup>/s (Santo Inácio), com média de 135,54 m<sup>3</sup>/s e mediana equivalente a 143,05 m<sup>3</sup>/s. A vazão total específica variou de 10,18 l/s.km<sup>2</sup> (Santo Inácio) a 14,70 l/s.km<sup>2</sup> (Buritis – Jusante), com valor médio de 12,52 l/s.km<sup>2</sup> e mediana igual a 12,17 l/s.km<sup>2</sup>.

Os valores de vazão de escoamento superficial estiveram entre 24,46 m<sup>3</sup>/s (Fazenda Carvalho) e 133,29 m<sup>3</sup>/s (Santo Inácio), com média igual a 75,51 m<sup>3</sup>/s e mediana de 76,32 m<sup>3</sup>/s. A descarga subterrânea teve o seu valor mínimo igual a 15,09 m<sup>3</sup>/s (Buritis – Jusante) e o máximo igual a 108,61 m<sup>3</sup>/s (Santo Inácio), com média de 60,03 m<sup>3</sup>/s e mediana de 66,73 m<sup>3</sup>/s.

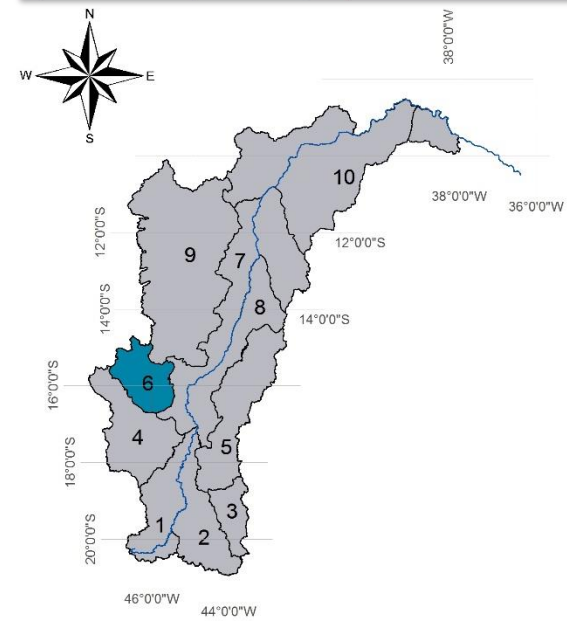
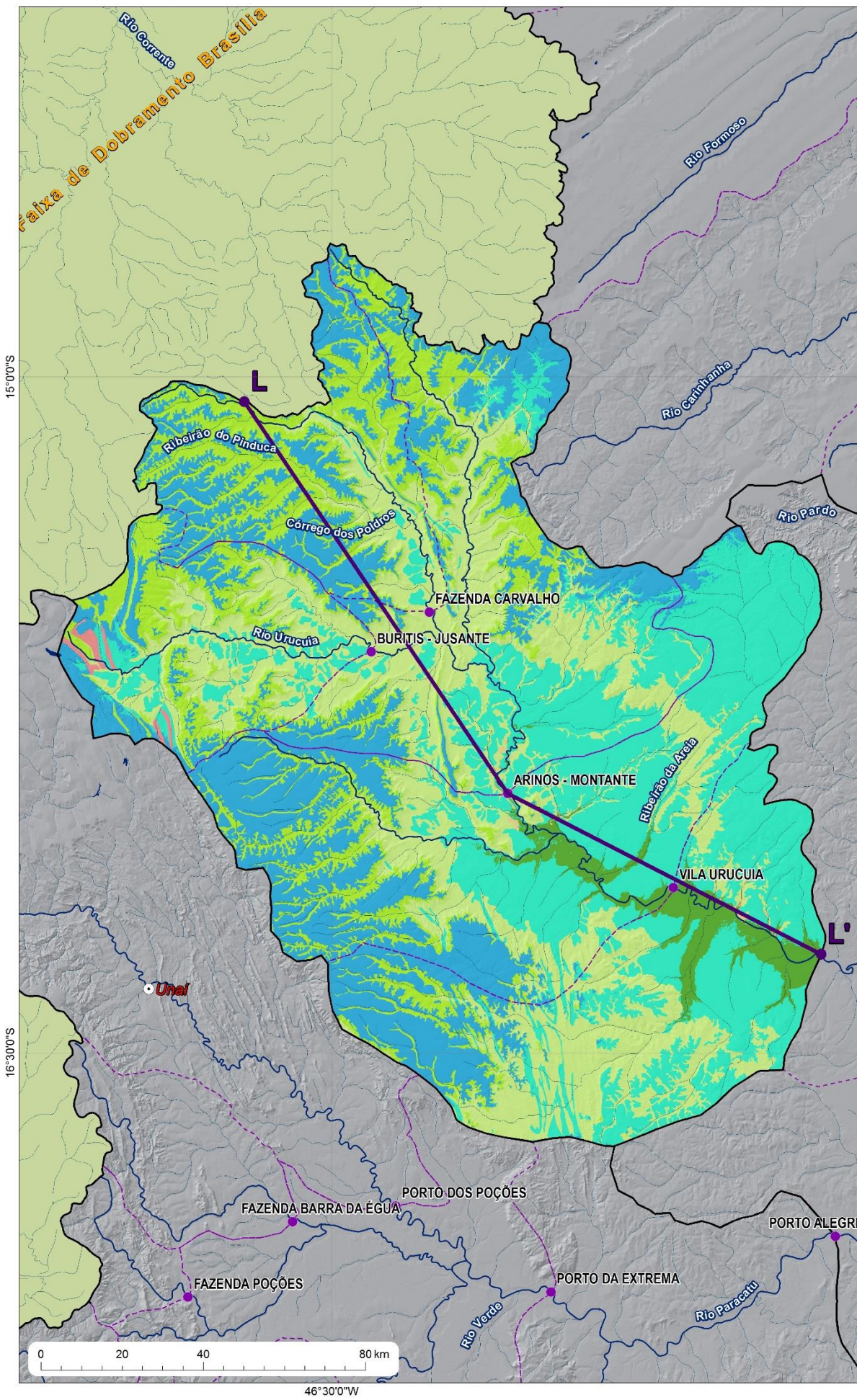
Utilizando como referência os valores de precipitação, o escoamento superficial calculado variou de 16,1% (Santo-Inácio) a 22,3% (Buritis – Jusante), com porcentagem média e mediana equivalentes a 18,6% e 18,4%, respectivamente. As taxas de escoamento superficial mostraram-se similares, com a estação Buritis – Jusante apresentando pouco mais de 20% do valor da precipitação. O escoamento subterrâneo calculado variou entre 12,7% (Buritis – Jusante) e 17,3% (Fazenda Carvalho), com média de 14,3% e mediana igual a 13,9%. Com exceção de Fazenda Carvalho, todas as estações apresentaram taxas de escoamento subterrâneo semelhantes. A evapotranspiração variou de 62,6% (Fazenda Carvalho) a 70,8% (Santo Inácio), com média igual a 67,1% e mediana equivalente a 67,7%.

De modo geral, percebe-se que as taxas de escoamento superficial foram superiores às de escoamento subterrâneo, ficando atrás somente do percentual de evapotranspiração.



UGA Rio Urucua - Zonas de recarga e descarga

Mapas de localização



Legendas

- Sedes municipais
  - Estações fluviométricas
  - Linha seção
  - Zonas de descarga local
  - Zonas de descarga intermediária
  - Zonas de descarga regional
  - Limite UGA
  - Limite sub-bacias
- Zonas de recarga**
- ZFD - ZONAS DE FLUXO DESPREZÍVEL
  - ZRR - ZONAS DE RECARGA RESTRITA
  - ZRD - ZONAS DE RECARGA DISCRETA
  - ZRMe - ZONAS DE RECARGA MEDIANA
  - ZRMo - ZONAS DE RECARGA MODERADA
  - ZRE - ZONAS DE RECARGA ELEVADA
  - ZRO - ZONAS DE RECARGA OTIMA

Perfil topográfico esquemático representativo UGA Urucua

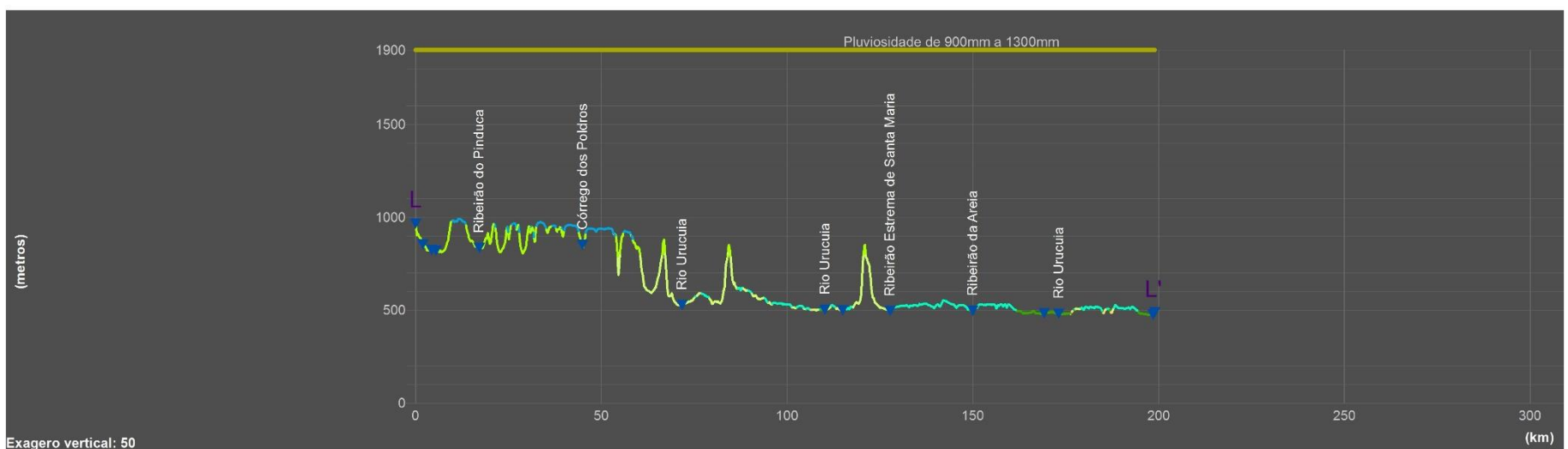
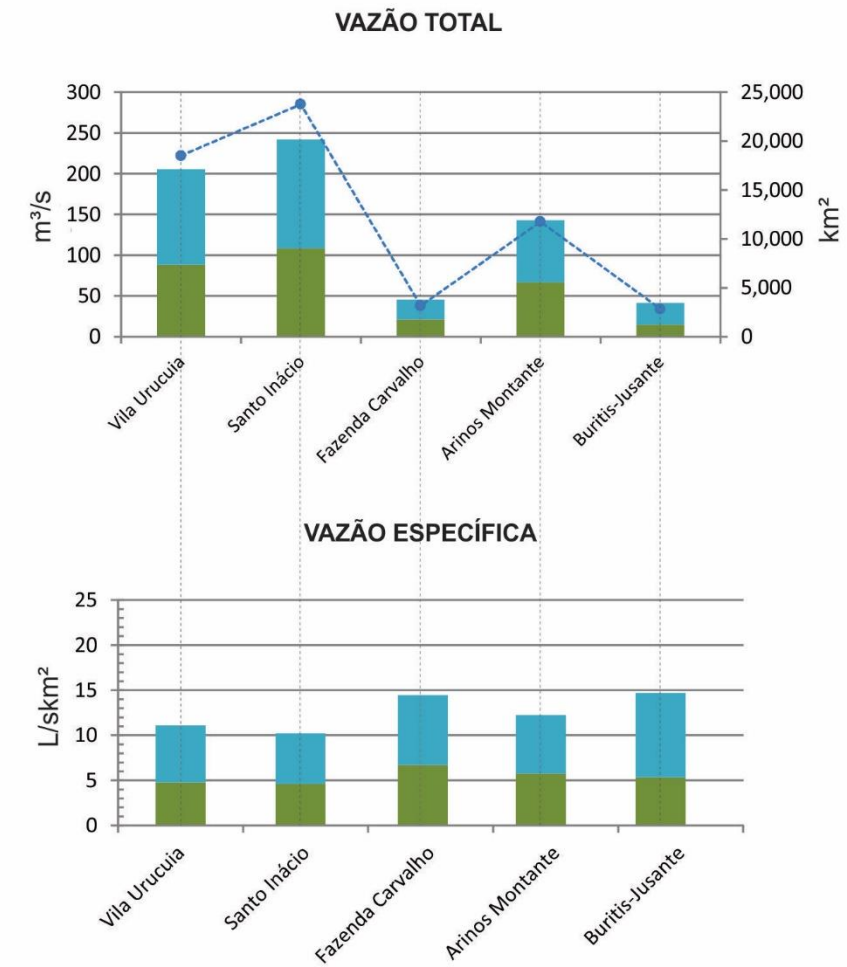
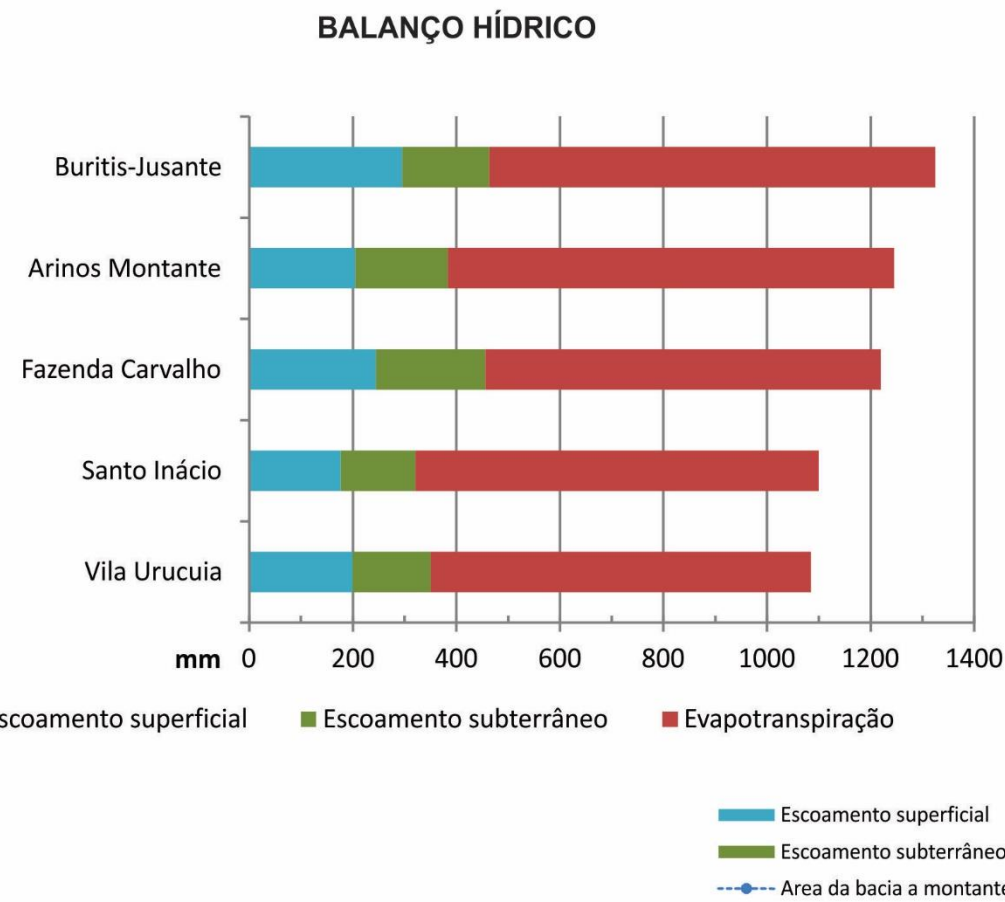


Figura 3.12 - UGA 6 – Rio Urucua

UGA 6 - Rio Urucuia		Área da bacia a montante da estação	Precipitação média anual	Escoamento total na estação		Escoamento superficial				Escoamento subterrâneo				Evapotranspiração	
				vazão	vazão específica	vazão	vazão específica	valor ponderado pela precipitação		vazão	vazão específica	valor ponderado pela precipitação		valor ponderado pela precipitação	
Estação Fluviométrica	Curso d'água	km <sup>2</sup>	mm	m <sup>3</sup> /s	l/s.km <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s	l/s.km <sup>2</sup>	%	mm	m <sup>3</sup> /s	l/s.km <sup>2</sup>	%	mm	%	mm
Vila Urucuia	Rio Urucuia	18,495.9	1084.9	205.51	11.11	116.96	6.32	18.4	199.4	88.56	4.79	13.9	151.0	67.7	734.5
Santo Inácio	Rio Urucuia	23,759.0	1100.0	241.90	10.18	133.29	5.61	16.1	176.9	108.61	4.57	13.1	144.2	70.8	778.9
Fazenda Carvalho	Rio São Domingos	3,156.5	1220.0	45.63	14.46	24.46	7.75	20.0	244.4	21.17	6.71	17.3	211.5	62.6	764.1
Arinos Montante	Rio Urucuia	11,757.0	1245.6	143.05	12.17	76.32	6.49	16.4	204.7	66.73	5.68	14.4	179.0	69.2	861.8
Buritis-Jusante	Rio Urucuia	2,829.4	1325.0	41.60	14.70	26.52	9.37	22.3	295.6	15.09	5.33	12.7	168.1	65.0	861.3
média		11,999.6	1195.1	135.54	12.52	75.51	7.11	18.6	224.2	60.03	5.42	14.3	170.8	67.1	800.1
máximo		23,759.0	1325.0	241.90	14.70	133.29	9.37	22.3	295.6	108.61	6.71	17.3	211.5	70.8	861.8
mínimo		2,829.4	1084.9	41.60	10.18	24.46	5.61	16.1	176.9	15.09	4.57	12.7	144.2	62.6	734.5
mediana		11,757.0	1220.0	143.05	12.17	76.32	6.49	18.4	204.7	66.73	5.33	13.9	168.1	67.7	778.9



Estação	Litologias principais na bacia a montante da estação	vazão subterrânea específica mínima (l/s.km <sup>2</sup> )	Subdomínio geológico
Santo Inácio	Três Marias (33.43%), Coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas (21.63%), Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas (15.48%)	4.57	III B
Vila Urucuia	Três Marias (34.77%), Coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas (23.03%), Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas (15.31%)	4.79	III B
Buritis Jusante	Três Marias (47.86%), Coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas (14,51%), Paraopeba (13.22%)	5.33	II D
Arinos Montante	Três Marias (42,55%), Coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas (21.62%), Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas (11,31%)	5.68	II D
Fazenda Carvalho	Três Marias (47,65%), Coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas (40.38%), Paraopeba (7.34%)	6.71	II D

Figura 3.13 - Dados do balanço hídrico e principais litologias nas estações localizadas dentro da UGA 6 – Rio Urucuia

### 3.7 UGA 7 – Margem Esquerda SF

A UGA 7 possui uma área aproximada de 43.987,52 km<sup>2</sup> e abarca somente a bacia delimitada pela estação fluviométrica Fazenda Bom Retiro, que abrange uma área aproximada de 600 km<sup>2</sup> (Figuras 3.14 e 3.15, Anexo VII). Os demais postos fluviométricos existentes localizam-se ao longo da calha do rio São Francisco ou não apresentaram séries históricas com mais de 30 anos e dados consistidos. Dessa forma, a caracterização hidrológica dessa área fica debilitada, sendo necessários mais dados de qualidade para a análise.

Situada entre faixas isoietais que variam de 700 mm a 1.200 mm, os valores de precipitação encontrados na UGA 7 são bastante heterogêneos. A bacia Fazenda Bom Retiro situa-se numa porção intermediária (média anual de precipitação de 1.000 mm).

Na Fazenda Bom Retiro a descarga subterrânea específica calculada é baixa (1,63 l/s.km<sup>2</sup>). Notam-se percentuais de escoamentos superficial e subterrâneo em relação aos valores de chuva bastante próximos, ambos respondendo juntos por cerca de 10% da pluviosidade total. A evapotranspiração exerce um papel de destaque no que diz respeito ao balanço hídrico da bacia, visto que é equivalente a cerca de 90% da precipitação na área.

Essa unidade de gestão tem seu início em localidade próxima a que se inicia a unidade UGA 8 - Margem Direita (item 4.8), próximo a Pirapora. O diferencial marcante que se projeta como elemento fundamental para a separação dessas duas unidades marginais da calha central do rio São Francisco é exatamente o conjunto de materiais constituintes das bacias tributárias oriundas de suas cabeceiras. Nesse sentido, observam-se que os arenitos perfazem o tipo litológico principal existente nas faixas altitudinais superiores a essa extensa zona receptora de descargas regionais, onde o Grupo Urucuia constitui 86% das litologias presentes no Chapadão Urucuia, estendendo-se ainda às cabeceiras formadoras do rio homônimo.

Além disso, a ocorrência das rochas carbonáticas na base desse espesso pacote de materiais porosos evidencia um conjunto de atributos de elevada potencialidade hidrogeológica, aumentando sobremaneira a capacidade de produção de água e, portanto, dos aportes junto à calha central do rio São Francisco em sua margem

esquerda, o que se estende por não menos do que 750 km, até aproximadamente a confluência do rio Grande com o rio São Francisco. Interessante notar ainda que as áreas extensas das planícies aluvionares dessa margem esquerda também estão cobertas por aglomerados detrítico-lateríticos ferruginosos, os quais se sobrepõem por grandes áreas os calcarenitos do Subgrupo Paraopeba indiviso.

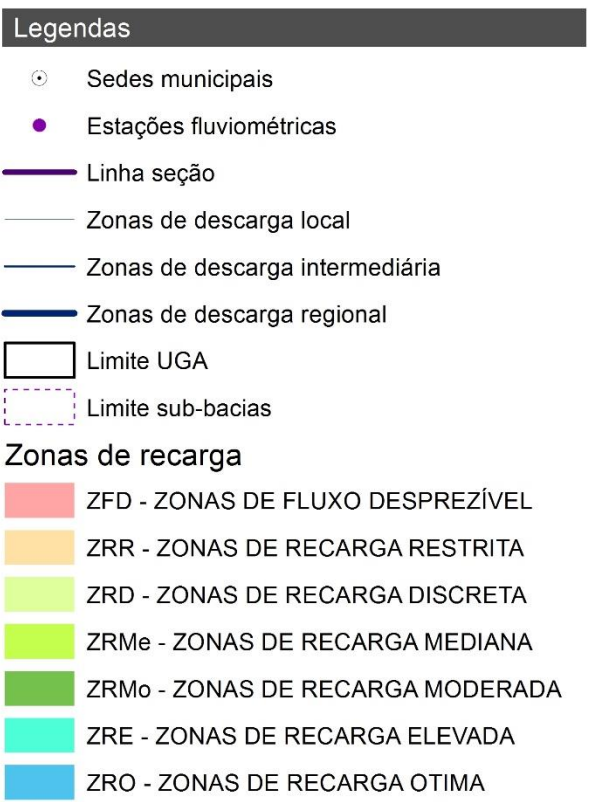
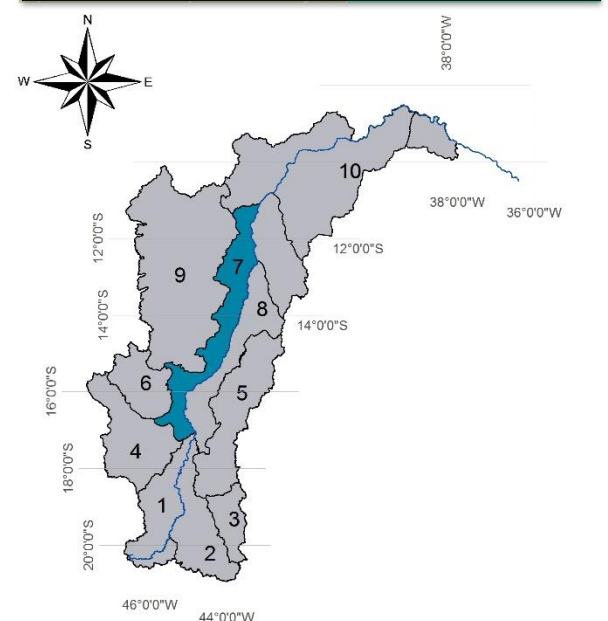
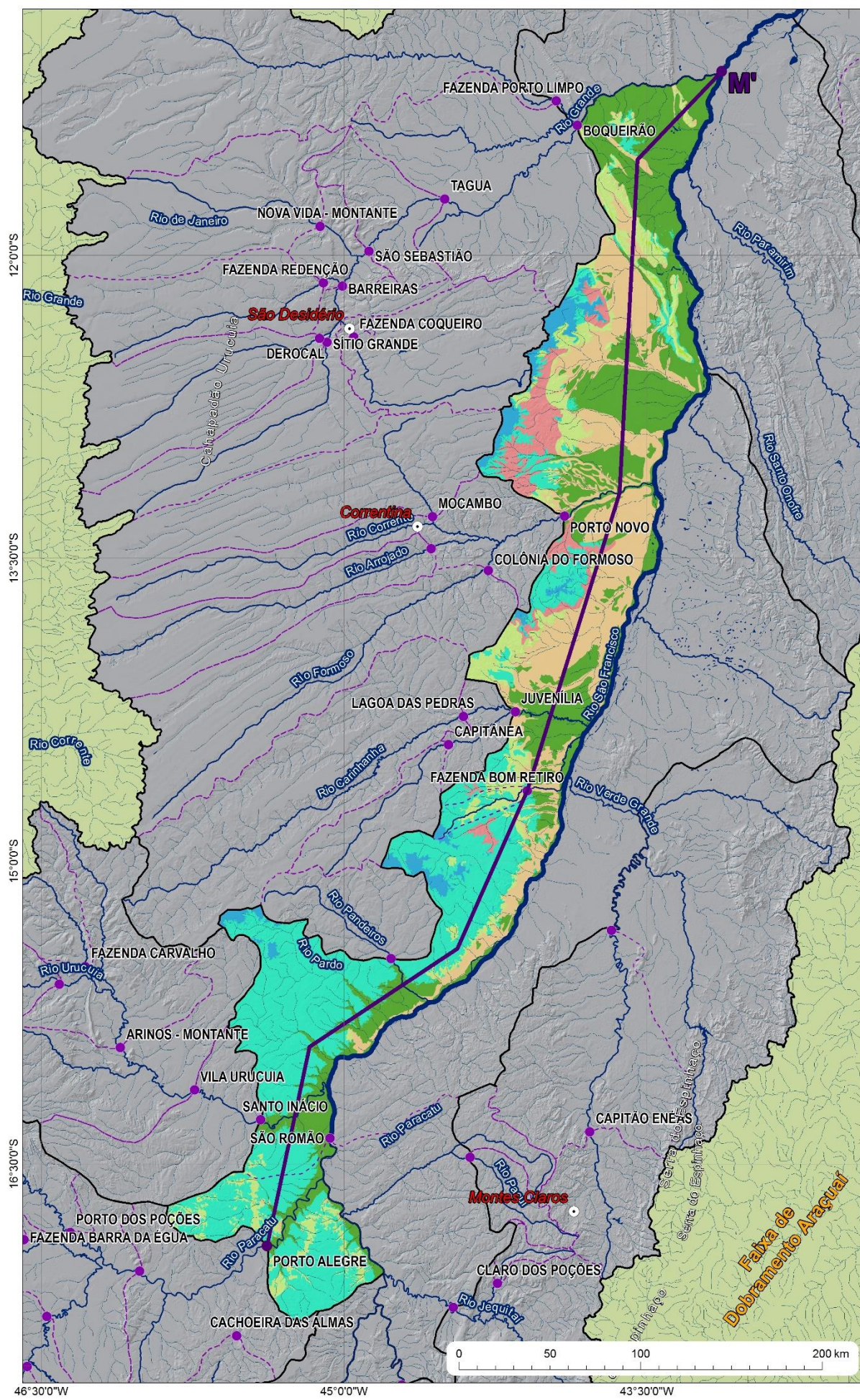
Essas duas extensas unidades de gestão denominadas de Margens Direita e Esquerda do rio SF englobam duas grandes zonas de descarga regionais de diversos sistemas aquíferos (Zonas Receptoras), que de modo acoplado transferem volumes expressivos para a manutenção das descargas de base do rio SF. Contudo, em face das diferenças dos tipos litológicos encontrados ao longo das cabeceiras de drenagens vinculadas às drenagens principais das UGAs Chapadão Urucuia e Rio Urucuia – (Margem Esquerda) e UGA Baixo Velhas – Verde Grande (Margem Direita) e da própria área de contribuição abrangendo ambos os domínios, torna-se evidente o grande diferencial entre as descargas produzidas, em que a volumetria tributária da margem esquerda traduz-se em um aporte incomparavelmente superior.

A UGA 7 – Margem Esquerda tem as áreas de melhor potencial de recarga associadas a afloramento das rochas dos grupos Areado e Urucuia e áreas onde estão depositadas coberturas detrítico-lateríticas. As áreas de Fluxo Desprezível correspondem aquelas onde o substrato aflorante é composto pelas rochas argilosas da Formação serra de Santa Helena.

Destaca-se na UGA 7 – Margem Esquerda, a presença de uma área cárstica notável, que diante de seus atributos espeleológicos, paleontológicos e da própria geomorfologia cárstica foi transformada em parque. O Parque Cavernas do Peruaçu localiza-se no contexto geológico do Grupo Bambuí. Nos calcários aflorantes próximo ao rio São Francisco, nas vizinhanças do rio Peruaçu encontram-se um conjunto de cavernas bem desenvolvidas e vales cársticos, com *canyons* e paredões altos que guardam registros de uma ocupação humana pré-histórica, sendo uma das áreas de destaque em termos de paisagem cárstica na bacia do rio São Francisco.

UGA Margem Esquerda - Zonas de recarga e descarga

Mapas de localização



Perfil topográfico esquemático representativo UGA Margem Esquerda

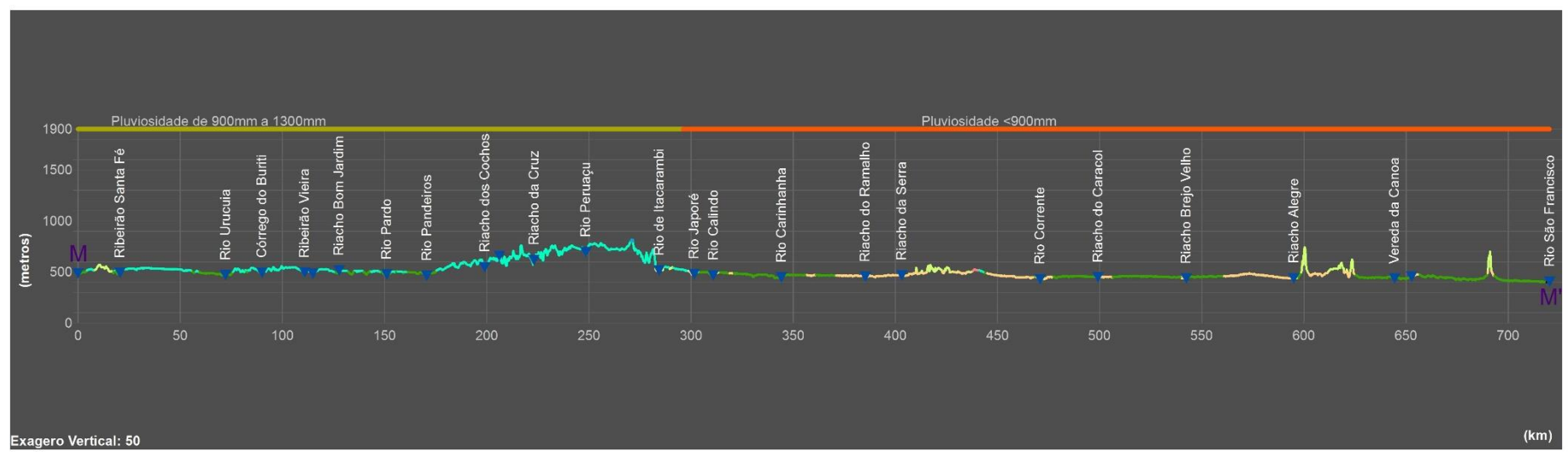
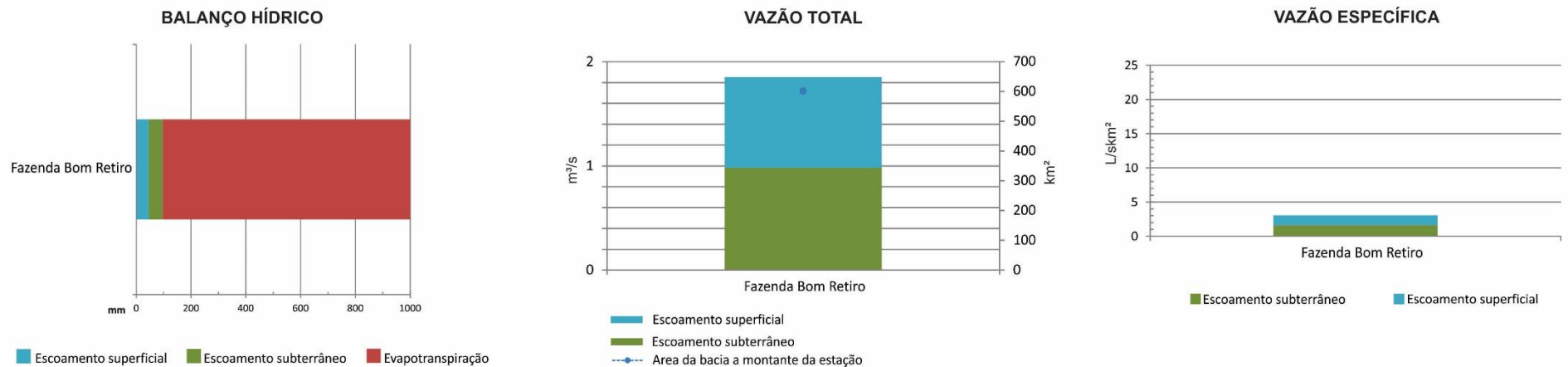


Figura 3.14 - UGA 7 – Margem Esquerda

UGA 7 - Margem Esquerda SF		Área da bacia a montante da estação	Precipitação média anual	Escoamento total na estação		Escoamento superficial				Escoamento subterrâneo				Evapotranspiração	
				vazão	vazão específica	vazão	vazão específica	valor ponderado pela precipitação		vazão	vazão específica	valor ponderado pela precipitação		valor ponderado pela precipitação	
Estação Fluviométrica	Curso d'água	km <sup>2</sup>	mm	m <sup>3</sup> /s	l/s.km <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s	l/s.km <sup>2</sup>	%	mm	m <sup>3</sup> /s	l/s.km <sup>2</sup>	%	mm	%	mm
Fazenda Bom Retiro	Rio Japoré	600.2	1000.0	1.84	3.07	0.9	1.4	4.5	45.5	0.98	1.63	5.1	51.4	90.3	903.1



Estação	Litologias principais na bacia a montante da estação	vazão subterrânea específica mínima (L/s.km <sup>2</sup> )	Subdomínio geológico
Fazenda Bom retiro	Paraopeba (25.27%), Urucuia (24.94%), Sete Lagoas (15.25%)	1.63	III E

Figura 3.15 - Dados do balanço hídrico e principais litologias nas estações localizadas dentro da UGA 7 – Margem Esquerda

### 3.8 UGA 8 – Margem Direita SF

A UGA 8 (Figuras 3.16) abrange uma área de 36.055,85 km<sup>2</sup> e não apresenta bacias delimitadas por estações fluviométricas selecionadas. Nesse caso, as estações disponíveis não se adequam aos critérios estabelecidos para o estudo (ver item 2.2). Os pontos de monitoramento existentes se concentram ao longo da calha do rio São Francisco.

A UGA 8 ocupa extensa e alongada faixa junto à margem direita da calha central do rio São Francisco, desde a região de Várzea da Palma e Pirapora em MG, quase na Foz do rio das Velhas, atravessando o limite entre os estados de Minas Gerais e Bahia, até a cidade de Paratinga próximo à confluência entre os rios São Francisco e Santo Onofre, na Bahia.

Configura-se inicialmente, ainda no estado de Minas Gerais, pela ocorrência de um relevo mais acidentado onde se constituem serranias intensamente dissecadas por vales paralelos que escoam diretamente para a calha do rio SF em direção NE-SW. As coberturas detrito-lateríticas ferruginosas e os depósitos aluvionares antigos ocorrem nas partes baixas das planícies conformadas marginalmente à calha do SF, por sobre os terraços aluviais antigos e meandros abandonados. Importante destacar, que apesar da porosidade efetiva elevada desses depósitos, as cotas baixas já muito próximas a calha do rio São Francisco que corresponde ao nível de base regional, fazem com que tais zonas não apresentem função de recarga de destaque, sendo, portanto, classificadas como Zonas de Recarga Moderada.

O substrato está representado por carbonatos e pelitos da Formação Lagoa do Jacaré ou rochas pelito carbonáticas do Subgrupo Paraopeba Indiviso junto às zonas mais rebaixadas dos vales. Logo acima é comum a presença de siltitos e arcóseos da Formação Três Marias conformando meias encostas e pequenos interflúvios locais. Já os metapelitos da Formação serra de Santa Helena encontram-se em zonas mais elevadas, situadas logo abaixo das coberturas sedimentares cretáceas do Grupo Urucua, as quais ocupam invariavelmente os topos residuais, na forma de pequenos platôs. Esses platôs, alongados ou não, conformam os interflúvios das bacias locais em torno da cota altimétrica de 800 m.

Aproximadamente, a partir da cidade de São Romão, o rio SF inverte para Nordeste e, ao longo de toda a sua margem direita, como um compartimento típico de extensas faixas receptoras das descargas regionais, desenvolve-se um ambiente de planícies alargadas por processos antigos da própria evolução do modelado fluvial, com meandros abandonados e, esporadicamente, pontuado por morros residuais isolados. Essas planícies mantêm-se em faixa de largura média em torno de 10 km, embora em alguns locais dessa margem direita, possam se estender até mais de 50 km, como no caso da região abrangida pelos baixos cursos dos rios Verde Grande e Gortuba, onde o relevo plano exhibe um gradiente topográfico inferior a 4 mm/km entre a serra do Jaíba e o talvegue do rio São Francisco.

Adentrando-se o território do estado baiano, logo após a localidade de Malhada, os terraços aluvionares antigos da margem direita mostram-se ainda potentes, atingindo cerca de 10 km de largura, observando-se que as planícies laterais a essas faixas com constantes depósitos de areias possam também se estender ainda mais, como se pode observar também na margem esquerda, descrita anteriormente.

Como citado, esse domínio não apresenta o mesmo potencial hidrogeológico que se conforma junto às zonas de contribuição observadas da margem esquerda. Pelo contrário, além de não existirem coberturas areníticas espessas em altimetria elevada como aquelas encontradas no Chapadão Urucuia, esse compartimento carece também de índices de pluviosidade mais generosos e de elevações contínuas de maciços rochosos que possam traduzir os aportes de recarga em gradientes hidráulicos mais contundentes junto à margem direita do rio São Francisco.

Deste modo, configura-se nesta porção central da calha do rio São Francisco, um ambiente constituído por ampla planície aluvionar assentada sobre material carbonático, cujo comportamento hidrogeológico, em vista dos fatores abaixo descritos, podem significar a existência de um regime sazonal alternativo de influência e efluência entre o rio São Francisco e o aquífero cárstico.

Provavelmente, os regimes em questão devem implicar na alternância sazonal das direções de fluxos subterrâneos que, a depender das cargas hidráulicas impostas durante os períodos de maior pluviosidade nas cabeceiras do SF e, a relativa menor



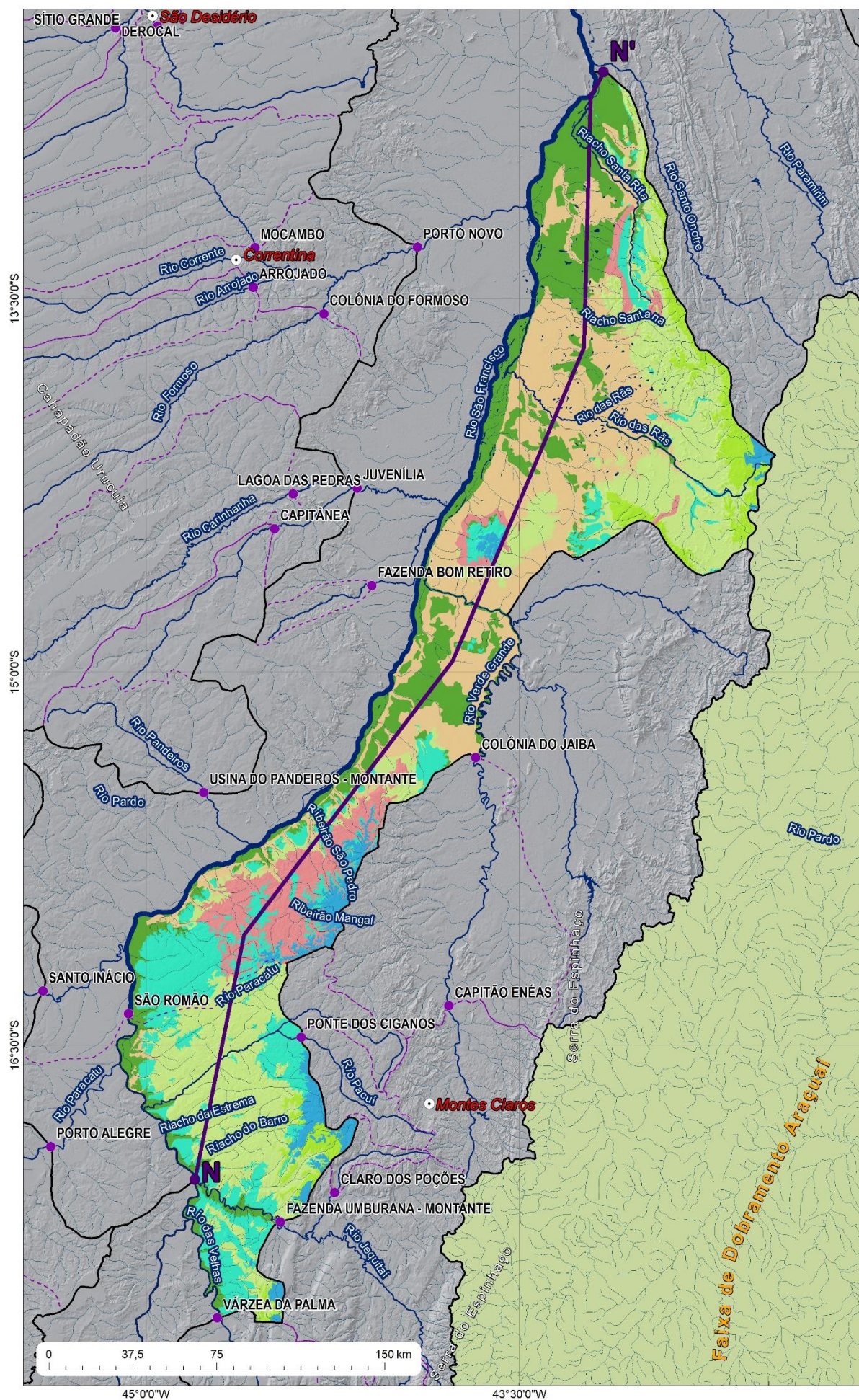
incidência de chuvas nessa porção norte do estado de Minas e do sul da Bahia, propiciam nos referidos trechos de sua planície aluvial que uma parte dos volumes sejam transferidos para o interior dos sistemas cársticos. Assim, parte dos volumes superficiais, sazonalmente, alimentam o aquífero em períodos de cheia, sendo que em outros momentos, na medida em que o aquífero cárstico recebe maiores aportes de recarga, há gradiente hidráulico suficiente para que o aquífero então alimente as descargas de base do rio São Francisco.

Os fatores mais importantes existentes neste setor central que abrange grande parte das UGAs Margem Direita e Margem Esquerda do rio SF são:

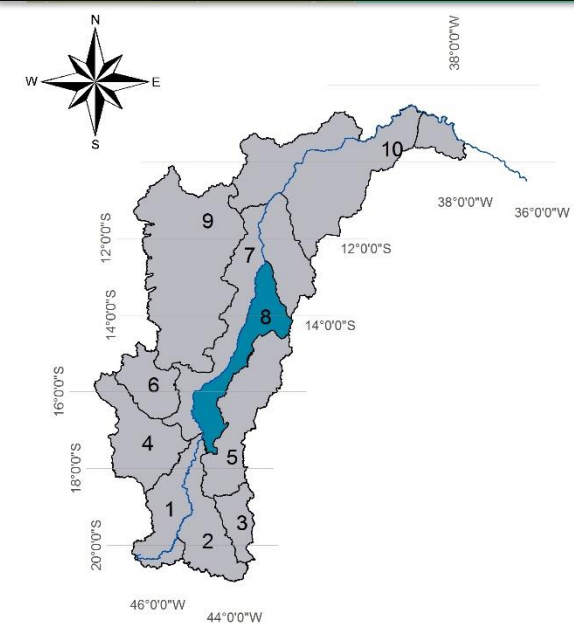
- Uma extensa planície fluvial contendo o eixo de uma potente drenagem regional, apoiada por sobre rochas carbonáticas;
- Presença de gradientes hidráulicos extremamente baixos ou nulos por grandes extensões;
- Drenagens regionais afluentes (margem direita) à calha principal sob regime fluvio-cárstico em cotas próximas a do curso principal;
- Elevadas cargas hidráulicas proporcionadas pelos sistemas porosos vinculados aos sedimentos Urucuia (margem esquerda) mantendo descargas elevadas junto ao nível de base representado pela calha do rio SF e, possivelmente, junto às porções continuadas dos sistemas aquíferos cársticos já na margem direita;
- Níveis d'água rasos dos aquíferos cársticos conformando um grande sistema livre e em comunicação potencial direta dos fluxos hídricos subterrâneos com os caudais mantidos ao longo do talvegue da calha central do SF.

O mapa da Figura 4.16 mostra que as áreas de melhor recarga na UGA 8 – Margem esquerda correspondem as áreas formadas por calcários expostos e zonas onde esses estão cobertos por sedimentos arenosos colúvio-aluvionar. Em menor área estão os arenitos do Grupo Urucuia, que também apresentam bom potencial de recarga. Importante lembrar que para norte da UGA – Margem Direita as recargas tendem a diminuir em função do índice pluviométrico reduzido caracterizando condições de déficit hídrico em grande parte do ano.

UGA Margem Direita - - Zonas de recarga e descarga



Mapas de localização



Legendas

- Sedes municipais
  - Estações fluviométricas
  - Linha seção
  - Zonas de descarga local
  - Zonas de descarga intermediária
  - Zonas de descarga regional
  - Limite UGA
  - Limite sub-bacias
- Zonas de recarga**
- ZFD - ZONAS DE FLUXO DESPREZÍVEL
  - ZRR - ZONAS DE RECARGA RESTRITA
  - ZRD - ZONAS DE RECARGA DISCRETA
  - ZRM<sub>e</sub> - ZONAS DE RECARGA MEDIANA
  - ZRM<sub>o</sub> - ZONAS DE RECARGA MODERADA
  - ZRE - ZONAS DE RECARGA ELEVADA
  - ZRO - ZONAS DE RECARGA OTIMA

Perfil topográfico esquemático representativo UGA Margem Direita

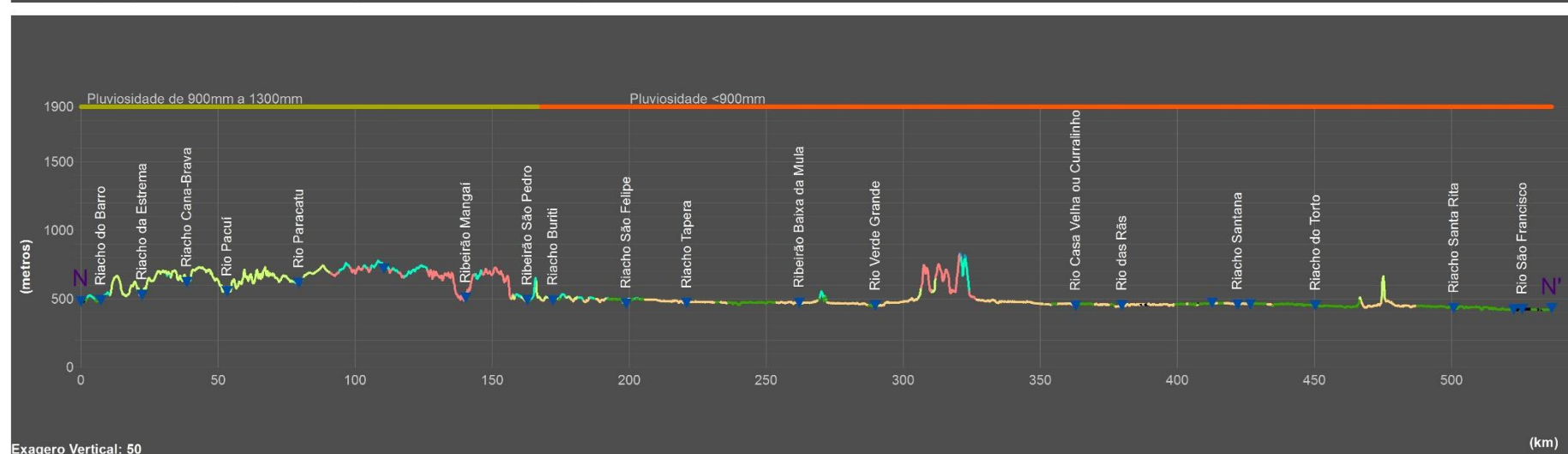


Figura 3.16 - UGA 8 – Margem Direita

### 3.9 UGA 9 – Chapadão Urucuia

A UGA 9 (Figuras 3.17 e 3.18) estende-se ao longo de uma área de aproximadamente 120.450 km<sup>2</sup>. Do ponto de vista litológico, esse domínio é compreendido por rochas areníticas do Grupo Urucuia, cuja distribuição denota uma ampla ocorrência em praticamente todas as bacias que estão compreendidas ao longo do sistema aquífero Urucuia (SAU). Essa porção do oeste baiano constitui um chapadão extenso e está situada em cotas altimétricas que variam, ao longo das cabeceiras das principais drenagens, em torno de 900 e 1000 m de altitude em relação ao nível médio do mar.

Na UGA 9 foram selecionadas para cálculo do balanço hídrico 17 estações, cujos valores de descarga subterrânea específica são: Lagoa das Pedras (7.91 L/s/km<sup>2</sup>), Colônia do Formoso (6.37 L/s/km<sup>2</sup>), Arrojado (8.34 L/s/km<sup>2</sup>), Mocambo (3,40 L/s/km<sup>2</sup>), Sitio Grande (4.69 L/s/km<sup>2</sup>), Derocal (5.83 L/s/km<sup>2</sup>), Fazenda Redenção (6.78 L/s/km<sup>2</sup>), Nova Vida Montante (5.09 L/s/km<sup>2</sup>), São Sebastião (4.17 L/s/km<sup>2</sup>), Taguá (2.17 L/s/km<sup>2</sup>), Barreiras (4.25 L/s/km<sup>2</sup>), Fazenda Porto Limpo (3.37 L/s/km<sup>2</sup>), Boqueirão (4.09 L/s/km<sup>2</sup>), Fazenda Coqueiro (0.59 L/s/km<sup>2</sup>), Capitânea (3,22 L/s/km<sup>2</sup>), Porto Novo (5.21 L/s/km<sup>2</sup>) e Usina do Pandeiros Montante (4,05 L/s/km<sup>2</sup>). O menor valor da descarga subterrânea específica média corresponde a 0,59 L/s.km<sup>2</sup> na bacia da estação Fazenda Coqueiro, e o maior valor igual a 8,34 L/s.km<sup>2</sup>, na bacia da estação Arrojado. As bacias estão constituídas, em média, por 86,5% de rochas areníticas.

A bacia de menor dimensão foi delimitada pela estação fluviométrica Capitânea (2.488,90 km<sup>2</sup>), enquanto a de maior área foi definida por Boqueirão (46.884,70 km<sup>2</sup>). Situada numa porção cuja pluviosidade média estende-se de 900 mm a 1.300 mm, a UGA 9 apresenta seus maiores valores médios de pluviosidade nas bacias Nova Vida Montante e Fazenda Coqueiro (1.200 mm e 1.172 mm, respectivamente), enquanto os menores são verificados em Porto Novo e Fazenda Redenção (950 mm e 992 mm, respectivamente).

No que se refere à vazão total mensurada pelos hidrogramas em cada posto fluviométrico desta UGA, nota-se uma grande variação, sendo o menor valor registrado igual a 6,44 m<sup>3</sup>/s (Fazenda Coqueiro) e o maior equivalente a 265,07 m<sup>3</sup>/s (Boqueirão). O valor médio da vazão total foi de 90,53 m<sup>3</sup>/s e a mediana 58,86 m<sup>3</sup>/s. Já a vazão total específica alcançou valores entre 1,01 l/s.km<sup>2</sup> (Fazenda Coqueiro) e 10,78 l/s.km<sup>2</sup>

(Lagoa das Pedras), com média e mediana calculadas para o conjunto iguais a 6,39 l/s.km<sup>2</sup> e 6,30 l/s.km<sup>2</sup>, respectivamente.

Os valores mínimo e máximo da vazão do escoamento superficial variaram de 2,70 m<sup>3</sup>/s (Fazenda Coqueiro) a 73,40 m<sup>3</sup>/s (Boqueirão), com a média das estações iguais a 23,90 m<sup>3</sup>/s e mediana de 14,50 m<sup>3</sup>/s. Tendo como base a precipitação, os percentuais de escoamento superficial foram calculados entre 1,1% da chuva (Fazenda Coqueiro) e 8,6% (Fazenda Redenção), com média e mediana equivalentes a 5,0% e 4,9%, respectivamente. Setenta e seis das estações alcançaram percentual de escoamento superficial entre 4% e 6% da precipitação, tendo nas demais (24%) obtido taxas pouco mais elevadas, entre 6,7% e 8,6%.

A descarga subterrânea média nas bacias analisadas foi mínima na bacia Fazenda Coqueiro (3,74 m<sup>3</sup>/s) e máxima na bacia Boqueirão (191,69 m<sup>3</sup>/s), com valor médio de 66,59 m<sup>3</sup>/s e mediana de 47,13 m<sup>3</sup>/s. O escoamento subterrâneo representa no conjunto estudado entre 1,6% das chuvas (Fazenda Coqueiro) e 23,9% (Arrojado), com média igual a 13,6% e mediana a 12,2%. Aproximadamente 23% das estações obtiveram valores de escoamento subterrâneo inferiores a 10%, sendo as restantes com porcentagens um pouco maiores, que variaram de 12% a 23,9%.

A evapotranspiração é responsável por significativa parcela, variando de 69,1% (Lagoa das Pedras) a 97,3% (Fazenda Coqueiro) em relação ao total de precipitação, com média de 81,4% e mediana equivalente a 82,5%. Somente 12% das estações registraram percentuais abaixo de 70% da precipitação.

É possível perceber que o escoamento subterrâneo representa uma maior contribuição no que diz respeito ao escoamento total ao longo de todas as estações da UGA 9. Em relação ao balanço hídrico propriamente dito, nota-se a forte atuação da evapotranspiração, em detrimento dos escoamentos superficial e subterrâneo. Os hidrogramas utilizados para o cálculo das parcelas hídricas do balanço são apresentados no Anexo VIII.

Algumas das bacias estão compostas por mais de 90% de arenitos, sendo as que apresentam menor quantidade, totalizam em torno de 63% de arenitos. Desse modo, considerando-se que a chuva no Chapadão Urucuia se distribui de modo homogêneo

ao longo de seu relevo plano, e que os materiais constituintes são também bastante similares, seria de se esperar que os valores de descarga subterrânea específica média fossem equivalentes, o que não ocorre.

Diante dos resultados obtidos a partir das avaliações das descargas registradas nas 17 estações fluviométricas, nota-se que a descarga subterrânea específica média é de 4.68 L/s.km<sup>2</sup>. No entanto, conforme visto anteriormente, quando comparadas entre si, tais descargas mostram discrepâncias que podem ser explicadas de forma coerente perante a premissa de que o sistema está cedendo água para bacias vizinhas, como pôde ser constatado pela ocorrência de bacias com elevado valor de descarga específica na bacia do rio Paranã, situado no sopé do Chapadão Urucuia.

Em virtude de sua conformação estrutural, com a presença de um notável arranjo de drenagem em redes paralelas, entende-se que esse sistema é penetrativo em profundidade, comandando sobremaneira o comportamento dos processos de recarga e trânsito das águas infiltradas. Nesse contexto fica muito pertinente admitir-se que a drenança vertical possa se deslocar para os substratos de rochas que se situam em bacias vizinhas, como aquelas localizadas no sopé do Chapadão do Urucuia, junto a base da serra Geral de Goiás. De fato, quando analisadas com um pouco mais de detalhe, observa-se que as bacias conformadas nesses compartimentos de cabeceiras dos afluentes do Alto Tocantins apresentam descargas específicas muito elevadas, principalmente se confrontadas aos materiais que as constituem, em geral, rochas de baixo potencial hidrogeológico.

Tais observações corroboram a verificação da diferença entre bacia hidrográfica e hidrogeológica no Chapadão Urucuia e a existência de um divisor hidrogeológico que permite a descarga do Sistema Aquífero Urucuia para afluentes do rio Tocantins, tal como descreve ANA (2017).

Deve ser ressaltado ainda que a base do substrato arenítico do Chapadão Urucuia pode ser revestida de rocha calcária, como se observa na região de São Desidério a leste e na região de São Domingos de Goiás, a oeste do mesmo.

Ponderando-se que os valores encontrados abaixo da média geral de 4.68 L/s.km<sup>2</sup> estejam sendo derivados para outras bacias, verifica-se que em 8 bacias podem ser

verificadas perdas que variam de forma muito significativas (ex. Fazenda Coqueiro e Mocambo) a pouco expressivas (ex. Sítio Grande e Barreiras). Contudo, como foram constatados valores de descarga específica bem mais elevados do que a média e, que, de certo modo, estes valores de fato devem corresponder à realidade (visto tratar-se de ambientes com homogeneidade comprovada sob vários aspectos), entende-se que se balizados sob o valor encontrado para o rio Arrojado, cujo percentual de arenitos Urucuia é de mais de 95% da bacia, todas as bacias estariam cedendo água para as vizinhanças.

Entretanto, é prudente assumir que essas avaliações devem ser criteriosamente procedidas, de modo a comparar apenas aquelas que se encontram mensuradas para as estações fluviométricas situadas primariamente desde as cabeceiras, de modo a não se incorrer em diluições incrementais oriundas de análises de dados das estações situadas a jusante de uma estação já analisada em uma mesma bacia.

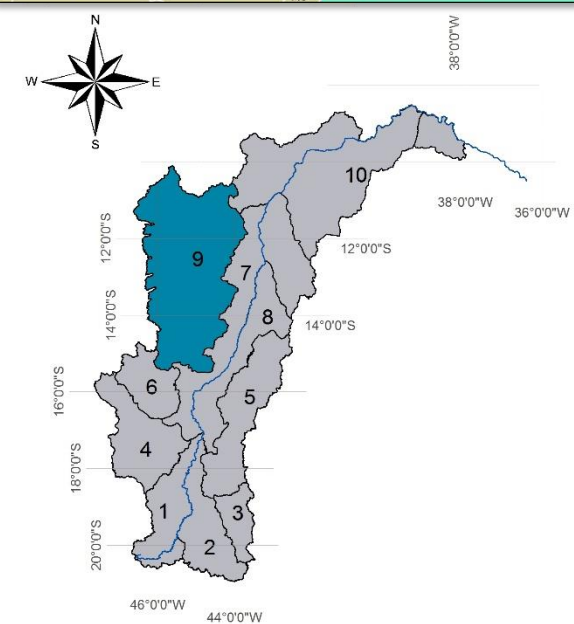
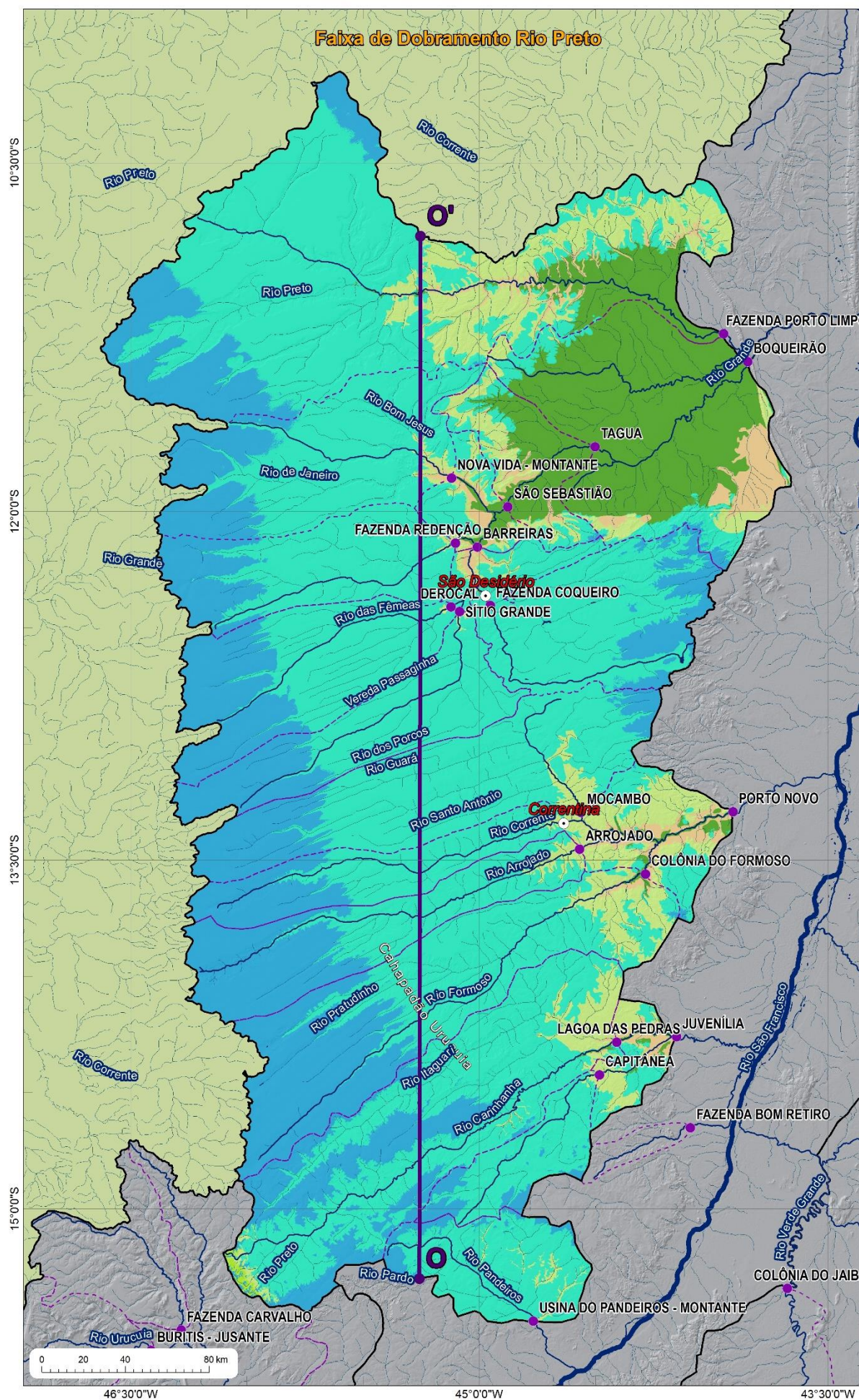
Assim, as estações que podem servir ao propósito de tais comparações seriam: Lagoa das Pedras, Colônia do Formoso, Arrojado, Mocambo, Sítio Grande, Derocal, Fazenda Redenção, Nova Vida Montante e Fazenda Porto Limpo. No caso de Fazenda Coqueiro, cabe ser retirada do comparativo, pois se situa em zona hidrogeológica diferenciada, onde os carbonatos encontram-se subaflorescentes provavelmente recebendo água dos arenitos subjacentes, e cuja espessura dos arenitos é bem inferior à das demais bacias que drenam de oeste para leste. Assim, a média de descarga específica se eleva para 5,67 L/s.km<sup>2</sup>.

Neste caso, pode-se assumir que qualquer diferença entre valores inferiores ao valor máximo obtido na bacia de contribuição estabelecida pela estação do rio Arrojado, pode estar relacionada proporcionalmente às perdas do sistema para outros domínios, sendo que essas perdas podem ser contabilizadas como transposição natural entre bacias do mesmo sistema ou de sistemas contíguos, como no caso dos carbonatos existentes nas cabeceiras do rio Paranã, afluente do Alto Tocantins.

Como mencionado anteriormente, se faz premente o cômputo das recargas totais que devem ser admitidas para o Chapadão Urucuia, as quais só podem ser consideradas quando embutidos os valores das descargas materializadas pelos exutórios da borda oeste da Serra Geral de Goiás. Entende-se claramente, que os cálculos apresentados até o momento, encontram-se subestimados.

UGA Chapadão Urucuia - Zonas de recarga e descarga

Mapas de localização



Legendas

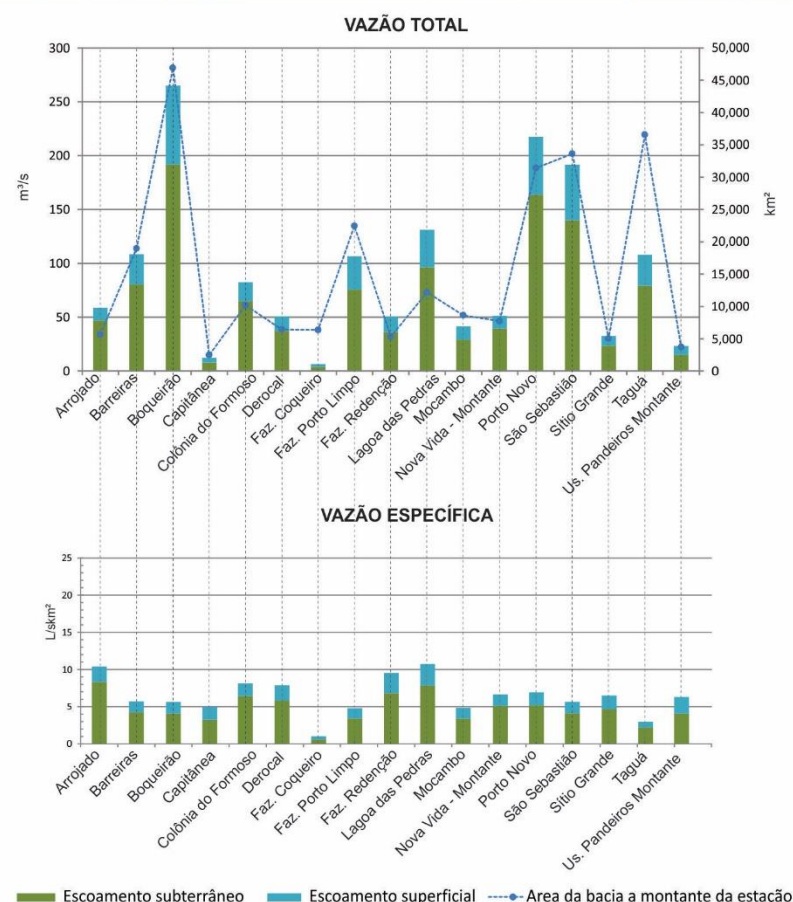
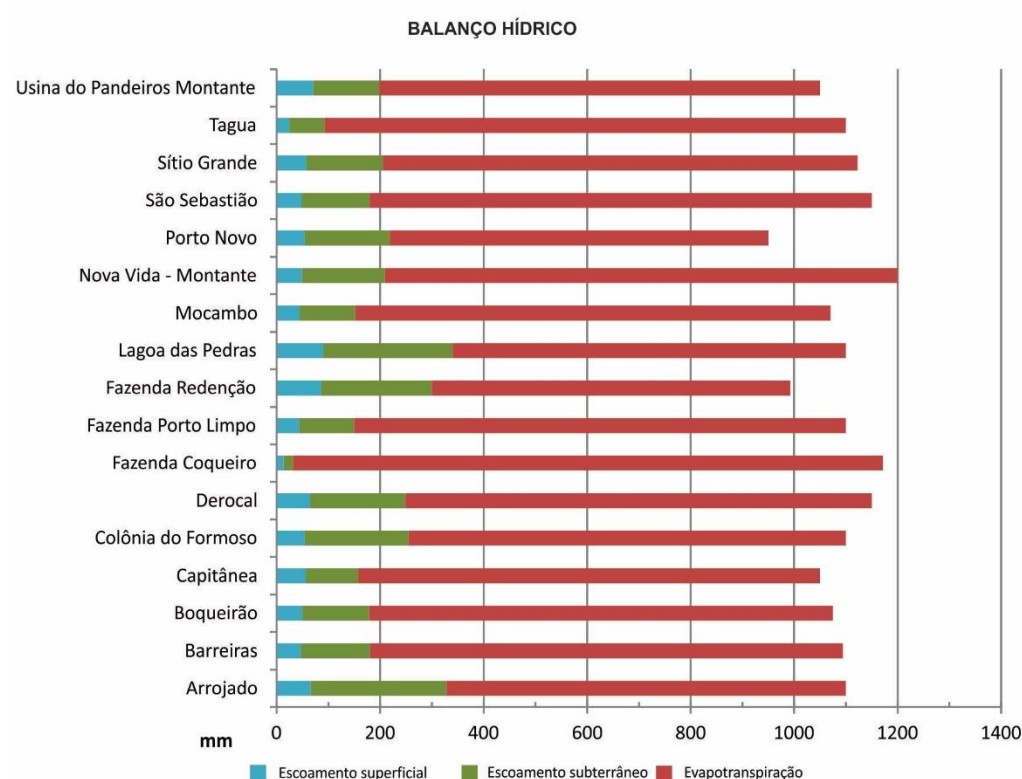
- Sedes municipais
  - Estações fluviométricas
  - Linha seção
  - Zonas de descarga local
  - Zonas de descarga intermediária
  - Zonas de descarga regional
  - Limite UGA
  - Limite sub-bacias
- Zonas de recarga**
- ZFD - ZONAS DE FLUXO DESPREZÍVEL
  - ZRR - ZONAS DE RECARGA RESTRITA
  - ZRD - ZONAS DE RECARGA DISCRETA
  - ZRMe - ZONAS DE RECARGA MEDIANA
  - ZRMo - ZONAS DE RECARGA MODERADA
  - ZRE - ZONAS DE RECARGA ELEVADA
  - ZRO - ZONAS DE RECARGA ÓTIMA

Perfil topográfico esquemático representativo UGA Chapadão Urucuia



Figura 3.17 - UGA 9 – Chapadão Urucuia

UGA 9 - Chapadão Urucuia		Área da bacia a montante da estação	Precipitação média anual	Escoamento total na estação		Escoamento superficial				Escoamento subterrâneo				Evapotranspiração	
				vazão	vazão específica	vazão	vazão específica	valor ponderado pela precipitação	vazão	vazão específica	valor ponderado pela precipitação	valor ponderado pela precipitação	valor ponderado pela precipitação		
Estação Fluviométrica	Curso d'água	km <sup>2</sup>	mm	m <sup>3</sup> /s	l/s.km <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s	l/s.km <sup>2</sup>	%	mm	m <sup>3</sup> /s	l/s.km <sup>2</sup>	%	mm	%	mm
Arrojado	Rio Arrojado	5,650.2	1100.0	58.86	10.42	11.7	2.1	6.0	65.5	47.13	8.34	23.9	263.0	70.1	771.5
Barreiras	Rio Grande	18,959.6	1094.3	108.51	5.72	27.9	1.5	4.2	46.5	80.57	4.25	12.2	134.0	83.5	913.8
Boqueirão	Rio Grande	46,884.7	1075.0	265.07	5.65	73.4	1.6	4.6	49.4	191.69	4.09	12.0	128.9	83.4	896.7
Capitânea	Rio Coxá	2,488.9	1050.0	12.42	4.99	4.4	1.8	5.3	55.8	8.02	3.22	9.7	101.6	85.0	892.6
Colônia do Formoso	Rio Formoso	10,200.7	1100.0	82.48	8.09	17.5	1.7	4.9	54.0	65.03	6.37	18.3	201.0	76.8	845.0
Derocal	Rio das Fêmeas	6,430.7	1150.0	50.73	7.89	13.3	2.1	5.6	65.0	37.49	5.83	16.0	183.8	78.4	901.2
Fazenda Coqueiro	Rio São Desidério	6,360.7	1172.0	6.44	1.01	2.7	0.4	1.1	13.4	3.74	0.59	1.6	18.5	97.3	1140.0
Fazenda Porto Limpo	Rio Preto	22,459.0	1100.0	106.63	4.75	31.0	1.4	4.0	43.5	75.65	3.37	9.7	106.2	86.4	950.3
Fazenda Redenção	Rio de Ondas	5,322.2	992.4	50.59	9.51	14.5	2.7	8.6	85.8	36.11	6.78	21.6	214.0	69.8	692.6
Lagoa das Pedras	Rio Caririnha	12,173.0	1100.0	131.22	10.78	34.9	2.9	8.2	90.4	96.34	7.91	22.7	249.6	69.1	760.1
Mocambo	Rio Guará	8,625	1070.0	41.61	4.82	12.3	1.4	4.2	45.1	29.28	3.40	10.0	107.1	85.8	917.9
Nova Vida - Montante	Rio Branco	7,743.6	1200.0	51.43	6.64	12.0	1.6	4.1	48.9	39.42	5.09	13.4	160.5	82.5	990.5
Porto Novo	Rio Corrente	31,409.6	950.0	217.53	6.93	54.0	1.7	5.7	54.2	163.58	5.21	17.3	164.2	77.0	731.6
São Sebastião	Rio Grande	33,614.6	1150.0	191.52	5.70	51.4	1.5	4.2	48.2	140.13	4.17	11.4	131.5	84.4	970.3
Sítio Grande	Rio Grande	5,012.8	1122.7	32.65	6.51	9.2	1.8	5.1	57.6	23.50	4.69	13.2	147.8	81.7	917.2
Tagua	Rio Grande	36,564.9	1100.0	107.95	2.95	28.6	0.8	2.2	24.6	79.37	2.17	6.2	68.5	91.5	1006.9
Usina do Pandeiros Montante	Rio Pandeiros	3,718.6	1050.0	23.41	6.30	8.4	2.2	6.7	70.8	15.06	4.05	12.2	127.7	81.1	851.4
média		15,507.0	1092.7	90.53	6.39	23.9	1.7	5.0	54.0	66.59	4.68	13.6	147.5	81.4	891.2
máximo		46,884.7	1200.0	265.07	10.78	73.4	2.9	8.6	90.4	191.69	8.34	23.9	263.0	97.3	1140.0
mínimo		2,488.9	950.0	6.44	1.01	2.7	0.4	1.1	13.4	3.74	0.59	1.6	18.5	69.1	692.6
mediana		8,624.8	1100.0	58.86	6.30	14.5	1.7	4.9	54.0	47.13	4.25	12.2	134.0	82.5	901.2



Estação	Litologias principais na bacia a montante da estação	vazão subterrânea específica mínima (l/s.km <sup>2</sup> )	Subdomínio geológico
Fazenda Coqueiro	Urucuia (89.3%), São Desidério (7.72%), Depósitos aluvionares (2.73%)	0.59	III E
Tagua	Urucuia (84.50%), Coberturas detrítico-lateríticas ferruginosas (4.58%), Depósitos aluvionares (4.03%)	2.17	III C
Mocambo	Urucuia (91.83%), Depósitos aluvionares (4.15%), Sete Lagoas fácies 1 (2.26%)	2.34	III C
Capitânea	Urucuia (49.08%), Coberturas detrítico-lateríticas com concreções ferruginosas (44.58%), Depósitos aluvionares (4.04%)	3.22	III E
Fazenda Porto Limpo	Urucuia (63.30%), Coberturas detrítico-lateríticas ferruginosas (14.19%), Rio Preto (10.38%)	3.37	III C
Boqueirão	Urucuia (66.37%), Coberturas detrítico-lateríticas ferruginosas (20.49%), Depósitos aluvionares (3.77%)	4.09	III C
São Sebastião	Urucuia (90.65%), Depósitos aluvionares (4.00%), Riachão das Neves (1.71%)	4.17	III C
Barreiras	Urucuia (91.19%), Depósitos aluvionares (4.23%), São Desidério (3.16%)	4.25	III C
Usina do Pandeiros Montante	Urucuia (72.22%), Coberturas detrítico-lateríticas com concreções ferruginosas (17.19%), Depósitos aluvionares (6.02%)	4.31	III E
Sítio Grande	Urucuia (95.17%), Depósitos aluvionares (4.35%), São Desidério (0.48%)	4.69	III C
Nova Vida Montante	Urucuia (94.50%), Depósitos aluvionares (2.52%), Serra da Mamona (1.82%)	5.09	III C
Porto Novo	Urucuia (82.94%), Sete Lagoas fácies 1 (6.10%), Depósitos aluvionares (3.60%)	5.21	III E
Derocal	Urucuia (93.37%), Depósitos aluvionares (6.37%), São Desidério (0.26%)	5.83	III C
Colônia do Formoso	Urucuia (84.97%), Sete Lagoas fácies 1 (7.32%), Depósitos aluvionares (4.23%)	6.37	III E
Fazenda Redenção	Urucuia (95.21%), Depósitos aluvionares (4.23%), Riachão das Neves (0.56%)	6.78	III C
Lagoa das Pedras	Urucuia (78.62%), Coberturas detrítico-lateríticas com concreções ferruginosas (6.45%), Sete Lagoas fácies 1 (6.02%)	7.91	III C
Arrojado	Urucuia (95.08%), Correntina (3.65%), Depósitos aluvionares (0.70%)	8.34	III C

Figura 3.18 - Dados do balanço hídrico e principais litologias nas estações localizadas dentro da UGA 9 – Chapadão Urucuia



### 3.10 UGA 10 – Irecê

A porção centro-norte do estado da Bahia, logo ao sul do reservatório de Sobradinho, encerra um conjunto de terrenos constituídos por rochas carbonáticas do Grupo Una, Formações Salitre, e a Formação Caatinga, em pequena parte entremeadas por rochas areníticas da Formação Morro do Chapéu. Estes terrenos constituem um relevo suave, plano a ondulado ao longo de todas as exposições carbonáticas e pelíticas, com elevações coincidentes às morrarias e serras areníticas circunvizinhas da Formação Morro do Chapéu.

Região de clima quente e de precipitações baixas, há naturalmente a ocorrência de déficits hídricos frequentes ano a ano, promovendo a escassez do recurso hídrico em superfície e baixa contribuições subterrâneas sazonais, implicando na configuração de um cenário de criticidade em relação ao aproveitamento do recurso para diversos fins.

A UGA 10 - Irecê tem área de 70.235,81 km<sup>2</sup>. Engloba três bacias selecionadas para o estudo do balanço hídrico, delimitadas pelas estações fluviométricas Rio Verde II, Jaguaraci e Abreus, cujas áreas são de 7.008,20 km<sup>2</sup>, 9.446,70 km<sup>2</sup> e 12.091 km<sup>2</sup>, respectivamente (Figuras 4.19 e 4.20). Os rios Verde e Jacaré são os principais cursos d'água regionais, e têm suas cabeceiras no extremo sul da referida região, em cotas que variam em torno de 1.150 a 1.200 de altitude.

Localizada numa porção marcada pelos baixos índices de pluviosidade, as bacias Abreus e Jaguaraci apresentam também baixos valores de descarga subterrânea específica média, sendo as bacias com os menores valores, mesmo quando comparadas a todas as bacias avaliadas dentro da bacia do rio São Francisco.

Os hidrogramas avaliados nas três estações da UGA 10 apresentaram vazões totais iguais a 0,77 m<sup>3</sup>/s (Abreus), 0,67 m<sup>3</sup>/s (Jaguaraci) e 2,55m<sup>3</sup>/s (Rio Verde II). A vazão total específica foi calculada em 0,06 L/s.km<sup>2</sup> na bacia da estação de Pacuí, 0,07 l/s.km<sup>2</sup> na bacia da estação Jaguaraci e 0,36 l/s.km<sup>2</sup> para a bacia da estação rio Verde.

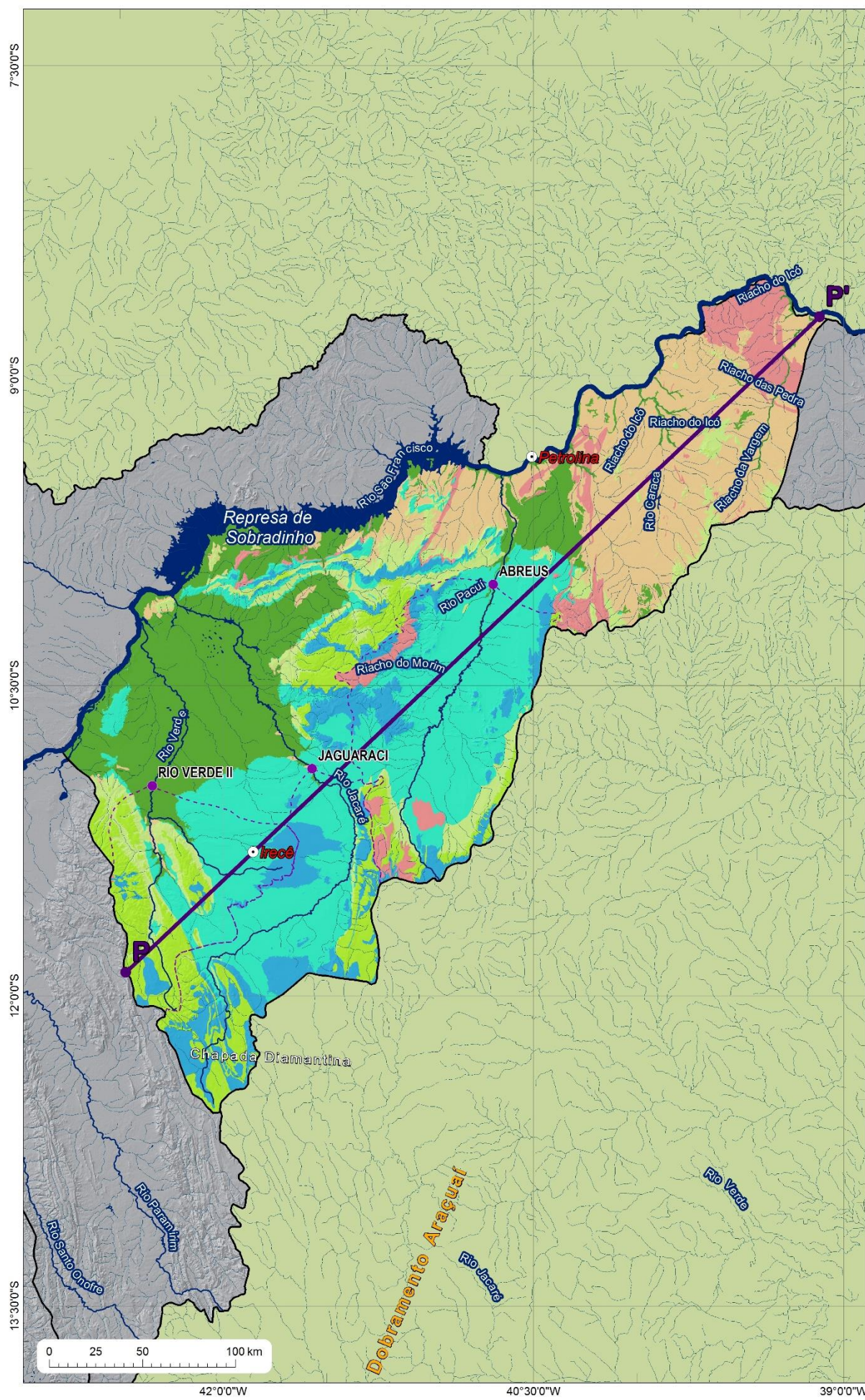
A vazão do escoamento superficial foi calculada em 0,31 m<sup>3</sup>/s, 0,36 m<sup>3</sup>/s e 1,83 m<sup>3</sup>/s, para as bacias de Abreus, Jaguaraci e Rio Verde II, e a descarga subterrânea média, para as mesmas bacias, calculado em 0,46 m<sup>3</sup>/s, 0,31 m<sup>3</sup>/s, e 0,72 m<sup>3</sup>/s, respectivamente.

Com porcentagens pífias de escoamentos superficial e subterrâneo em relação aos valores de chuva - entre 0,2% (Abreus) e 1,3% (Rio Verde II) para o primeiro parâmetro e 0,2% (Jaguaraci) a 0,5% (Rio Verde II) para o segundo- é notável o papel da evapotranspiração. Tal parcela responde por quase a totalidade da pluviosidade nas três bacias que compõem esta UGA, alcançando 98,2% em Rio Verde II, 99,5% em Jaguaraci e 99,6% em Abreus. Os hidrogramas utilizados para o cálculo das parcelas hídricas do balanço são apresentados no Anexo IX.

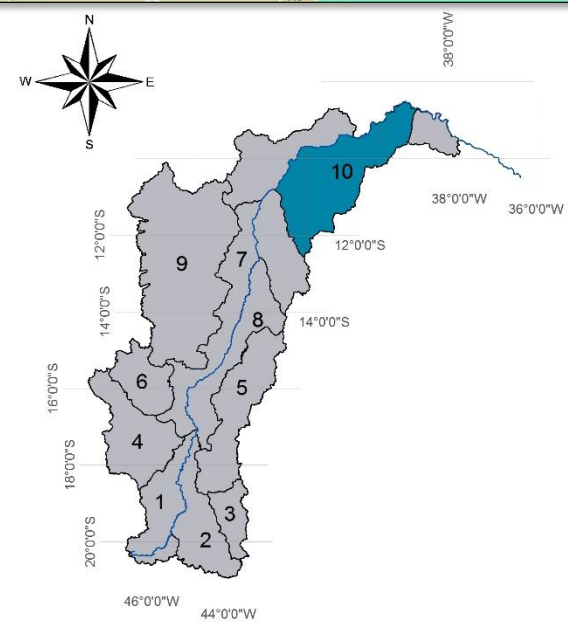
Na UGA Irecê, as zonas de recarga mais elevadas são aquelas que correspondem aos calcários da Formação Salitre (Grupo Una) que ocupam as cabeceiras dos rios Verde e Jacaré e grande parte da bacia do rio Salitre. Além dessas, destacam-se ainda as rochas pertencentes às formações Morro do Chapéu e Tombador (Grupo Chapada Diamantina), a Formação Caatinga, e coberturas detrítico-lateríticas que ocupam terrenos de cotas elevadas.

Entretanto, é importante ressaltar, que conforme mostram os dados do balanço hídrico, dadas as condições climáticas de elevada evapotranspiração e índices pluviométricos reduzidos, a recarga efetiva é muito baixa, e deve ocorrer apenas em alguns poucos períodos do ano quando existem chuvas concentradas e abundantes. Estudos de maior detalhe devem ser realizados ao longo das bacias dos rios Verde, Jacaré e Salitre para computar esses valores e avaliar também a recarga em anos atípicos, quando existem chuvas bem mais elevadas que as médias históricas utilizadas para os cálculos do balanço hídrico nesse estudo.

UGA Irecê - Zonas de recarga e descarga



Mapas de localização



Legendas

- Sedes municipais
  - Estações fluviométricas
  - Linha seção
  - Zonas de descarga local
  - Zonas de descarga intermediária
  - Zonas de descarga regional
  - Limite UGA
  - Limite sub-bacias
- Zonas de recarga**
- ZFD - ZONAS DE FLUXO DESPREZÍVEL
  - ZRR - ZONAS DE RECARGA RESTRITA
  - ZRD - ZONAS DE RECARGA DISCRETA
  - ZRM<sub>e</sub> - ZONAS DE RECARGA MEDIANA
  - ZRM<sub>o</sub> - ZONAS DE RECARGA MODERADA
  - ZRE - ZONAS DE RECARGA ELEVADA
  - ZRO - ZONAS DE RECARGA OTIMA

Perfil topográfico esquemático representativo UGA Irecê

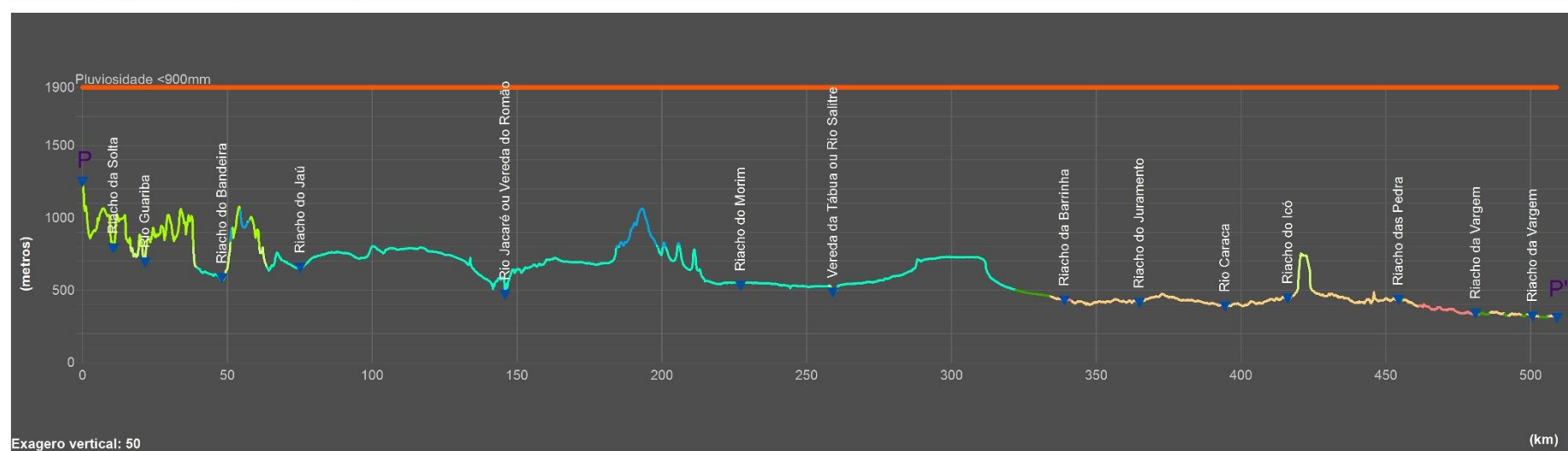
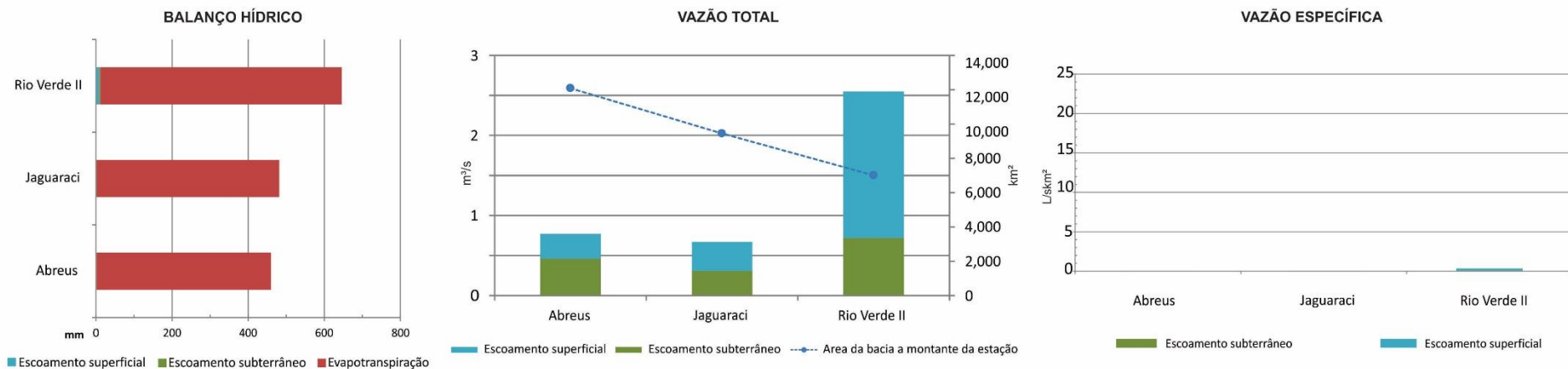


Figura 3.19 - UGA 10 – Irecê

UGA 10 - Irecê		Área da bacia a montante da estação	Precipitação média anual	Escoamento total na estação		Escoamento superficial				Escoamento subterrâneo				Evapotranspiração	
				vazão	vazão específica	vazão	vazão específica	valor ponderado pela precipitação		vazão	vazão específica	valor ponderado pela precipitação		valor ponderado pela precipitação	
Estação Fluviométrica	Curso d'água	km <sup>2</sup>	mm	m <sup>3</sup> /s	l/s.km <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s	l/s.km <sup>2</sup>	%	mm	m <sup>3</sup> /s	l/s.km <sup>2</sup>	%	mm	%	mm
Abreus	Rio Pacuí	12,091.0	460.0	0.77	0.06	0.31	0.03	0.2	0.8	0.46	0.04	0.3	1.2	99.6	458.0
Jaguaraci	Rio Jacaré ou Verde	9,446.7	481.7	0.67	0.07	0.36	0.04	0.3	1.2	0.31	0.03	0.2	1.0	99.5	479.4
Rio Verde II	Rio Verde	7,008.2	646.1	2.55	0.36	1.83	0.26	1.3	8.2	0.72	0.10	0.5	3.3	98.2	634.6
média		9,515.3	529.3	1.33	0.16	0.83	0.11	0.6	3.4	0.50	0.06	0.3	1.8	99.1	524.0
máximo		12,091.0	646.1	2.55	0.36	1.83	0.26	1.3	8.2	0.72	0.10	0.5	3.3	99.6	634.6
mínimo		7,008.2	460.0	0.67	0.06	0.31	0.03	0.2	0.8	0.31	0.03	0.2	1.0	98.2	458.0
mediana		9,446.7	481.7	0.77	0.07	0.36	0.04	0.3	1.2	0.46	0.04	0.3	1.2	99.5	479.4



Estação	Litologias principais na bacia a montante da estação	vazão subterrânea específica (L/s.km <sup>2</sup> )	Subdomínio geológico
Rio Verde II	Morro do Chapéu Indivisa (16.70%), Nova América (16.70%), Jussara Médio e Inferior (10.25%)	0.10	VI B
Jaguaraci	Gabriel (18.37%), Nova América (12.33%), Jussara Superior (9.98%)	0.03	VI B
Abreus	Caatinga (17.29%), Nova América (15.80%), Morro do Chapéu fácies 2 (12.22%)	0.04	VII

Figura 3.20 - Dados do balanço hídrico e principais litologias nas estações localizadas dentro da UGA 10- Irecê

#### **4. CONTRIBUIÇÃO SUBTERRÂNEA DOS CALCÁRIOS PARA OS RIOS – ANÁLISE DA DESCARGA SUBTERRÂNEA ESPECÍFICA**

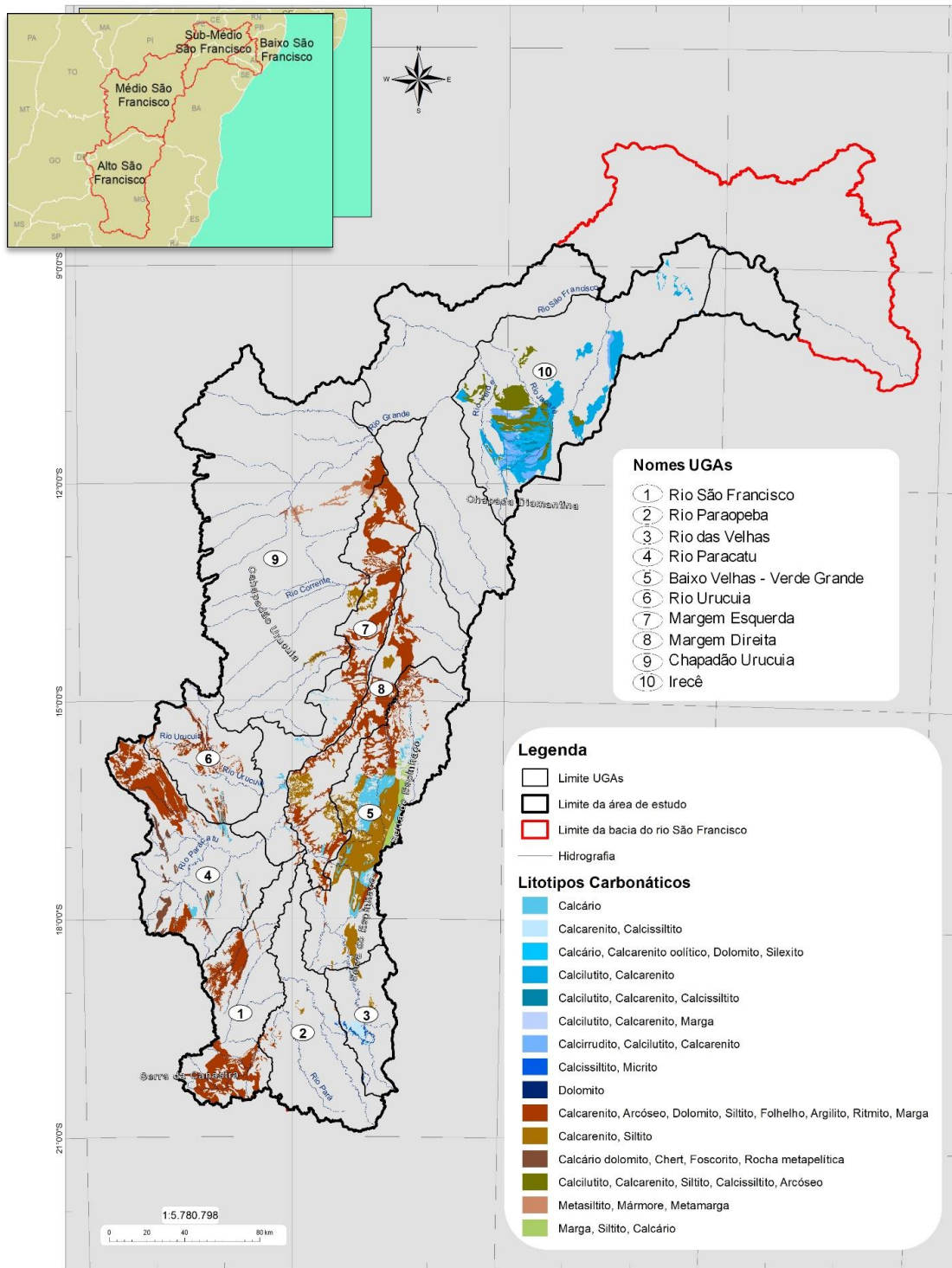
No Capítulo 4, acima, foram caracterizadas a UGAS em que se divide a área de estudo, e foi feito o balanço hídrico em cada uma delas. No presente capítulo se apresenta uma análise da recarga específica dos calcários, no âmbito das UGAS, por meio dos hidrogramas de dados médios nos postos fluviométricos selecionados e a calibração das porosidades efetivas para fluxo. Essa análise teve como objetivo estimar a contribuição subterrânea das áreas carbonáticas aflorantes em cada UGA. Vale ressaltar que os valores apresentados devem ser considerados como valores orientadores para novas estratégias de estudo bem como instrumento de comparação com valores alcançados por outras metodologias, dada a complexidade dos sistemas carbonáticos.

A partir do banco de dados criado, foram selecionadas em uma planilha todas as áreas mapeadas como calcários, dolomitos e mármore, posicionadas dentro das sub-bacias escolhidas para os estudos hidrológicos (análise dos hidrogramas e balanço hídrico) e todas as áreas mapeadas que representam associações de rochas carbonáticas e pelíticas, com litotipos arenosos subordinados ou não.

Essa divisão tem como objetivo analisar separadamente os calcários que tendem a configurar sistemas aquíferos essencialmente cársticos, daqueles que tendem a desenvolver sistemas cárstico-fissurados menos expressivos como aquíferos.

A Figura 4.1 mostra as associações de rochas carbonáticas e rochas siliciclásticas subordinadas, aflorantes, registradas na base da CPRM – Brasil ao Milionésimo. A Tabela 4.1 indica as unidades estratigráficas as quais pertencem os conjuntos rochosos mapeados e as áreas de abrangência.

Não foram alvos da análise rochas carbonáticas em associações vulcano-sedimentares ou subordinadas a sequências de filitos ou xistos, sendo também descartadas as litologias que não são representadas dentro das bacias selecionadas para os estudos hidrológicos. De modo geral, as litologias estudadas representam coberturas sedimentares Neoproterozoicas (Grupo Bambuí e Una) e subordinadamente coberturas sedimentares Paleoproterozoicas (Grupo Itabira e Grupo Vazante – Tabela 4.1).



**Figura 4.1 - Distribuição de calcários que configuram aquíferos cársticos e fissuro-cársticos na bacia do rio São Francisco.**

**Tabela 4.1 - Litotipos carbonáticos presentes na área de estudo (Parte marrom da tabela incompleta, cárstico/fissuro-cárstico)**

	Litotipo carbonático	Classificação	Unidades estratigráficas	Área de abrangência (km²)	% em relação a área total da bacia do rio	
componentes dos aquíferos cársticos	Calcário	Rochas sedimentares e metassedimentares neoproterozóicas	Grupo Bambuí, Lagoa do Jacaré ou Sub-grupo Paraopeba (calcário)	4431,96	16.331,98	0,81
	Calcarenito, Calcissiltito	Rochas sedimentares e metassedimentares neoproterozóicas	Grupo Bambuí, Formação Sete Lagoas, membro Lagoa Santa	437,39		0,08
	Calcário, Calcarenito oolítico, Dolomito, Silexito	Rochas sedimentares e metassedimentares neoproterozóicas	Grupo Una, Formação Salitre, Membro Nova América - Subunidade Lapão	331,98		0,06
	Calcilutito, Calcarenito	Rochas sedimentares e metassedimentares neoproterozóicas	Grupo Una, Formação Salitre, membro Nova América e Gabriel e Acauã (unidade 1) e Juetê	8010,51		1,47
	Calcilutito, Calcarenito, Calcissiltito	Rochas sedimentares e metassedimentares neoproterozóicas	Grupo Una, Formação Salitre, membro Nova América - Subunidade Sarandi	240,08		0,04
	Calcilutito, Calcarenito, Marga	Rochas sedimentares e metassedimentares neoproterozóicas	Grupo Una, Formação Salitre, membro Irecê	228,50		0,04
	Calcirrudito, Calcilutito, Calcarenito	Rochas sedimentares e metassedimentares neoproterozóicas	Grupo Una, Formação Salitre, membro Jussara Superior	2329,95		0,43
	Calcissiltito, Micrito	Rochas sedimentares e metassedimentares neoproterozóicas	Grupo Bambuí, Formação Sete Lagoas, membro Pedro Leopoldo	259,73		0,05
	Dolomito	Rochas sedimentares e metassedimentares neoproterozóicas	Grupo Itabira, Formação Gandarela	61,88		0,01
componentes dos aquíferos cárstico-fissurais	Calcarenito, Arcóseo, Dolomito, Siltito, Folhelho, Argilito, Ritmito, Marga	Rochas sedimentares e metassedimentares neoproterozóicas	Grupo Bambuí, sub-grupo Paraopeba	35894,57	54.868,28	6,58
	Calcarenito, Siltito	Rochas sedimentares e metassedimentares neoproterozóicas	Grupo Bambuí, Formação Lagoa do Jacaré	11558,11		2,12
	Calcário dolomito, Chert, Foscorito, Rocha metapelítica	Rochas sedimentares e metassedimentares paleo a mesoproterozóicas	Grupo Vazante, Unidade b	1110,75		0,20
	Calcilutito, Calcarenito, Siltito, Calcissiltito, Arcóseo	Rochas sedimentares e metassedimentares neoproterozóicas e Rochas sedimentares e	Grupo Una, Formação Salitre, Membro Jussara Médio e Inferior; Grupo Vazante, Unidade b	4147,55		0,76
	Metasiltito, mármore, metamarga	Rochas sedimentares e metassedimentares neoproterozóicas	Grupo Bambuí, Formação São Desidério	1155,82		0,21
	Marga, siltito e calcário	Rochas sedimentares e metassedimentares neoproterozóicas	Grupo Bambuí, Formação Lagoa do Jacaré	1001,47		0,18
<b>TOTAL:</b>				<b>71.200,26</b>	<b>13,05</b>	

Conforme apresentado na Tabela 4.1, a área total das litologias analisadas, corresponde a 72.200 km<sup>2</sup>, aproximadamente 13% da área de estudo considerada dentro da bacia do rio São Francisco (545.453 km<sup>2</sup>).

Importante pontuar, que os 13% estudados correspondem às litologias carbonáticas aflorantes. Entretanto, um percentual muito maior é composto pelas mesmas litologias cobertas por sedimentos cenozoicos ou unidades cretáceas, mas em condições acima do nível de base do rio São Francisco, ou seja, em condições de contribuir para a vazão desse curso d'água. Entretanto nesse estudo, estão sendo analisadas apenas as litologias carbonáticas aflorantes.

A porosidade efetiva para fluxo representa em termos percentuais o volume da rocha capaz de permitir o fluxo da água armazenada, ou seja, o volume dos vazios interconectados que de fato é responsável pelo trânsito da água nos maciços. Esses valores foram atribuídos de acordo com informações da literatura e posteriormente calibrados em conjunto com as demais litologias presentes em cada uma das bacias selecionadas, de modo que todas as litologias na bacia alcançassem valores equilibrados de porosidade efetiva para fluxo, descarga subterrânea específica e recarga (ver item 2.8 e 2.9). Importante ressaltar, que a calibração leva em conta a interpretação das características da rocha que influem no seu potencial hidrogeológico, como composição mineralógica, textura, fraturamento e deformação e, não apenas as características de porosidade primária ou secundária das distintas litologias.

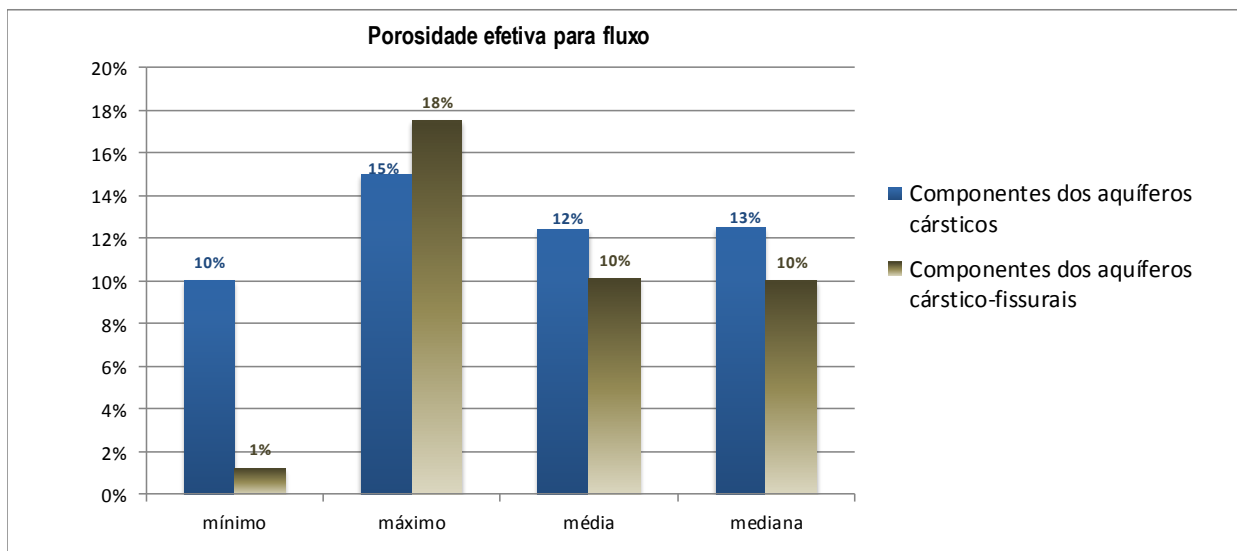
A Figura 4.2 mostra as porosidades efetivas para fluxo calibradas para os litotipos carbonáticos mapeados nas sub-bacias selecionadas para os estudos hidrológicos na bacia do rio São Francisco.



Componentes dos aquíferos cársticos	Porosidade Efetiva (Pe)						
	Pe1	Pe2	Pe3	Pe4	Pe5	Pe6	Pe7
Calcarenito, Calcissiltito	14,5%	15,0%					
Calcário	11,0%	12,5%	13,5%	14,5%	15,0%		
Calcário, Calcarenito oolítico, Dolomito, Silexito	13,5%						
Calcilutito, Calcarenito	11,5%	11,8%	12,5%				
Calcilutito, Calcarenito, Calcissiltito	11,0%						
Calcilutito, Calcarenito, Marga	11,0%						
Calcirrudito, Calcilutito, Calcarenito	11,5%	12,5%					
Calcissiltito, Micrito	10,0%	11,8%	13,5%				
Dolomito	10,0%	12,5%					
<b>mínimo</b>							<b>10,0%</b>
<b>máximo</b>							<b>15,0%</b>
<b>média</b>							<b>12,5%</b>
<b>mediana</b>							<b>12,5%</b>

Componentes dos aquíferos cárstico-fissurais	Porosidade Efetiva (Pe)						
	Pe1	Pe2	Pe3	Pe4	Pe5	Pe6	Pe7
Calcarenito, Arcóseo, Dolomito, Siltito, Folhelho, Argilito, Ritmito, Marga	5,50%	6,50%	7,00%	7,25%	7,50%	8,00%	8,50%
Calcarenito, Siltito	10,00%	11,00%	11,50%	11,80%	12,50%	13,50%	15,00%
Calcário dolomito, Chert, Foscorito, Rocha metapelítica	13,50%	17,00%	17,50%				
Calcilutito, Calcarenito, Siltito, Calcissiltito, Arcóseo	1,25%	14,50%					
Marga, Siltito, Calcário	6,00%						
Metasiltito, Mármore, Metamarga	7,25%	10,00%					
<b>mínimo</b>							<b>1,3%</b>
<b>máximo</b>							<b>17,5%</b>
<b>média</b>							<b>10,1%</b>
<b>mediana</b>							<b>10,0%</b>



**Figura 4.2 - Porosidade efetiva (Pe) calibrada para os litotipos carbonáticos na bacia do rio São Francisco**

Os litotipos componentes dos aquíferos cársticos, que representam basicamente calcários e dolomito “puros”, foram calibrados com valores entre 10% e 15%, com valores médio e mediana iguais a 12,5%. Nos litotipos componentes dos aquíferos cárstico-fissurais a variação é maior, sendo o valor mínimo calibrado de 1,3% e o valor máximo igual a 17,5%. O valor da média e da mediana foi de 10,1% e 10%, respectivamente. As variações da porosidade efetiva para fluxo nas litologias é fruto da calibração manual realizada para todos os litotipos dentro de cada sub-bacia, e, conforme dito acima, reflete o entendimento das variações do contexto hidrogeológico e estrutural nos quais as litologias estão submetidas.

Entretanto, situações anômalas podem ocorrer, conforme o caso dos litotipos “Calcário dolomito, Chert, Fosforito, Rocha metapelítica” mapeados nas estações Ponte da BR Paracatu, Porto da Extrema, Porto dos poções e Santa Rosa, que foram calibrados com valores iguais a 17 ou 17,5%, e abrangem os calcários da Formação Vazante-Unidade b.

Utilizando-se a descarga subterrânea calculada nas sub-bacias e a porosidade efetiva para fluxo calibrada caso a caso, foram calculados os valores de descarga subterrânea específica média para os litotipos. Desses valores, os litotipos carbonáticos foram selecionados e apresentaram para a descarga subterrânea específica uma variação de 0,05 L/s.km<sup>2</sup> a 19,47 L/s.km<sup>2</sup>, sendo 5,32 L/s.km<sup>2</sup> e 2,73 L/s.km<sup>2</sup> a média e a mediana, respectivamente (Figura 4.3).

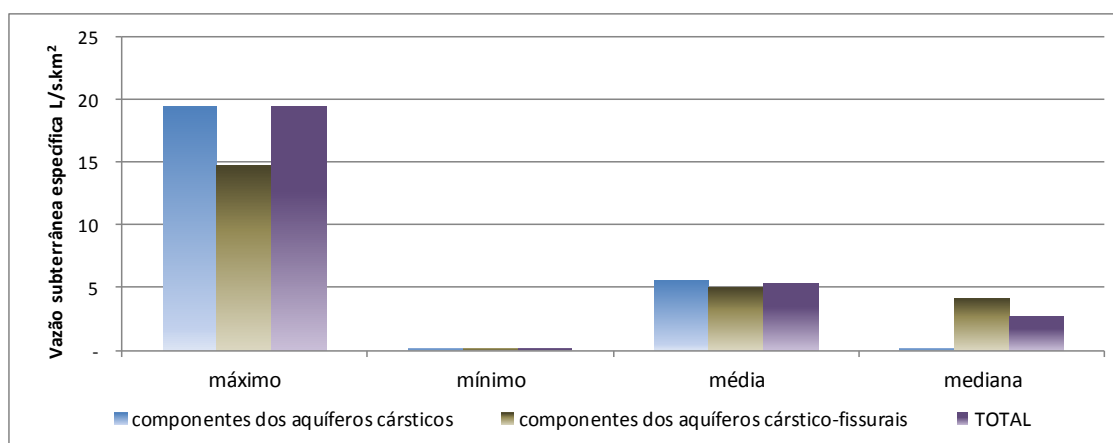
Entre os componentes dos aquíferos cársticos o valor mínimo da descarga subterrânea específica média é de 0,05 L/s.km<sup>2</sup>, o valor máximo é 19,47 L/s.km<sup>2</sup>, com valor médio de 5,56 L/s.km<sup>2</sup> e mediana igual a 0,10 L/s.km<sup>2</sup>.

Para os litotipos carbonáticos definidos como componentes dos aquíferos cárstico-fissurais os valores mínimo e máximo da descarga subterrânea específica correspondem a 0,06 L/s.km<sup>2</sup> e 14,66 L/s.km<sup>2</sup>, respectivamente, enquanto os valores centrais, média e mediana, 4,96 L/s.km<sup>2</sup> e 4,21 L/s.km<sup>2</sup>, respectivamente.

As grandes variações das vazões específicas nos litotipos carbonáticos nas sub-bacias estudadas, conforme mostra a Figura 4.4, acompanham as variações climáticas, principalmente os índices de precipitação e gradientes hidráulicos. Nas bacias

localizadas nas zonas de excedente hídrico reduzido, os valores da descarga subterrânea específica dos litotipos também são muito baixos, enquanto nas bacias onde existem valores de excedente hídrico significativos, as vazões subterrâneas específicas são muito elevadas.

Litotipos carbonáticos		área total (km <sup>2</sup> )	vazão subterrânea específica média (L/s.km <sup>2</sup> )
componentes dos aquíferos cársticos	Calcário	4.432,00	3,20
	Calcarenito, Calcissiltito	437,40	19,47
	Calcário, Calcarenito oolítico, Dolomito, Silexito	332,00	0,06
	Calcilutito, Calcarenito	8.010,50	0,05
	Calcilutito, Calcarenito, Calcissiltito	240,10	0,08
	Calcilutito, Calcarenito, Marga	228,50	0,10
	Calcirrudito, Calcilutito, Calcarenito	2.330,00	0,08
	Calcissiltito, Micrito	259,70	14,16
	Dolomito	61,90	12,86
	<b>TOTAL</b>	<b>16.332,10</b>	
	<b>máximo</b>	<b>8.010,50</b>	<b>19,47</b>
	<b>mínimo</b>	<b>61,90</b>	<b>0,05</b>
	<b>média</b>	<b>1.814,68</b>	<b>5,56</b>
	<b>mediana</b>	<b>332,00</b>	<b>0,10</b>
componentes dos aquíferos cárstico-fissurais	Calcarenito, Arcóseo, Dolomito, Siltito, Folhelho, Argilito, Ritmito, Marga	35.894,60	5,68
	Calcarenito, Siltito	11.558,10	6,34
	Calcário dolomito, Chert, Foscorito, Rocha metapelítica	1.110,80	14,66
	Calcilutito, Calcarenito, Siltito, Calcissiltito, Arcóseo	4.147,60	0,06
	Metasiltito, mármore, metamarga	1.155,80	2,73
	Marga, siltito e calcário	1.001,50	0,30
	<b>TOTAL</b>	<b>54.868,40</b>	
	<b>máximo</b>	<b>35.894,60</b>	<b>14,66</b>
	<b>mínimo</b>	<b>1.001,50</b>	<b>0,06</b>
	<b>média</b>	<b>9.144,73</b>	<b>4,96</b>
	<b>mediana</b>	<b>2.651,70</b>	<b>4,21</b>
<b>TOTAL</b>	<b>71.200,50</b>		
	<b>máximo</b>	<b>35.894,60</b>	<b>19,47</b>
	<b>mínimo</b>	<b>61,90</b>	<b>0,05</b>
	<b>média</b>	<b>4.746,70</b>	<b>5,32</b>
	<b>mediana</b>	<b>1.110,80</b>	<b>2,73</b>



**Figura 4.3 - Descarga subterrânea específica média dos litotipos carbonáticos na bacia do rio São Francisco**

Desse mesmo modo, conforme mostra a Figura 4.4, as estações Jaguaraci e Rio Verde II, localizadas na bacia de Irecê, assim como a estação da estação Colônia do Jaíba, no norte de Minas, localizadas em clima semi-árido, os excedentes hídricos são muito reduzidos a inexistentes em muitos anos hidrológicos, sendo também extremamente reduzidas as vazões subterrâneas específicas para as litologias carbonáticas nessas bacias.

Por outro lado, as sub-bacias atreladas às estações Fazenda Samburá, Tapiraí Jusante e Ponte da Taquara localizadas nas cabeceiras do rio São Francisco, por exemplo, onde os excedentes hídricos são muito mais elevados, mostram litotipos carbonáticos com vazões subterrâneas específicas médias muito superiores.

Seguindo as mesmas premissas adotadas nos estudos anteriores, entende-se que também para a compreensão da descarga subterrânea específica dos litotipos que correspondem aos terrenos cársticos, no espaço da bacia do rio São Francisco, os esforços passam pela análise dos seguintes fatores: (1) Atributos responsáveis pela maior ou menor capacidade de trânsito, onde se destacam as condições climáticas favoráveis ao aporte pluviométrico e ao gradiente hidráulico; (2) Formas de interconexão hidráulica entre os distintos sistemas hidrogeológicos, onde estão refletidos de forma contundentes os atributos estruturais herdados ao longo da evolução geológica dos terrenos; (3) Tipos de assimetria entre bacia hidrográfica e hidrogeológica; (4) Calibração da porosidade efetiva para fluxo;

Nesse sentido, torna-se muito útil assumir como unidade de análise as UGAS definidas no capítulo quatro. Utilizando a análise integrada, foram realizadas as ponderações para a estimativa da descarga subterrânea nas UGAs provenientes dos terrenos cársticos representados pelos litotipos selecionados.

As Figuras 4.5 e 4.6 mostram para cada UGA os parâmetros área total (km<sup>2</sup>), média das porosidades efetivas para fluxo (%) calibradas para os litotipos selecionados, médias das vazões subterrâneas específicas (l/s.km<sup>2</sup>) e média da descarga subterrânea (L/s).

Conforme mostra a Figura 4.5, as litologias carbonáticas selecionadas ocorrem em maior área nas UGAs 5 e 10. Nas UGAs, os valores médios de porosidade efetiva para fluxo variam entre 9,5% e 12,3% para os litotipos selecionados.

## DESCARGA SUBTERRÂNEA ESPECÍFICA MÉDIA E EXCEDENTE HÍDRICO NOS CALCÁRIOS E DOLOMITOS NAS SUB-BACIAS SELECIONADAS



Figura 4.4 - Descarga subterrânea específica média das sub-bacias estudadas e os valores de precipitação e evapotranspiração médios

As UGAs com maior vazão específica subterrânea média para os litotipos carbonáticos são as UGAs 3, 2 e 1, sendo que as com maior descarga subterrânea total associada a esses litotipos são as UGAs 1, 4 e 5 (Figura 5.6). Importante ressaltar, que nas UGAs 7 e 8 não houve estudos hidrológicos devido à ausência de estações fluviométricas com séries históricas com dados consistentes. Desta forma, em ambas as UGAs não foram calibrados valores de porosidade efetiva para fluxo e contribuição subterrânea.

#### **4.1 UGA 1 – Rio São Francisco**

A UGA 1 apresenta uma área total de 30.856 km<sup>2</sup>, sendo que 7.233 km<sup>2</sup> correspondem aos litotipos carbonáticos aflorantes selecionados no estudo (23%). Dentre eles predomina a associação Calcarenito, Arcóseo, Dolomito, Siltito, Folhelho, Argilito, Ritmito, Marga, mapeados como Grupo Bambuí, Subgrupo Paraopeba. A média da porosidade efetiva para fluxo calibrada para as associações de rochas carbonática na bacia corresponde a 10,0% e a descarga subterrânea específica média equivale a 11,2 L/s.km<sup>2</sup>. O total da descarga subterrânea calculada para as rochas carbonáticas avaliadas na UGA 1 é de 66.652,5 L/s ou 239.949 m<sup>3</sup>/h. O total estimado para a produção subterrânea na UGA 1 foi de 925.841 m<sup>3</sup>/h, sendo a contribuição das rochas carbonáticas avaliadas em 25,9% da produção subterrânea total da UGA.

#### **4.2 UGA 2 – Paraopeba**

Os litotipos carbonáticos aflorantes na UGA 2 ocupam 338 km<sup>2</sup>, apenas 1% da área total da UGA (32.765 km<sup>2</sup>). Na UGA 2 as litologias carbonáticas dominantes também correspondem a Calcarenito, Arcóseo, Dolomito, Siltito, Folhelho, Argilito, Ritmito, Marga, mapeados como Grupo Bambuí, Subgrupo Paraopeba. Ocorrem ainda calcarenitos, calcissiltito e micritos do Grupo Bambuí e dolomitos do Grupo Itabira. A porosidade efetiva para fluxo média das litologias na UGA 2 é de 12,0% e a descarga subterrânea específica média calculada corresponde a 12,69 L/s/km<sup>2</sup>. O total da descarga subterrânea dos litotipos carbonáticos na UGA 2 foi calculado em 3.094 L/s, o equivalente a 11.139 m<sup>3</sup>/h. Esse valor corresponde a 1,9% (162.269 L/s) da descarga subterrânea total na UGA 2 (584.168 m<sup>3</sup>/h).



		área (km <sup>2</sup> )	UGA 1	UGA 2	UGA 3	UGA 4	UGA 5	UGA 6	UGA 7	UGA 8	UGA 9	UGA 10	
componentes dos aquíferos cársticos	Calcário		22,54			564,03	3167,30	265,51	263,58	146,98	2,02		
	Calcarenito, Calcissiltito			32,65	404,74								
	Calcário, Calcarenito oolítico, Dolomito, Silexito											331,99	
	Calcilutito, Calcarenito											8010,51	
	Calcilutito, Calcarenito, Calcissiltito											240,08	
	Calcilutito, Calcarenito, Marga											228,50	
	Calcirrudito, Calcilutito, Calcarenito											2329,95	
	Calcissiltito, Micrito			34,39	225,34								
	Dolomito			1,04	60,84								
componentes dos aquíferos cárstico-fissurais	Calcarenito, Arcóseo, Dolomito, Siltito, Folhelho, Argilito, Ritmito, Marga		7210,68	205,09		6462,84	3793,58	2096,33	8351,20	6438,95	1335,91		
	Calcarenito, Siltito			64,97	239,39	0,24	8232,52	39,17	544,80	1879,10	557,92		
	Calcário dolomito, Chert, Foscorito, Rocha metapelítica					1110,75							
	Calcilutito, Calcarenito, Siltito, Calcissiltito, Arcóseo											4147,55	
	Metasiltito, mármore, metamarga								104,94		1050,88		
	Marga, siltito e calcário						1001,47						
	<b>total</b>		<b>7.233</b>	<b>338</b>	<b>930</b>	<b>8.138</b>	<b>16.195</b>	<b>2.401</b>	<b>9.265</b>	<b>8.465</b>	<b>2.947</b>	<b>15.289</b>	

		porosidade efetiva para fluxo (%)	UGA 1	UGA 2	UGA 3	UGA 4	UGA 5	UGA 6	UGA 7	UGA 8	UGA 9	UGA 10	
componentes dos aquíferos cársticos	Calcário		12,25%			12,97%	13,29%	12,50%			13,00%		
	Calcarenito, Calcissiltito			14,65%	14,63%								
	Calcário, Calcarenito oolítico, Dolomito, Silexito											13,50%	
	Calcilutito, Calcarenito											12,15%	
	Calcilutito, Calcarenito, Calcissiltito											11,00%	
	Calcilutito, Calcarenito, Marga											11,00%	
	Calcirrudito, Calcilutito, Calcarenito											12,01%	
	Calcissiltito, Micrito			13,50%	10,65%								
	Dolomito			12,50%	10,00%								
componentes dos aquíferos cárstico-fissurais	Calcarenito, Arcóseo, Dolomito, Siltito, Folhelho, Argilito, Ritmito, Marga		7,71%	7,40%		7,09%	7,26%	7,23%			7,25%		
	Calcarenito, Siltito			11,80%	10,39%	13,50%	11,64%	13,50%			12,08%		
	Calcário dolomito, Chert, Foscorito, Rocha metapelítica					15,51%							
	Calcilutito, Calcarenito, Siltito, Calcissiltito, Arcóseo											14,32%	
	Metasiltito, mármore, metamarga										9,89%		
	Marga, siltito e calcário						6,00%						
	<b>média</b>		<b>9,98%</b>	<b>11,97%</b>	<b>11,42%</b>	<b>12,27%</b>	<b>9,55%</b>	<b>11,08%</b>				<b>10,55%</b>	<b>12,33%</b>

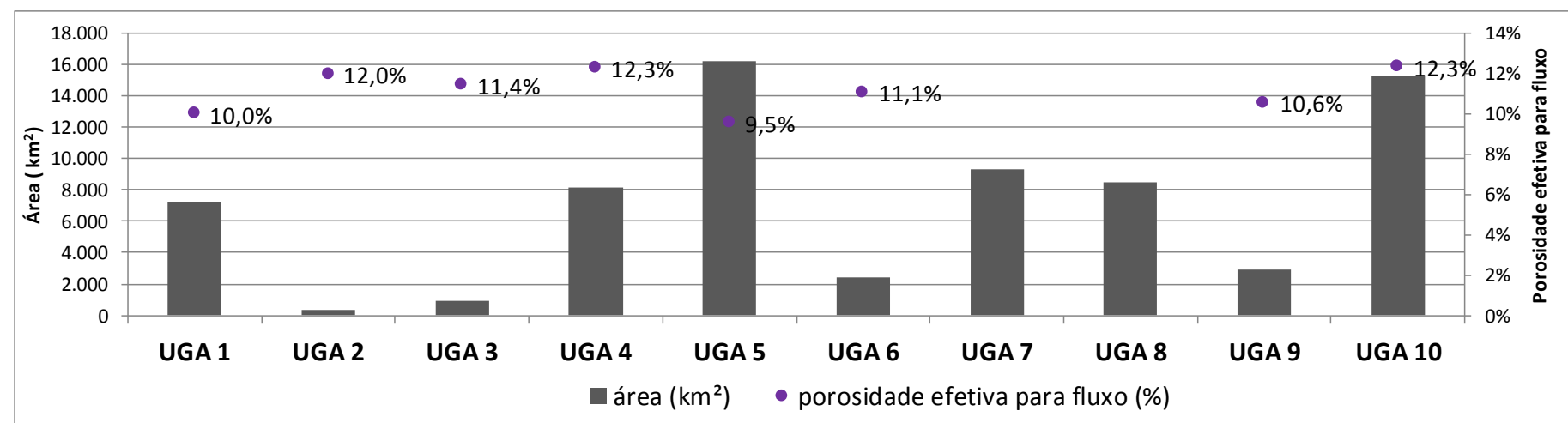


Figura 4.5 - Área e média da porosidade efetiva para fluxo dos litotipos carbonáticos aflorantes nas UGAs - Unidade de Gestão das Águas na bacia do rio São Francisco

### **4.3 UGA 3 – Rio das Velhas**

Na UGA 3, que possui 14.563,7km<sup>2</sup>, 6% da área corresponde aos litotipos carbonáticos selecionados (930 km<sup>2</sup>). Dentre eles, o de maior extensão é o Grupo Bambuí, com os litotipos calcarenito e calcissiltito, seguidos dos litotipos calcissiltito e micrito, e, em menor extensão, os dolomitos do Grupo Itabira. A porosidade efetiva para fluxo média calculada para as litologias carbonáticas foi de 11,4% e a descarga subterrânea específica média equivalente a 15,74 L/s.km<sup>2</sup>. A descarga subterrânea dessas rochas corresponde a 15.436 L/s ou 55.568 m<sup>3</sup>/h, 17,0% da descarga subterrânea total na UGA 3 (326.290 m<sup>3</sup>/h).

### **4.4 UGA 4 – Rio Paracatu**

A UGA 4 apresenta uma área total de 40.939,5 km<sup>2</sup>, sendo que 8.138 km<sup>2</sup> correspondem aos litotipos carbonáticos aflorantes selecionados no estudo (20%). Dentre eles predomina o calcário (Formação Lagoa do Jacaré ou Subgrupo Paraopeba) e a associação Calcarenito, Arcóseo, Dolomito, Siltito, Folhelho, Argilito, Ritmito, Marga, do Grupo Bambuí, Subgrupo Paraopeba. Ocorrem ainda calcário dolomítico, chert, foscorito, rocha metapelítica do Grupo Vazante (unidade b) e os calcarenito, siltito do Grupo Bambuí, Formação Lagoa do Jacaré. A média da porosidade efetiva para fluxo calibrada para as associações de rochas carbonática na bacia corresponde a 12,3% e a descarga subterrânea específica média equivale a 9,1 L/s.km<sup>2</sup>.

O total da descarga subterrânea das rochas carbonáticas avaliadas na UGA 4 é de 52.246 L/s ou 188.084 m<sup>3</sup>/h. O total estimado para a produção subterrânea na UGA 4 foi de 863.639 m<sup>3</sup>/h, sendo a contribuição das rochas carbonáticas avaliadas em 21,8% da produção subterrânea total da UGA.

		Descarga subterrânea específica média (L/s.km <sup>2</sup> )									
		UGA 1	UGA 2	UGA 3	UGA 4	UGA 5	UGA 6	UGA 7	UGA 8	UGA 9	UGA 10
componentes dos aquíferos cársticos	Calcário	13,29			7,29	1,20	6,60			2,87	
	Calcarenito, Calcissiltito		18,04	19,60							
	Calcário, Calcarenito oolítico, Dolomito, Silexito										0,06
	Calcilutito, Calcarenito										0,05
	Calcilutito, Calcarenito, Calcissiltito										0,08
	Calcilutito, Calcarenito, Marga										0,10
	Calcirrudito, Calcilutito, Calcarenito										0,08
	Calcissiltito, Micrito		18,89	13,29							
	Dolomito		10,65	15,06							
componentes dos aquíferos cársticos-fissurais	Calcarenito, Arcóseo, Dolomito, Siltito, Folhelho, Argilito, Ritmito, Marga	9,20	5,81		4,93	0,64	4,60			2,23	
	Calcarenito, Siltito		10,06	14,99	9,34	3,95	10,20			5,62	
	Calcário dolomito, Chert, Foscorito, Rocha metapelítica				14,66						
	Calcilutito, Calcarenito, Siltito, Calcissiltito, Arcóseo										0,06
	Metasiltito, mármore, metamarga									2,73	
	Marga, siltito e calcário					0,30					
	<b>Média</b>	<b>11,25</b>	<b>12,69</b>	<b>15,74</b>	<b>9,06</b>	<b>1,52</b>	<b>7,13</b>			<b>3,37</b>	<b>0,07</b>

		Descarga subterrânea média em L/s (descarga subterrânea específica x área)									
		UGA 1	UGA 2	UGA 3	UGA 4	UGA 5	UGA 6	UGA 7	UGA 8	UGA 9	UGA 10
componentes dos aquíferos cársticos	Calcário	299,5			4.113,4	3.811,1	1.753,2			5,8	
	Calcarenito, Calcissiltito		588,9	7.933,8							
	Calcário, Calcarenito oolítico, Dolomito, Silexito										20,0
	Calcilutito, Calcarenito										394,0
	Calcilutito, Calcarenito, Calcissiltito										18,1
	Calcilutito, Calcarenito, Marga										22,6
	Calcirrudito, Calcilutito, Calcarenito										181,9
	Calcissiltito, Micrito		649,6	2.995,7							
	Dolomito		11,0	916,5							
componentes dos aquíferos cársticos-fissurais	Calcarenito, Arcóseo, Dolomito, Siltito, Folhelho, Argilito, Ritmito, Marga	66.353,0	1.191,3		31.847,9	2.435,6	9.640,9			2.984,3	
	Calcarenito, Siltito		653,4	3.589,6	2,2	32.500,3	399,4			3.136,4	
	Calcário dolomito, Chert, Foscorito, Rocha metapelítica				16.282,1						
	Calcilutito, Calcarenito, Siltito, Calcissiltito, Arcóseo										249,6
	Metasiltito, mármore, metamarga									2.873,9	
	Marga, siltito e calcário					299,3					
	<b>Total</b>	<b>66.652,5</b>	<b>3.094,3</b>	<b>15.435,6</b>	<b>52.245,5</b>	<b>39.046,4</b>	<b>11.793,5</b>			<b>9.000,4</b>	<b>886,3</b>
	239.949,0	11.139,4	55.568,2	188.083,8	140.567,1	42.456,7			32.401,4	3.190,6	

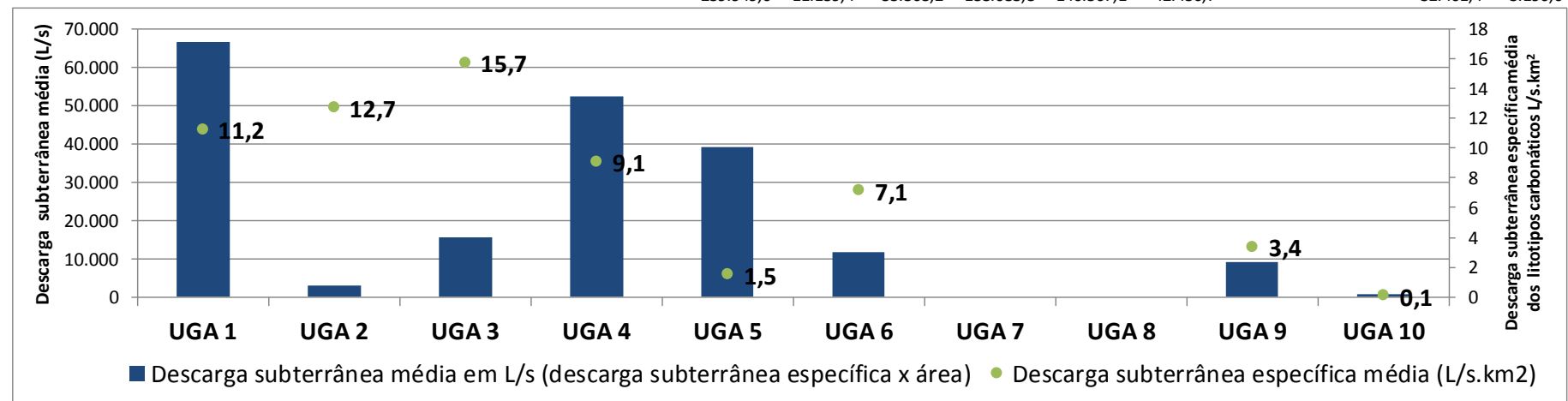


Figura 4.6 - Descarga subterrânea específica e descarga subterrânea média dos litotipos carbonáticos aflorantes nas UGAs - Unidade de Gestão das Águas na bacia do rio São Francisco

#### **4.5 UGA 5 – Baixo Velhas – Verde Grande**

Na UGA 5, de 49.259 km<sup>2</sup>, 33% da área corresponde aos litotipos carbonáticos selecionados (16.195 km<sup>2</sup>). Dentre eles, o de maior extensão é o Grupo Bambuí, com os litotipos calcarenito e siltito (Formação Lagoa do Jacaré), seguidos da associação Calcarenito, Arcóseo, Dolomito, Siltito, Folhelho, Argilito, Ritmito, Marga, do Grupo Bambuí, Subgrupo Paraopeba, calcário (Formação Lagoa do Jacaré ou Subgrupo Paraopeba) e os calcarenito e siltito da Formação Lagoa do Jacaré. A porosidade efetiva para fluxo média calculada para as litologias carbonáticas foi de 9,6 % e a descarga subterrânea específica média equivalente a 1,5 L/s.km<sup>2</sup>. A descarga subterrânea dessas rochas corresponde a 39.046 L/s ou 140.567 m<sup>3</sup>/h. A descarga subterrânea total na UGA 5 não foi possível de ser calculada devido ao número restrito de bacias com estações fluviométricas monitoradas.

#### **4.6 UGA 6 – Rio Urucuia**

Os litotipos carbonáticos aflorantes na UGA 6 ocupam 2.401 km<sup>2</sup>, apenas 10% da área total da UGA (23.758,6 km<sup>2</sup>). Na UGA 6 as litologias carbonáticas dominantes correspondem a Calcarenito, Arcóseo, Dolomito, Siltito, Folhelho, Argilito, Ritmito, Marga, mapeados como Grupo Bambuí, subgrupo Paraopeba. Ocorrem ainda calcário (Formação Lagoa do Jacaré ou Subgrupo Paraopeba) e calcarenito, siltito (Formação Lagoa do Jacaré). A porosidade efetiva para fluxo média das litologias na UGA 6 é de 11,1% e a descarga subterrânea específica média calculada corresponde a 7,13 L/s/km<sup>2</sup>. O total da descarga subterrânea dos litotipos carbonáticos na UGA 6 foi calculado em 11.794 L/s, o equivalente a 42.457 m<sup>3</sup>/h. Esse valor corresponde a 10,0% da descarga subterrânea total na UGA 6 (117.737 L/s, ou 423.835 m<sup>3</sup>/h).

#### **4.7 UGA 7 – Margem Esquerda SF**

Na UGA 7, 20% da área corresponde aos litotipos carbonáticos selecionados (9.265 km<sup>2</sup>). Dentre eles, o de maior extensão é o Grupo Bambuí, com os litotipos calcarenito e siltito (Formação Lagoa do Jacaré), seguidos da associação Calcarenito, Arcóseo, Dolomito, Siltito, Folhelho, Argilito, Ritmito, Marga, do Grupo Bambuí, Subgrupo Paraopeba, calcário (Formação Lagoa do Jacaré ou Subgrupo Paraopeba) e os calcarenito e siltito da Formação Lagoa do Jacaré. Além deles ocorre também

metassiltito, mármore e metamarga da Formação São Desidério, Grupo Bambuí. Para a UGA 7, não foi feita a estimativa devido à ausência de dados.

#### **4.8 UGA 8 – Margem Direita SF**

A UGA 8 apresenta uma área total de 36.055,6 km<sup>2</sup>, sendo que 8.465 km<sup>2</sup> correspondem aos litotipos carbonáticos aflorantes selecionados no estudo (23%). Dentre eles predomina a associação calcarenito, arcóseo, dolomito, siltito, folhelho, argilito, ritmito, marga, mapeados como Grupo Bambuí, Subgrupo Paraopeba. Ocorrem também calcário (Formação Lagoa do Jacaré ou Subgrupo Paraopeba) e calcarenito, siltito (Formação Lagoa do Jacaré). Na UGA 8 não foi feita a estimativa devido à ausência de dados.

#### **4.9 UGA 9 – Chapadão Urucuia**

Os litotipos carbonáticos aflorantes na UGA 9 ocupam 2.947 km<sup>2</sup>, apenas 2,0% da área total da UGA (120.443,4 km<sup>2</sup>). Na UGA 9 as litologias carbonáticas dominantes correspondem a calcarenito, arcóseo, dolomito, siltito, folhelho, argilito, ritmito, marga, mapeados como Grupo Bambuí, Subgrupo Paraopeba. Além deles ocorre também metassiltito, mármore e metamarga da Formação São Desidério, Grupo Bambuí. Ocorrem ainda calcarenito, siltito (Formação Lagoa do Jacaré) e calcário (Formação Lagoa do Jacaré ou Subgrupo Paraopeba). A porosidade efetiva para fluxo média das litologias na UGA 9 é de 10,6% e a descarga subterrânea específica média calculada corresponde a 3,37 L/s/km<sup>2</sup>. O total da descarga subterrânea dos litotipos carbonáticos aflorantes na UGA 9 foi calculado em 9.001 L/s, o equivalente a 32.401 m<sup>3</sup>/h. Esse valor corresponde a 1,7% da descarga subterrânea total na UGA 9 (537.632 L/s ou 1.935.475 m<sup>3</sup>/h).

#### **4.10 UGA 10 – Irecê**

A UGA 10 apresenta uma área total de 70.235,3 km<sup>2</sup>, sendo que 15.289 km<sup>2</sup> correspondem aos litotipos carbonáticos aflorantes selecionados no estudo (21,8% da área total). Dentre eles predominam os calcários de retrabalhamento, margas, siltitos e arcóseos mapeados como Formação Salitre, Grupo Una. A média da porosidade efetiva para fluxo calibrada para as associações de rochas carbonáticas aflorantes na bacia corresponde a 12,3% e a descarga subterrânea específica média equivale a 0,07

L/s.km<sup>2</sup>. O total da descarga subterrânea das rochas carbonáticas avaliadas na UGA 10 é de 886 L/s ou 3.191 m<sup>3</sup>/h. A descarga subterrânea total na UGA 10 não foi possível de ser calculada devido ao número restrito de bacias com estações fluviométricas monitoradas.

## **5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

A dinâmica hídrica na bacia do rio São Francisco reflete a interação de compartimentos morfoclimáticos e hidrogeológicos distintos que apresentam, em função de seus atributos específicos, potenciais de produção de água muito heterogêneos. A abundância de água na bacia do rio São Francisco, seja ela superficial ou subterrânea, conforme mostrado nesse estudo, pode ser expressa satisfatoriamente pelo cômputo das vazões subterrâneas específicas médias.

De forma geral, quando os valores de descarga subterrânea específica de uma determinada bacia são elevados, tende a existir uma forte interação entre os fluxos subterrâneos e as calhas fluviais, sendo as águas subterrâneas mantenedoras dos corpos hídricos ao longo do ano. Em situações onde a descarga subterrânea específica é muito baixa é muito difícil ocorrer situações onde as vazões dos corpos hídricos são elevadas e cujo fluxo se mantém perene ao longo dos períodos de estiagem.

A descarga subterrânea específica média tende a ser um excelente indicador de capacidade de produção de água de uma determinada bacia porque representa o extrato das interações das variáveis climáticas, morfológicas e hidrogeológicas, apontando de forma realista o resultado da interação das propriedades intrínsecas do sistema natural quando submetido a diferentes índices pluviométricos. Acrescenta-se ainda que, conhecendo-se as propriedades hidrogeológicas das rochas, a avaliação dos valores de descarga específica média permite inferir cenários de trocas hídricas entre aquíferos que ultrapassam as fronteiras das bacias hidrográficas.

Uma vez que esses valores são medidos a partir do monitoramento das vazões nas calhas fluviais e mostram as oscilações naturais ao longo do período de chuva e do período de seca, as vazões subterrâneas específicas médias são também bastante elucidativas para o conhecimento dos valores de referência da recarga dos sistemas aquíferos.

O mapa da Figura 5.1 mostra a espacialização das vazões subterrâneas específicas médias ao longo da bacia do rio São Francisco e nele estão destacadas em hachuras, as principais áreas de ocorrência de rochas carbonáticas.

As áreas de maior descarga subterrânea específica ocorrem na porção sul da bacia. Observa-se a diferença das vazões subterrâneas específicas médias e a diminuição dessas de sul para norte e de oeste para leste, sendo os menores valores de descarga aqueles que predominam na UGA 5 - Baixo velhas-Verde Grande e na UGA 10 - Irecê. Nesse mesmo sentido, ocorre a diminuição das precipitações pluviométricas e do gradiente topográfico.

Notável ressaltar ainda a evidência de valores anômalos de descargas específicas no interior de sistemas aquíferos que apresentam homogeneidade no conjunto de tipos litológicos e de faixas isoietais, possibilitando se atestar as relações de trocas hídricas entre aquíferos que se encontram interconectados além das fronteiras hidrográficas. Os valores de descarga subterrânea encontrados em diversas bacias evidenciam condições extremas, tanto pela presença de valores muito elevados para ambientes de baixo potencial hidrogeológico, como de valores baixos para ambientes de elevado potencial hidrogeológico.

Uma das principais características dos sistemas aquíferos cársticos, enquanto parte integrante de um sistema mais amplo que se integra aos outros domínios não cársticos, revela-se por dois tipos de associações possíveis, quais sejam: os ambientes aquíferos cársticos cobertos e aqueles que se encontram expostos em superfície.

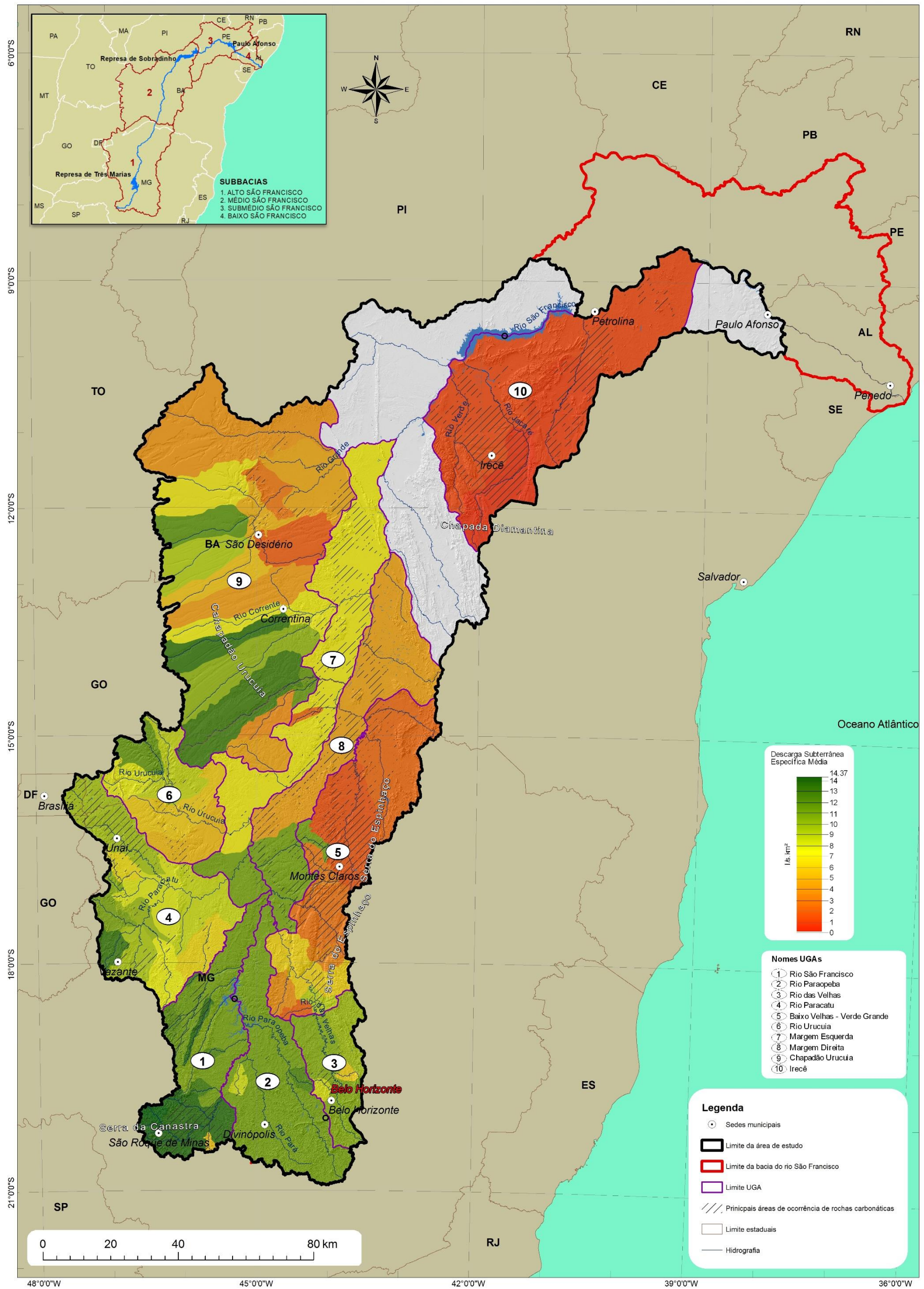


Figura 5.1 - Mapa de descarga subterrânea específica média na bacia do rio São Francisco



No primeiro caso, verifica-se que as rochas calcárias cobertas podem ocorrer amplamente distribuídas sob os arenitos do Grupo Urucuia, sob os metassedimentos do Subgrupo Paraopeba e também sob as coberturas detrito-lateríticas ferruginosas que se distribuem de modo abrangente por toda a bacia do rio São Francisco. Nesses casos, quando posicionadas em cotas elevadas e sob regime de chuvas médias ou elevadas (> que 900 mm, em geral), as rochas carbonáticas tendem a receber um aporte significativo de águas infiltradas nas camadas porosas superiores e, devido a sua composição química, levemente ácida, tende a contribuir para o desenvolvimento do carste e das feições típicas que a ele se associam.

Além disso, em casos onde há intercalação de carbonatos com rochas argilosas, como por exemplo, as ocorrências de calcários da Formação Lagoa do Jacaré, não raras vezes intercalados com as unidades pelíticas (siltitos e argilitos), configuram-se para a escala de trabalho em questão, zonas de difícil caracterização quanto ao padrão de recargas, as quais podem ser de fato muito heterogêneas.

Situações ocorrem ainda em calcários sobrepostos por unidades pouco porosas, que mesmo fazendo parte de um regime climático vinculado a índices pluviométricos mais elevados, podem denotar a existência de um sistema cárstico subjacente tendendo a receber recargas diretas (autogênicas) muito baixas, dada a presença de camadas superiores pouco permeáveis. Neste caso, devem predominar as formas de recarga indireta (alogênicas) oriunda de domínios não-cársticos.

Por outro lado, quando os calcários se encontram expostos, os índices de recarga tendem a ser elevados, desde que exista aporte pluviométrico superior a evapotranspiração. Áreas carstificadas como os calcários da Formação Salitre em Irecê, apesar de serem classificados como zonas de recarga elevada ou ótima, devido à escassez das chuvas situam-se em condições de recarga efetiva bastante reduzida. O contrário ocorre nas áreas cársticas de Arcos-Pains e Sete Lagoas, onde não só a recarga é alta, mas os valores efetivos que alcançam os aquíferos são também mais elevados.

Para as bacias onde predominam áreas de calcários carstificados expostos é muito importante a utilização de outros métodos de quantificação da descarga subterrânea

(como estudo de variação do nível d'água em piezômetros, monitoramento de surgências cársticas e estudos com traçadores corantes). Conforme discutido anteriormente, nesses sistemas as calhas fluviais não recebem o aporte subterrâneo da mesma forma e intensidade que os sistemas não-cársticos, podendo existir forte concentração dos fluxos hídricos subterrâneos em trechos específicos (surgências cársticas).

Tendo sido observadas anomalias ao longo das investigações pertinentes ao estudo hidrogeológico dos aquíferos cársticos e fissuro-cársticos existentes na bacia do rio São Francisco, são apontadas algumas ações de interesse ao reconhecimento dos mecanismos de controle dos sistemas aquíferos regionais que se integram volumetricamente aos quantitativos que circulam na BSF.

Os domínios de interesse onde foram detectadas anomalias em relação ao cômputo dos volumes escoados nos aquíferos e que servem à manutenção das descargas de base de vários cursos d'água são aqueles relacionados às UGAs São Francisco e Chapadão Urucuia, principalmente.

Em relação à primeira unidade de gestão citada, diversas nascentes formadoras do rio São Francisco situadas nas zonas elevadas da serra da Canastra e serras do entorno, em Minas Gerais, escoam para formar treze bacias hidrográficas vertentes para o interior de seu domínio. Conforme ressaltado anteriormente, nesta UGA foram verificadas ocorrências de descarga subterrânea específica média muito superior às médias regionais, com valores acima de  $14 \text{ L/s.km}^2$  e uma média geral de  $9 \text{ L/s.km}^2$ .

Como as unidades vizinhas apresentaram descargas com valores 50% menores, admitiu-se que em tal compartimento há contribuições exteriores para essas bacias oriundas da serra da Canastra por conexão hidráulica entre fraturas regionais, as quais são amplamente reconhecidas nos mapeamentos geológicos disponíveis.

No caso da unidade de gestão vinculada ao domínio geomorfológico do Chapadão Urucuia, também puderam ser reconhecidas vazões subterrâneas específicas médias elevadas para algumas bacias em detrimento de outras vizinhas mais baixas. Considerando-se um percentual médio de composição arenítica em torno de 90% para oito bacias primárias avaliadas, a ocorrência de valores de descargas superiores a 8,0

L/s.km<sup>2</sup> e, em outros casos, valores inferiores a 1,0 L/s.km<sup>2</sup>, como é o caso da estação Fazenda Coqueiro no rio São Desidério (0,59 L/s.km<sup>2</sup>), podem estar relacionados diretamente ao potencial hidrogeológico do carste em profundidade, cujos limites de dissolução dos carbonatos devem atingir cotas inferiores a dos talwegues das drenagens locais, implicando na adução das descargas rumo aos níveis de base regionais, como os próprios rios Grande e São Francisco.

Dentre o conjunto de 18 estações fluviométricas nessa unidade, verifica-se uma média geral para descargas subterrâneas específicas em torno de 4,7 L/s.km<sup>2</sup>. Cumpre ressaltar que quatro estações se referem àquelas situadas a jusante das demais, contabilizando descargas mais diluídas em função da ocorrência de estações com valores mais baixos citados anteriormente.

Como as condições climáticas nesse compartimento mostram-se homogêneas, de certo modo, entende-se que as diferenças observadas entre as vazões subterrâneas específicas podem estar relacionadas aos seguintes fatores:

- Gradiente hidráulico abrupto relacionado ao contraste topográfico existente entre a porção de seu limite oeste, vinculado a serra Geral de Goiás, implicando em uma forte e aguda concorrência pelas Zonas Aquíferas adjacentes às faixas situadas nestas porções próximas ao topo oeste da chapada, em detrimento de um caimento mais suave da própria superfície da chapada no sentido leste, rumo aos vales dos rios Grande e Corrente;
- Competição dos gradientes hidráulicos naturais existentes entre as calhas paralelas de drenagem ao longo do Chapadão Urucuia, sendo possível que o entalhamento dos talwegues de diversas drenagens, por questões litológicas (faciológicas) possam se posicionar ao longo de sua evolução em cotas mais profundas, umas em relação às outras, favorecendo o deslocamento de aportes volumétricos mais expressivos junto às zonas onde o entalhamento da drenagem se mostra mais pronunciado (consideradas naturalmente as características de equivalência entre as espessuras de materiais vizinhos às calhas de drenagem, em termos comparativos de volumes de saturação dos aquíferos).

- Ausência de um cômputo integral das recargas que ocorrem no Chapadão Urucuia, pelo fato de não terem sido avaliadas e integradas aos cálculos, as descargas de base que se manifestam na borda oeste da Serra Geral de Goiás e que são provenientes do mesmo domínio hidrogeológico. Certamente, então, os valores encontram-se subestimados.

Estudo recente, desenvolvido pela ANA (2017), voltado para a caracterização hidrogeológica do Sistema Aquífero Urucuia, apresenta valores mais apurados sobre a recarga desse Sistema, conforme já ressaltado em capítulos anteriores. Foi estimada uma recarga média sobre o SAU de 217 mm/ano ou 18% da precipitação média anual. Segundo o estudo, o rio São Francisco recebe aproximadamente 730 m<sup>3</sup>/s a partir do SAU, enquanto o rio Tocantins aproximadamente 215 m<sup>3</sup>/s.

Já em relação a outros domínios que carecem de um entendimento pormenorizado acerca de suas condições de comportamento hidráulico associado aos regimes naturais de escassez, as UGAs Baixo Velhas-Verde Grande e Irecê devem ser consideradas como um cenário específico para análises de longo prazo, as quais envolvam ações sócio-ambientais vinculadas a um projeto de estudos hidrogeológicos e hidroclimatológicos.

Para o caso da UGA Baixo Velhas–Verde Grande, o sistema que se expande ao longo da bacia hidrográfica do rio Verde Grande e Gorutuba drena uma área aproximada de 30.420 km<sup>2</sup>, sendo que desse total 87% pertencem ao Estado de Minas Gerais e o restante, 13%, ao Estado da Bahia. Estão inseridos nessa região trinta e cinco municípios, sendo vinte e sete municípios mineiros e oito baianos. A demografia da bacia do Verde Grande é fortemente influenciada pela presença, em sua área geográfica, da cidade de Montes Claros, principal polo regional. Mais de 1/3 da população da bacia reside em Montes Claros.

No entanto, recentes investigações ao longo da região abrangendo diretamente as imediações da sede municipal de Jaíba demonstram, em uma primeira análise, um processo de alteração das condições de circulação hídrica superficial e subterrânea, cujos relatos e averiguações expeditas *in loco*, denotam, possivelmente, a ocorrência de ações descontroladas do uso das águas, seja pelo desconhecimento da

implantação de barragens e das vazões bombeadas no próprio rio Verde Grande, seja pelo número de usuários e poços tubulares profundos atualmente ativos, mas, fundamentalmente, pela ausência de uma rede de monitoramento hidrológico/hidrogeológico sistemático. Além disso, um estudo regionalizado envolvendo procedimentos de análise mais detalhados sobre o papel da recarga artificial dos processos de irrigação entre Mocambinho e Jaíba deve ser considerado.

No entorno imediato da região urbana de Montes Claros, por sua vez, tais condições revelam, do ponto de vista hidrogeológico e ambiental, que o sistema cárstico deve ser regulado em consonância aos limites físicos impostos pela distribuição espacial das ocorrências de rochas calcárias que conformam o próprio assoalho local, em detrimento do estabelecimento de limites de bacias hidrográficas (interflúvios), ou *pseudo*-divisores físicos ou hidráulicos como rios ou zonas deprimidas no relevo, associadas a fundos de vale.

A exemplo de outros ambientes, muitas são as implicações derivadas das diferenças que ocorrem entre os limites físicos das bacias hidrográficas e os respectivos divisores hidrogeológicos subterrâneos. No que tange ainda às questões observadas nos cálculos de recarga para o vasto domínio abrangido pela estação Colônia do Jaíba no rio Verde Grande, em Jaíba, caso fossem utilizados valores apropriados de descarga subterrânea média específica com base nos tipos litológicos existentes, os volumes de recarga computados na referida estação totalizariam aproximadamente 36 m<sup>3</sup>/s, ou seja, aproximadamente 6 vezes superior ao encontrado a partir das descargas que vêm sendo medidas.

Neste caso, o volume médio de recarga anual para o citado domínio representaria um valor médio percentual equivalente a 10% das precipitações ou aproximadamente 95 mm anuais.

O cenário atual permite demonstrar que a falta de conhecimento sobre as condições hidrogeológicas que regem o comportamento do aquífero cárstico, do quantitativo necessário à manutenção das taxas de irrigação atualmente praticadas e dos volumes que podem ser considerados como reservas reguladoras e explotáveis desse sistema aquífero, têm acarretado em conflitos pelo uso das águas subterrânea e superficial,

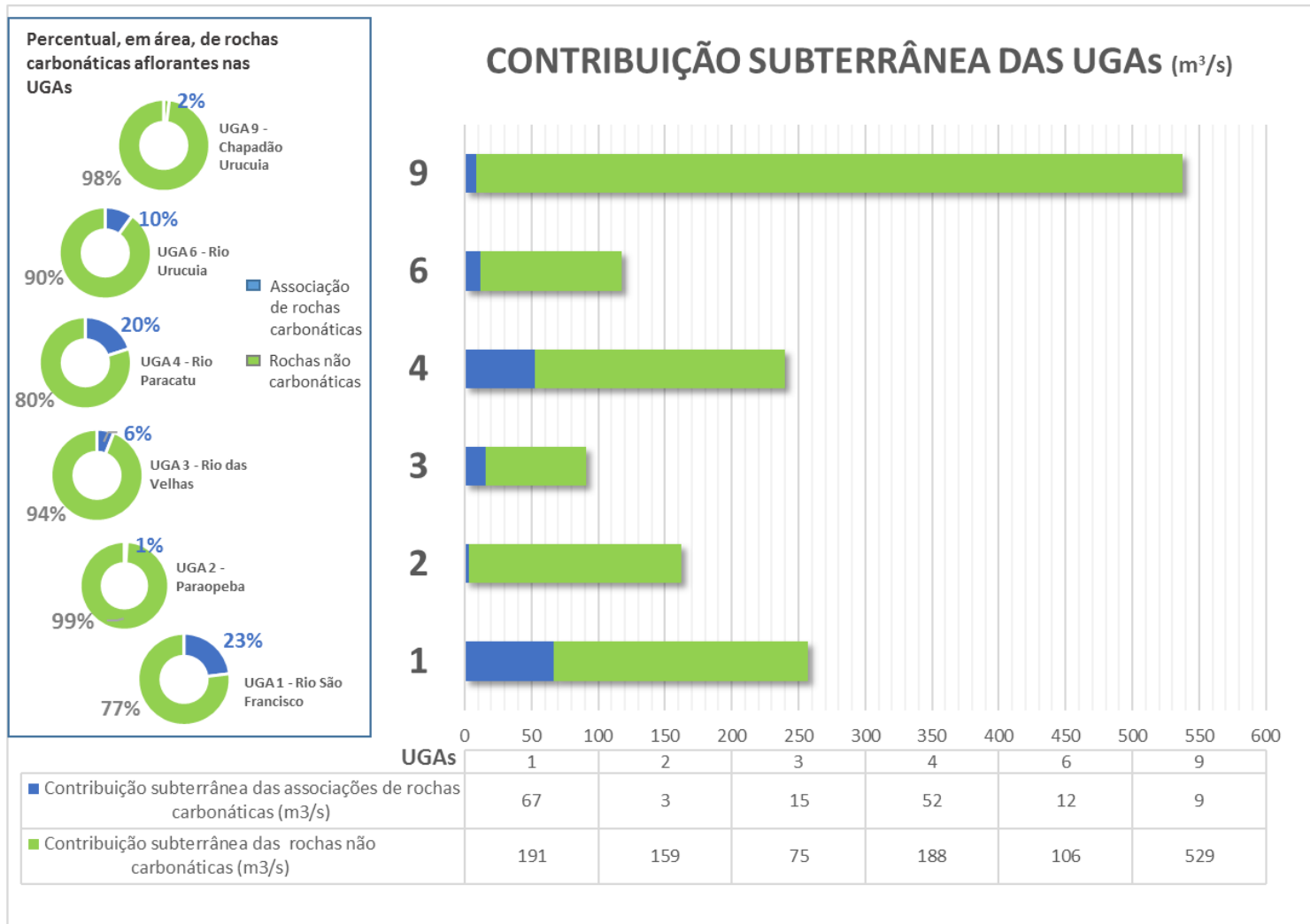
além de prejuízos ao meio ambiente. Isso fica claramente válido para todas as regiões que se mostram mais críticas do ponto de vista dos aportes de recarga natural, como aquelas apresentadas no mapa da Figura 5.1, cujas vazões subterrâneas específicas sejam mais baixas, notadamente as da região da UGA Irecê.

Nesse sentido, compreende-se que estas regiões encerram características singulares sob o ponto de vista da hidrogeologia cárstica e de sua natureza preponderante como única fonte de aproveitamento para abastecimento humano, rural ou industrial.

O posicionamento estratégico diante da ambiência hidrodinâmica da BSF se revela como um sistema aquífero que pode sofrer fortes influências sazonais oriundas da região central de sua calha de drenagem, através de expressivas interconexões hidráulicas em um regime alternativo de efluência / influência entre rio e aquífero cárstico que se estendem por algumas dezenas de quilômetros em ambas as margens.

A Figura 5.2 apresenta uma síntese da ocorrência das associações de rochas carbonáticas aflorantes dentro de cada Unidade de Gestão das Águas (UGAs) e dos valores de contribuição subterrânea estimados para essas unidades dentro da bacia do rio São Francisco.

Segundo os dados apresentados, a UGA que apresenta maior contribuição dos aquíferos cársticos e cárstico-fissurais na descarga subterrânea, em percentual e em volume, corresponde a UGA 1 (Rio São Francisco). Os menores valores percentuais foram estimados para a UGA 9 (Chapadão Urucuia) e UGA 2 (Paraopeba). Lembrando, no entanto, que não houve dados suficientes para a análise das UGAs 5 (Baixo-Velhas – Verde Grande), 7 (Margem esquerda - SF) e 8 (Margem Direita - SF).



**Figura 5.2 - Contribuição subterrânea estimada das UGAs.**

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKSOY, H.; WITTENBERG, H.; ERIS, E. Hydrograph Analysis and Baseflow Separation. In: **Handbook of Engineering Hydrology: Fundamentals and Applications**, 2014. p. 311-328.

ALKMIN F. F.; BRITO NEVES B. B.; ALVES J. A. C. Arcabouço tectônico do Cráton do São Francisco – uma revisão. In: J.M.L. DOMINGUEZ E A. MISI (eds). **O Cráton do São Francisco**. Reunião Preparatória do II SIMPÓSIO SOBRE O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO.1993. Salvador, SBG/Núcleo BA/SE/SGM/CNPq, p. 45-62.

ALKMIN, F. F; MARTINS-NETO, M. A. A bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: PINTO, C.P.; MARTINS-NETO (Org.). **Bacia do São Francisco: geologia e recursos minérios**. Belo Horizonte: SBG/MG, 2001. p. 09-30.

ALMEIDA, F. F. M., HASUI, Y., BRITO NEVES, B. B., FUCK, R. A. Brazilian Structural Provinces: an introduction. **Earth Science Review**, v. 17, 198. p.1-29. 1981.

ALMEIDA. F. F. M. O Cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, v.7, n 4, p.349-364. 1977.

ANA – AGENCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Urucuia e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada. *Volume 2. Hidrogeologia dos Sistemas Aquíferos Urucuia e Areado. Relatório Final*. 145p.

AULER, A. S.; SMART, P. L.; WANG, X.; CRISTALLI, P.; EDWARDS, L. O calcário Caatinga e os carbonatos secundários superficiais do norte da Bahia: geocronologia e significado paleoambiental. In: II CONGRESSO SOBRE PLANEJAMENTO E GESTÃO DAS ZONAS COSTEIRAS DOS PAÍSES DE EXPRESSÃO PORTUGUESA. IX CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO. II CONGRESSO DO QUATERNÁRIO DOS PAÍSES DE LÍNGUA IBÉRICA. Recife: ABEQUA, 2003.

AULER, A. S.; SMART, PETER L. The influence of bedrock-derived acidity in the development of surface and underground karst: evidence from the Precambrian carbonates of semi-arid northeastern Brazil. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 28, p. 157-168, 2003.

AULER, A.; RUBBIOLI, E. L.; BRANDI, R. **As grandes cavernas do Brasil**. Belo Horizonte: Rona Editora, v. 1, 2001. 230p.

BITTENCOURT, C.; REIS NETO, J.M. O sistema cárstico de Vazante – carste em profundidade em metadolomitos do Grupo Vazante – MG. **Revista Brasileira de Geociências**, v.42, n.1. p.01-10. 2012.



CARVALHO JUNIOR, O. A.; BERBET-BORN, M.; MARTINS, E. S.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T. Ambientes Cársticos. In: FLORENZANO, T. G. (Org.) **Geomorfologia – Conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. p. 185-218.

CBHVG. COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO VERDE GRANDE. Disponível em: < <http://www.verdegrande.cbh.gov.br/caracterizacao.aspx>>. Acesso em: 20 nov. 2015.

CBHSF- COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO. Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Módulo 1 – Resumo executivo. Salvador. 2004, 319p.

CECAV – Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas. Regiões Cársticas do Brasil. 2009. Disponível em:<<http://www.icmbio.gov.br/cecav/projetos-e-atividades/provincias-espeleologicas.html>>.

CHESF – COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO. Disponível em: <[http://www.chesf.gov.br/portal/page/portal/chesf\\_portal/paginas/sistema\\_chesf/sistema\\_chesf\\_bacias/container\\_bacias](http://www.chesf.gov.br/portal/page/portal/chesf_portal/paginas/sistema_chesf/sistema_chesf_bacias/container_bacias)>. Acesso em: 20 nov. 2015.

CHAPMAN T.G. Comment on ‘Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses’ by R. J. Nathan and T. A. McMahon. **Water Resources Research**. V.27. p.1783–1784. 1991.

CHAPMAN, T. G.; MAXWELL, A. I. Baseflow separation – Comparison of numerical methods with tracer experiments. *In: Hydrological and Water Resources Symposium*, Institution of Engineers Australia, Hobart, 539–545, 1996.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. New York: McGraw-Hill International Editions, 1988. 572p.

COLLISCHONN, W.; R. TASSI. **Introduzindo Hidrologia**. IPH-UFRGS. 2008. 149p.

COLLISCHONN, W.; FAN, F. M. Defining parameters for Eckhardt’s digital base flow filter. **Hydrological Processes**. V.27. p. 2614-2622. 2013.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo**. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Geologia/Geologia-Basica/Carta-Geologica-do-Brasil-ao-Milionesimo-298.html>>

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL e CBPM – COMPANHIA BAIANA DE PESQUISA MINERAL. **Carta geológica do Brasil ao Milionésimo**. Mapa geológico do estado da Bahia. 2003. Escala 1:1.000.000.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Carta geológica do Brasil ao Milionésimo**. Mapa geológico do estado de Minas Gerais. 2003. Escala 1:1.000.000.

CRUZ, S. C. P.; ALKMIM F. F. The tectonic interaction between the Paramirim Aulacogen and the Araçuaí belt, São Francisco Craton Region, Eastern Brazil. **Anais... Academia Brasileira de Ciência**, v.78. p.151-173. 2006.

DOMENICO, P. A.; SCHWARTZ, F.W. **Physical and Chemical Hydrogeology**. Second Edition. John Wiley and Sons, Inc. 1998. 528p.

ECKHARDT K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. **Hydrological Processes**, v.19. p. 507-515. 2005.

ECKHARDT K. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods. **Journal of Hydrology**, v.352. p. 168-173. 2008.

ECKHARDT K. Technical Note: Analytical sensitivity analysis of two parameters recursive digital baseflow separation filter. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.16. p. 451-455. 2012. ELETROBRÁS - CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S. A. Metodologia para regionalização de vazões. Rio de Janeiro, 1985. 2 v.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Brasil em Relevo, modelos numéricos de elevação** – Resolução espacial de 90 metros. Disponível em: <https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr/download/>. Acesso: 02 de fevereiro de 2015. FAO – Evapotranspiración del cultivo – Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje, 56. Roma. 2006. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/009/x0490s/x0490s00.htm>>, acesso em julho de 2013.

FETTER, C.W. **Applied Hydrogeology**. Third Edition. New York: Prentice Hall, Inc. 1994. 691p.

FREEZE, R.A.; CHERRY, J.A. **Groundwater**. New Jersey: Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs. 1979. 604p.

GASPAR, M. T. P.; CAMPOS, J. E. G.; MORAES, R. A. V. Determinação das espessuras do Sistema Aquífero Urucuia a partir de estudo geofísico. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 42(Suppl 1). p. 154-166. 2012.

GUNN. J. Point-recharge of limestone aquifers – a model from New Zealand Karst. **Journal of Hydrology**, v.61, n 1, p.19-29. 1983.

HIDROWEB – SISTEMA DE INFORMAÇÕES HIDROLÓGICAS. Agência Nacional de Águas. Disponível em: < <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>>.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <[www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)>. Acesso: 02 de fevereiro de 2015.

KARMANN, I.; SÁNCHEZ, L. H. Distribuição das rochas carbonáticas e províncias espeleológicas do Brasil. **Espeleotema**. Monte Sião, v 13, p. 105-167. 1979.

KLIMCHOUK, A.B. The formation of epikarst and its role in vadose speleogenesis. In: A. Klimchouk, D. Ford, A. Palmer, W. Dreybrodt, Eds: **Speleogenesis: Evolution of karst aquifers**. Huntsville: Natl. Speleol. Soc. 2000. p. 91-99.

KLIMCHOUK, A.B. Towards defining, delimiting and classifying epikarst: Its origin, processes and variants of geomorphic evolution. **Speleogenesis and Evolution of**

**Karst Aquifers - The virtual Scientific Journal**, v. 2(1). p.1-13. 2004. Disponível em: <  
[https://www.researchgate.net/publication/233776224\\_Klimchouk\\_2004\\_Towards\\_Defining\\_Epikarst\\_SEKA](https://www.researchgate.net/publication/233776224_Klimchouk_2004_Towards_Defining_Epikarst_SEKA)>.

KLIMCHOUK, A.B., FORD, D. PALMER, A.; DREYBRODT, W. Eds. **Speleogenesis: Evolution of karst aquifers**. Huntsville: Natl. Speleol. Soc. 2001. 496 p.

KOGOVSEK, J. Vertical percolation in Planina Cave in the period 1980/81. **Acta Carsologica**, 10. p.111-125. 1981.

KUCHENBECKER, M.; REIS, H. L. S.; FRAGOSO, D. G. C. Caracterização estrutural e considerações sobre a evolução tectônica da Formação Salitre na porção central da Bacia de Irecê, norte do cráton do São Francisco. **Revista Geonomos**, v 19, n 2. p. 42-49. 2011.

LYNE, V.; HOLLICK, M. Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling. In: PROCEEDINGS OF THE HYDROLOGY AND WATER RESOURCES SYMPOSIUM, Perth, 10-12 September. **Institution of Engineers National Conference Publication**, N 79/10. 1979. p. 89-92.

LIU, Z.; DREYBRODT, W. Dissolutions kinetics of calcium carbonate minerals in H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> solutions in turbulent flow: the role of the diffusion boundary layer and the slow reaction H<sub>2</sub>O+CO<sub>2</sub>=H<sup>+</sup>+HCO<sup>-3</sup>. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, 61, p. 2879-2889. 1997.

MANOEL FILHO, J. Ocorrência das Águas Subterrâneas. In: FEITOSA F. A. C.; MANOEL FILHO, J. (Coord). **Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações**. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE. 1997. p. 13-33.

MISI, A. Estratigrafia Isotópica das sequências do Supergrupo São Francisco, coberturas neoproterozoicas do cráton do São Francisco - Idade e correlações. In: PINTO, C. P. e MARTINS-NETO (Org.). **Bacia do São Francisco: geologia e recursos minérios**. Belo Horizonte: SBG/MG, 2001. p. 67-92.

PATRUS, M.L.R.A.; DOS SANTOS, C.S.; FIGUEIREDO, V.L.S.; MATOS, A.R.; MENEZES, I.C.R. Parcela mineira da bacia do rio São Francisco: Caracterização hidroclimática e avaliação dos recursos hídricos de superfície. In: PINTO, C.P.; MARTINS-NETO (Org.). **Bacia do São Francisco: geologia e recursos minérios**. Belo Horizonte: SBG/MG, 2001. p. 09-30.

PEDROSA-SOARES A. C., NOCE C. M., WIEDEMANN C. M., PINTO C. P. The Araçuaí-West Congo orogen in Brazil: An overview of a confined orogen formed during Gondwanland assembly. **Precambrian Research**, v. 110. p. 307-323. 2001.

PALMER, A. N. (1991). Origin and Morphology of Limestone Caves. **Geological Society of American Bulletin**, v.103, p.1-21.

PROJETO JAÍBA. Disponível em:  
<<http://www.projetojaiba.com.br/index.php/paginas/1>>. Acesso em: 20 nov. 2015.

RAUCH H.W. AND WHITE W.B. Lithologic controls on the development of solution porosity in carbonate aquifers. **Water Resources Research**, v.6, p. 1175-1192. 1970.

SANT'ANNA NETO, J. L.; NERY, J. T. Variabilidade e mudanças climáticas no Brasil e seus impactos regionais. In: C. R. G. SOUZA, K. SUGUIO, A.M.S.P. OLIVEIRA, P.E. OLIVEIRA (eds.). **Quaternário do Brasil**. Ribeirão Preto: Holos Editora, 2005, p. 28-51.

SCHOBENHAUS, C. BRITO NEVES, B. B. A Geologia do Brasil no Contexto da Plataforma Sul-Americana. In: BISI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H. **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil**. Serviço Geológico do Brasil – CPRM. Brasília. 2003. 692p.

SOUZA, S. M. T. **Disponibilidades hídricas subterrâneas no Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: HIDROSISTEMAS/COPASA, 1995. 525p.

TÓTH J. A theory of groundwater motion in small drainage basins in Central Alberta. **Journal of Geophysical Research**, v. 67:11, p. 4375-4387.1962.

TÓTH J. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. **Journal of Geophysical Research**, v. 68:16, p. 4795.1963.

TÓTH, J. The evolutionary concepts and practical utilization of the Tóthian Theory of regional groundwater flow. **International Journal of Earth & Environmental Sciences**, v.1:111. P. 1-11. 2016.

UHLEIN, A.; CAXITO, F.A.; SANGLARD, J.C.D.; UHLEIN, G.J.; SUCKAU, G.L.. Estratigrafia das faixas neoproterozoicas da porção norte do Craton do São Francisco. **Geonomos**, v.19, n. 2, p 8-31. 2011.

WILLIAMS, P.W. The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. **Journal of hydrology**, v. 61, p.45-67. 1983.

WILLIAMS, P.W. Subcutaneous hydrology and the development of doline and cockpit karst: **Zeitschrift für Geomorphologie**, v. 29, p.463-482. 1985.



**MINISTÉRIO DO  
MEIO AMBIENTE**

**GOVERNO  
FEDERAL**

