

NOTA TÉCNICA Nº 4/2023/COSUB/SPP  
Documento nº 02500.011852/2023-11

Brasília, 15 de março de 2023

À Superintendente de Planos, Programas e Projetos

**Assunto: Aplicação dos métodos propostos para a definição de áreas relevantes (Hot Spots) para a implementação da gestão integrada rio/aquífero nas Bacias dos rios Paranapanema, Grande e São Francisco. Meta do PGA 2022 COSUB/SPP.**

Referência: 02501.001111/2023

## 1. Introdução

Conforme destacado na Nota Técnica nº 36/2021/COSUB/SIP (Documento nº 02500.036202/2021), o escoamento de base ou vazão de base é a componente do ciclo hidrológico que representa a interdependência entre os aquíferos livres e os corpos d'água superficiais, ou seja, nas situações de perenidade natural, os aquíferos funcionam como um reservatório regularizador das vazões dos rios.

Essa interdependência mostra que os usos e as intervenções sofridas pelos aquíferos refletem nas vazões liberadas aos rios, especialmente nas vazões mínimas, que são justamente as utilizadas como referência para balizar a disponibilidade hídrica superficial na análise dos pleitos de outorga. Assim, problemas de superexploração, contaminação, depleção dos níveis e das recargas dos aquíferos são potenciais ameaças às águas superficiais a eles conectadas. Esse fato mostra a **importância** de que haja **gestão integrada dos recursos hídricos (GIRH)**, em especial em relação às questões quantitativas, foco da presente Nota.

A gestão integrada, conforme definido no documento anterior, representa um conjunto de procedimentos que visam garantir a sustentabilidade hídrica quanto ao aproveitamento integrado das águas superficiais e subterrâneas, de forma **articulada** entre os órgãos gestores de recursos hídricos (Estados e União), com vistas a **compatibilizar os usos de mananciais interdependentes**.

Importante destacar que em algumas regiões, os mananciais subterrâneos se apresentam como reservas estratégicas, especialmente em períodos de estiagem ou em locais com grande comprometimento da qualidade da água superficial. E nesse sentido os aquíferos rasos (aflorantes) são os que apresentam um acesso mais fácil à água potável. Uma vez que esses mananciais estão diretamente conectados com os rios, é necessário **melhorar o conhecimento da interdependência** entre os fluxos superficiais e subterrâneos, com vistas a subsidiar as **ações para a implementação da gestão integrada**, bem como indicar quais **áreas** são **prioritárias** para essa abordagem, ou seja, as porções das bacias onde os rios têm maior dependência dos aquíferos para a manutenção de suas

vazões. Neste estudo se propõe exatamente isso, indicar os *hot spots*, ou seja, as áreas onde os rios são mais fortemente dependentes do escoamento de base para a manutenção de suas vazões.

A melhoria desse conhecimento é ainda mais importante, tendo em vista que em algumas situações de **interdependência entre rios e aquíferos**, verifica-se a **dupla dominialidade do recurso hídrico na mesma bacia hidrográfica**, fato que requer a **atuação integrada e articulada** de órgãos gestores de recursos hídricos **estaduais e da União**. Mesmo nos casos em que a dominialidade é exclusivamente estadual, é necessário o conhecimento dessas **interações**, uma vez que, em geral, as disponibilidades hídricas superficial e subterrânea são avaliadas de forma separada pelos órgãos gestores, ainda que o rio dependa do aquífero para garantir sua perenidade, influenciando diretamente as vazões mínimas referenciais, base para a concessão das outorgas de direito de uso de águas superficiais.

A insuficiência de conhecimento dessas interações incorre em cálculos da disponibilidade hídrica superestimados (em geral, dobrados), considerando o mesmo montante no rio, como fluxo de base e no aquífero, como parcela da reserva reguladora. A implementação da gestão integrada visa evitar situações de conflito que esse problema possa ocasionar, bem como propiciar condições para a construção de balanços hídricos mais robustos e uma maior sustentabilidade hidro ambiental, econômica e social dos recursos hídricos.

Vale ressaltar que a Nota Técnica nº 36/2021/COSUB/SIP definiu as **condições de contorno** para a avaliação das áreas prioritárias para a gestão integrada, quais sejam: aquíferos livres e rios perenes, onde exista conectividade direta entre as águas superficiais e subterrâneas e os rios analisados não apresentem regularização por ação antrópica, ou que esta possa ser abatida de maneira a refletir vazões menos influenciadas por reservatórios. Além dessas condições, também foram considerados recortes climáticos, de forma a excluir áreas do semiárido, por apresentar rios temporários; e regiões com grandes volumes de precipitação distribuídos ao longo do ano, p.e. o norte amazônico e a região litorânea, onde, em geral, a sazonalidade das precipitações não significa o cessar completo ou grandes reduções em seu volume, de forma que o escoamento superficial, mesmo nos períodos de estiagem ainda apresenta importante contribuição pluvial.

O **objetivo** desta Nota Técnica é demonstrar os resultados da aplicação de algumas das metodologias propostas na Nota anterior de forma a indicar as áreas prioritárias para implementação da gestão integrada rio/aquífero nas bacias dos rios Paranapanema (PR/SP), Grande (SP/MG) e São Francisco. Essa avaliação será realizada com base em informações principalmente de hidrologia e hidrogeologia; além de climatologia, relevo e solos, a partir da análise das relações entre vazões mínimas e médias, além de filtros digitais recursivos, a fim de demonstrar e indicar os locais com **conexões mais relevantes** entre rios e aquíferos, ou seja, as **áreas mais sensíveis** do ponto de vista da gestão integrada.

## 2. Justificativas

As justificativas para a indicação das áreas relevantes (*hot spots*) para a implementação da gestão integrada foram exaustivamente apresentadas na Nota Técnica nº 36/2021/COSUB/SIP que também apresenta o **objetivo principal** do estudo, que é o de desenvolver um documento com bases técnicas que **aponte áreas sensíveis** no Brasil do ponto de vista da **relação rio/aquífero** com necessidade efetiva de implementação da gestão integrada, com vistas a orientar os órgãos gestores de recursos hídricos, bem como a própria ANA quando das avaliações de disponibilidades hídricas para outorgas ou na elaboração de planos de bacias.

A análise integrada coaduna com as diretrizes apresentadas na Resolução CNRH Nº 202/2018, que em seu artigo 3º, inciso II, orienta esse tipo de estimativa:

“Art. 3º A gestão integrada de recursos hídricos superficiais e subterrâneos contemplará avaliações hidrológicas integradas e deverá observar, no mínimo, as seguintes diretrizes:

I - Delimitação das áreas de recarga e de contribuição dos aquíferos para os rios diretamente conectados;

II - Estimativa da contribuição dos aquíferos para a vazão de base dos rios;

III - Estimativa da recarga e as reservas exploráveis e renováveis,

IV - Estimativa da disponibilidade hídrica integrada subterrânea e superficial para os diversos usos, considerando os incisos anteriores; e

V - As redes de monitoramento hidrometeorológica e hidrogeológica necessárias.”

1. O objetivo deste estudo é indicar com base na interação rio/aquífero em quais áreas das bacias os rios têm maior dependência das águas subterrâneas (*hot spots*) para a formação de suas vazões, de forma que se possa estabelecer prioridades de ações para a gestão integrada considerando essa interdependência, em especial na avaliação de disponibilidade hídrica para outorgas de águas superficiais e subterrâneas e nas análises de disponibilidade hídrica dos planos de bacia.

As bacias dos rios Paranapanema, Grande (SP/MG) e São Francisco foram escolhidas para avaliação piloto devido a existência de trabalhos anteriores da ANA nestas áreas, o que facilita o levantamento e a checagem das informações. As duas primeiras bacias contaram com a elaboração de Planos Integrados de Recursos Hídricos, que incluíram Diagnósticos Integrados de Águas Superficiais e Subterrâneos (desenvolvidos respectivamente em 2014 e 2015). Ademais, foram alvo de um estudo específico sobre o mesmo tema denominado “*Estudo de Escoamento de Base de Aquíferos aos rios federais e seus tributários estaduais nas bacias hidrográficas dos rios Grande (SP/MG), Paranapanema (SP/PR) e Parnaíba (MA/PI/CE)*”.

A bacia do rio São Francisco, além de já ter plano aprovado (2016-2025), foi alvo de dois estudos hidrogeológicos que abarcaram os principais sistemas aquíferos da bacia e abordaram a relação rio/aquífero desses mananciais em escala regional: os “*Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia (SAU) e de Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada*” (ANA, 2015) e o de “*Hidrogeologia dos Ambientes Cársticos da Bacia do São Francisco para a Gestão dos Recursos Hídricos*” (ANA, 2018). Ademais, duas de suas sub-bacias estão sendo alvo de estudos de detalhe, a do Carinhanha e do Verde Grande, com foco nesses mesmos aquíferos (*Estudos para Implementação da Gestão Integrada de Águas Superficiais e Subterrâneas na bacia Hidrográfica do Rio São Francisco: Sub-bacias dos Rios Verde Grande e Carinhanha - BA/MG*).

### 3. Atividades realizadas para definição das áreas prioritárias para a gestão integrada no Brasil

A definição das áreas prioritárias para a gestão integrada nestas três bacias requereu o desenvolvimento das seguintes atividades:

- levantamento de todas as estações fluviométricas nas 3 bacias;
- as séries foram avaliadas com dados diários e, dentro do possível, consistidos. Entretanto, também foram utilizadas diversas séries com dados brutos, de maneira a não reduzir o já insuficiente número de estações elegíveis;
- exclusão das estações que não possuíam série histórica de no mínimo 10 anos de dados, ou cujos rios recebiam influência de reservatórios;
- delimitação das áreas de contribuição à montante das estações e escolha da estação mais adequada, quando houver sobreposição de suas áreas;
- cálculo das vazões referenciais do período de estiagem ( $Q_7$  e  $Q_{90}$ ), médias ( $Q_{mlt}$  e  $Q_{50}$ ) e das relações entre estas ( $Q_{90}/Q_{50}$ ) e ( $Q_7/Q_{mlt}$ );
- cálculo das áreas de domínio dos aquíferos, vinculadas a cada estação fluviométrica;
- cálculo da contribuição do escoamento de base ao escoamento médio por meio da utilização de filtros digitais recursivos, aplicando a relação  $Q_{90}/Q_{50}$  para o filtro duplo na obtenção do indicador  $Q_{bmax}$ ;
- estabelecimento das faixas de valores obtidos a partir da relação  $Q_7/Q_{mlt}$ , que comporão as áreas mais relevantes para a gestão integrada rio/aquífero;
- consolidação em mapas das diversas faixas estabelecidas, com indicação das áreas prioritárias, bem como as tabelas e resumos associados.

#### 3.1. Análises espaciais e cálculos:

A primeira análise constou do levantamento das estações fluviométricas das 3 bacias hidrográficas no HidroWeb. Em função da insuficiência de estações em algumas regiões considerou-se estações com até 30% de falhas. Levou-se em conta ainda, a sobreposição e ocorrência de concentricidade entre as estações. Neste caso, foram escolhidas as mais representativas geológica e hidrologicamente, em cuja série, os dados sejam mais recentes.

Os cálculos das relações  $Q_{90}/Q_{50}$  e  $Q_7/Q_{mlt}$  foram efetuados de forma automática, reorganizando os dados e inserindo as fórmulas adequadas em planilha Excel. A relação  $Q_{90}/Q_{50}$  foi utilizada na etapa inicial da seleção das estações, de maneira a gerar um quadro preliminar das classes de contribuição do escoamento de base para as vazões superficiais, além de indicativa do valor do teto do escoamento de base quando da aplicação de filtros digitais recursivos, conforme será mostrado adiante.

O estabelecimento final das classes de participação do escoamento de base foi feito a partir da relação  $Q_7/Q_{mlt}$ . Em função da base amostral ter ficado com um número reduzido de estações disponíveis, foram toleradas séries com um período mínimo de oito anos de dados e com um percentual de falhas de até 30%.

A maioria das estações situadas nas calhas dos rios principais foram excluídas da análise por possuírem reservatórios de regularização. No caso dos afluentes algumas estações sob influência de



reservatórios foram analisadas, entretanto, considerou-se o período de dados anterior ao seu enchimento, tomando como referência o período de dados, em geral, até dois anos antes do enchimento.

### 3.2. Análise do fluxo de base com filtros digitais:

Para efeitos de comparação dos resultados foi utilizado o algoritmo denominado FBBrazil, no qual foram selecionadas estações fluviométricas representativas de cada aquífero ou trechos de bacia. O FBB é um conjunto de algoritmos composto de duas rotinas de processamento baseadas em filtros digitais recursivos para a separação do escoamento de base, denominados de Filtro Simples (FS) e Filtro Duplo (FD), por contar com um e dois parâmetros de entrada para a sua aplicação, respectivamente. São aplicadas na mesma interface denominada FBBrazil<sup>1</sup> que permite a aplicação dos dois filtros, ou um deles separado, e a comparação dos resultados numéricos e gráficos. O princípio básico dos filtros digitais consiste em considerar os sinais de alta frequência dos picos dos hidrogramas como sendo indicativos do escoamento superficial direto, enquanto os sinais de baixa frequência são associados com o fluxo de base (Eckhardt, 2005).

Utilizou-se como parâmetros no programa, para o algoritmo do Filtro Simples (FS)<sup>2</sup> o parâmetro de filtragem “a” no valor de 0,925 (Nathan & McMahon, 1990; Arnold *et al.*, 1995), coerente com métodos manuais de separação. Para a análise do Filtro Duplo (FD)<sup>3</sup>, optou-se por utilizar o valor da relação  $Q_{90}/Q_{50}$  para o IFB<sub>max</sub>. Esta relação tem sido considerada representativa da proporção do escoamento superficial originário do armazenamento subterrâneo, ou seja, indica a participação do escoamento de base, sem considerar os efeitos de escala (Smakhtin, 2001; Welderufael & Woyessa, 2010). Uma vez que é baseada em vazões características da curva de permanência, permite uma estimativa inicial razoável e expedita

<sup>1</sup> FBBrazil - Consiste em duas rotinas computacionais aplicadas extensivamente aos dados de vazão, originando curvas de separação dos escoamentos superficial direto e subterrâneo por meio da aplicação de filtros digitais recursivos (FS e FD) utilizando equações com até três variáveis, as quais são ajustadas de forma a estimar o escoamento de base (ANA, 2022).

<sup>2</sup> O FS é dado pela equação 1:  $Q_{fj(i)} = a Q_{fj(i-1)} + (Q_{(i)} - Q_{(i-1)}) \frac{1+a}{2} \rightarrow \begin{cases} Q_{fj(i)} \geq 0 \\ Q_{fj(i)} \leq Q_{(i)} \\ Q_{b(i)} = Q_{(i)} - Q_{f3(i)} \end{cases}$  em que:

$Q_{b(i)}$	=	escoamento de base no instante i, $m^3 s^{-1}$ ;
$Q_{fj(i)}$	=	escoamento filtrado no instante i passo j, $m^3 s^{-1}$ ; e
a	=	parâmetro de filtragem.

<sup>3</sup> A equação 2 representa o algoritmo de filtragem FD, considerado como um modelo geral utilizado na formulação da maioria dos filtros:  $Q_{b(i)} = \frac{(1 - IFB_{max}) k Q_{b(i-1)} + (1 - k) IFB_{max} Q_{(i)}}{(1 - k IFB_{max})}$  em que:

$Q_{b(i)}$	=	escoamento subterrâneo no instante i, $m^3 s^{-1}$ ;
IFB <sub>max</sub>	=	máximo valor do índice de fluxo de base;
k	=	constante do período de recessão;
$Q_{b(i-1)}$	=	escoamento subterrâneo no instante anterior a i, $m^3 s^{-1}$ ; e
$Q_{(i)}$	=	vazão correspondente ao instante i, $m^3 s^{-1}$ .

para a contribuição da parcela de água subterrânea ao escoamento superficial. Para o valor de  $k$  adotou-se o valor de 0,98, além da utilização de dados com 5% de falhas.

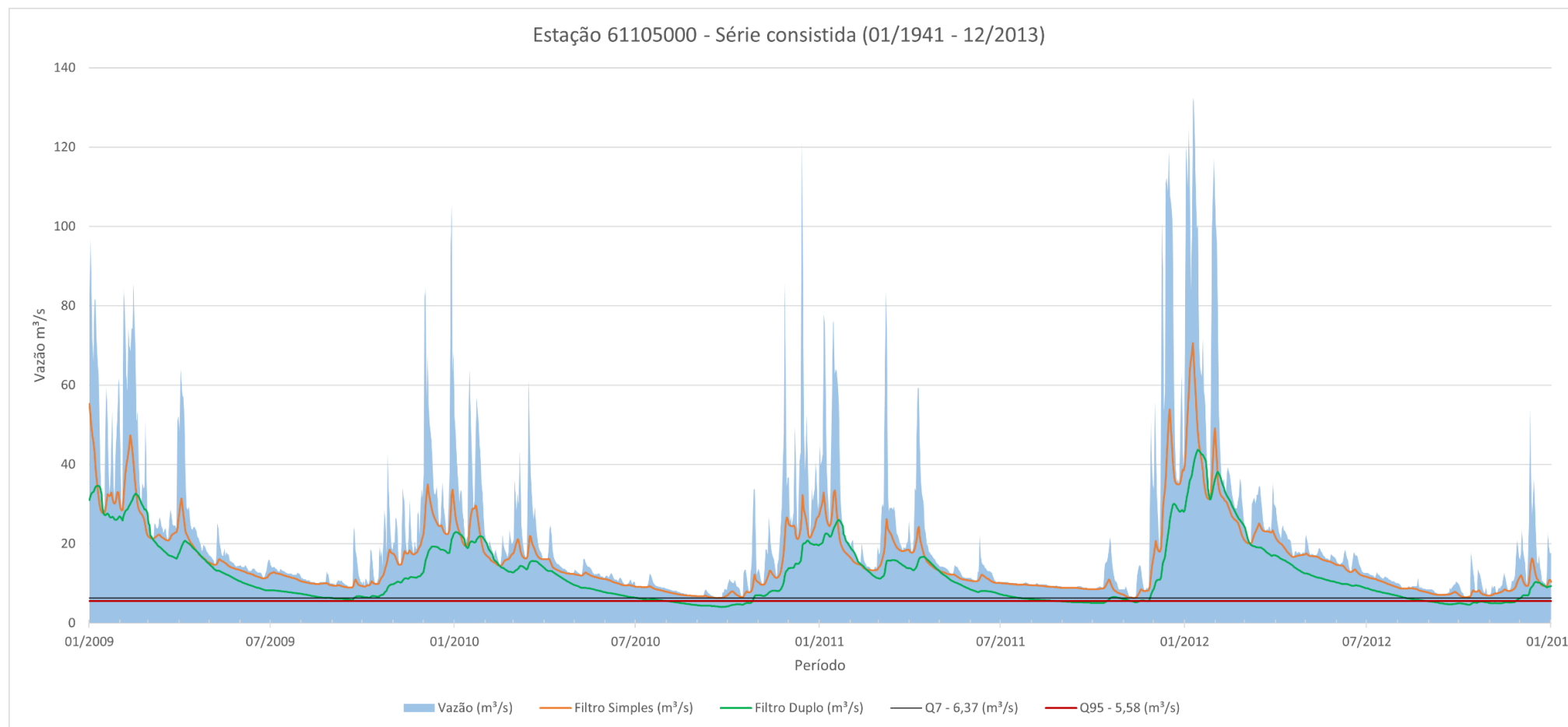
Adicionalmente, foram utilizadas, análises das curvas de recessão, disponíveis em estudos anteriores, de forma a conferir a capacidade reguladora dos aquíferos representados nas áreas de contribuição das estações fluviométricas. Elas auxiliam na comparação com os resultados apresentados nas demais metodologias de avaliação integrada utilizadas no escopo deste estudo.

As estimativas para a contribuição do escoamento de base no escoamento total por meio do FBBrazil foram realizadas, a título de comparação, somente em algumas estações fluviométricas com maiores valores da relação  $Q_7/Q_{mlt}$  ou representativas de sistemas aquíferos.

É importante ressaltar que a relação  $Q_{90}/Q_{50}$  permite uma estimativa inicial razoável e expedita para a contribuição da parcela de água subterrânea ao escoamento superficial. Já relação, a  $Q_7/Q_{mlt}$  expressa a parcela de água entregue pelo aquífero para o rio, considerando que a  $Q_7$  representa um valor conservador para as vazões mínimas, quando comparado com a  $Q_{90}$ , de maneira a gerar informações mais seguras, que são essenciais para a tomada de decisões, especialmente ao se considerar que o horizonte temporal foco compreende justamente o período de estiagem, quando as vazões mínimas constituem o lastro para a maioria das outorgas superficiais. Utilizou-se para análise a relação entre a vazão mínima ( $Q_7$ )<sup>4</sup> e a vazão média de longo termo ( $Q_{mlt}$ ), a qual expressa, de maneira mais moderada, a contribuição das águas subterrâneas na vazão média dos rios. A adoção da razão  $Q_7/Q_{mlt}$  é uma estimativa conservadora frente a  $Q_{90}/Q_{50}$ , bem como aos principais filtros digitais recursivos. Ambas são utilizadas para avaliar a relação rio/aquífero com base em dados de “saída” do “sistema”, considerado aqui como formado por aquíferos livres e conectados com os corpos d’água superficiais; de outra forma, a parcela de água entregue pelo aquífero para o rio. Cabe destacar que os resultados da razão  $Q_7/Q_{mlt}$ , são bem mais conservadores do que os expressos nos filtros digitais, uma vez que a vazão calculada por esse indicador materializa um valor mínimo, linear durante um ano hidrológico, diferentemente dos filtros digitais recursivos, que em geral suprimem as vazões mais elevadas, mantendo um certo “paralelismo” entre as curvas de distribuição do escoamento de base e da vazão total no tempo, incorporando no escoamento de base trechos do hidrograma descartados na  $Q_7$  em função da mesma ser uma constante (reta) paralela ao eixo x, diferentemente da equação envoltória obtida nos filtros recursivos, conforme pode ser visto na **Figura 1**.

---

<sup>4</sup> A vazão mínima ( $Q_7$ ) 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. Em sendo a vazão mínima das médias móveis de sete dias, considerada ano a ano, representa a contribuição subterrânea, uma vez que é medida em época de baixas vazões, ou seja, durante a estiagem, quando a vazão superficial é mantida pelo fluxo de base.



**Figura 1.** Hidrograma exemplificativo das diferenças entre a vazão mínima  $Q_7$  e os filtros digitais recursivos (Filtros Simples e Duplo).

### 3.3. Elaboração de mapas e tabelas resumo:

A relação -  $Q_7/Q_{mlt}$  – foi separada em 05 (cinco) classes de valores (**Quadro 1**), de modo a expressar graus distintos de participação do escoamento de base ( $Q_7$ ) na formação da vazão média ( $Q_{mlt}$ ) indicando a maior ou menor importância dos aquíferos para formação das vazões dos rios. Assim, trechos de rios e, portanto, de sub-bacias, onde essa relação é maior, como 0,5, p.e. demandam mais atenção na gestão integrada, uma vez que qualquer retirada mais significativa de águas subterrâneas da reserva reguladora poderá causar impactos negativos relevantes na vazão outorgável de águas superficiais.

**Quadro 1.** Segmentação de classes na relação  $Q_7/Q_{mlt}$ .

Classes $Q_7/Q_{mlt}$
$Q_7/Q_{mlt} < 0,3$
$0,3 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,4$
$0,4 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,5$
$0,5 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,6$
$Q_7/Q_{mlt} \geq 0,6$

### 3.4. Bacias piloto:

#### 3.4.1. Bacia do Rio Paranapanema

##### Contexto Hídrico e Fisiográfico

A Bacia Hidrográfica do Rio Paranapanema está localizada entre os estados do Paraná e São Paulo, em um território de 106,5 mil km<sup>2</sup>. O rio de mesmo nome localiza-se na divisa entre esses estados e tem sua nascente principal na Serra de Agudos Grandes, no sudeste de São Paulo, a cerca de 100 km da Costa Atlântica. Do ponto de vista geológico e geomorfológico, as nascentes da UGRH Paranapanema localizam-se em terrenos cristalinos denominados, genericamente, de Planalto Atlântico, com baixas declividades. De maneira geral, as maiores altitudes (em torno de 1.363 m) localizam-se no setor oriental da bacia, e vão diminuindo em direção ao rio Paraná, apresentando 185 m de altitude na foz do rio Paranapanema (ANA, 2021).

Com relação ao clima, as temperaturas médias anuais diminuem em função do aumento da latitude e em função da continentalidade. Desse modo, são inferiores a 18°C no sul e sudeste da UGRH e superiores a 21°C no norte e noroeste (UNESP, 2009 *apud* ANA, 2021). A precipitação média na UGRH é de 1.450 mm e pode apresentar períodos significativamente mais secos ou úmidos quando da ocorrência dos fenômenos *El Niño* e *La Niña*, em maior intensidade.

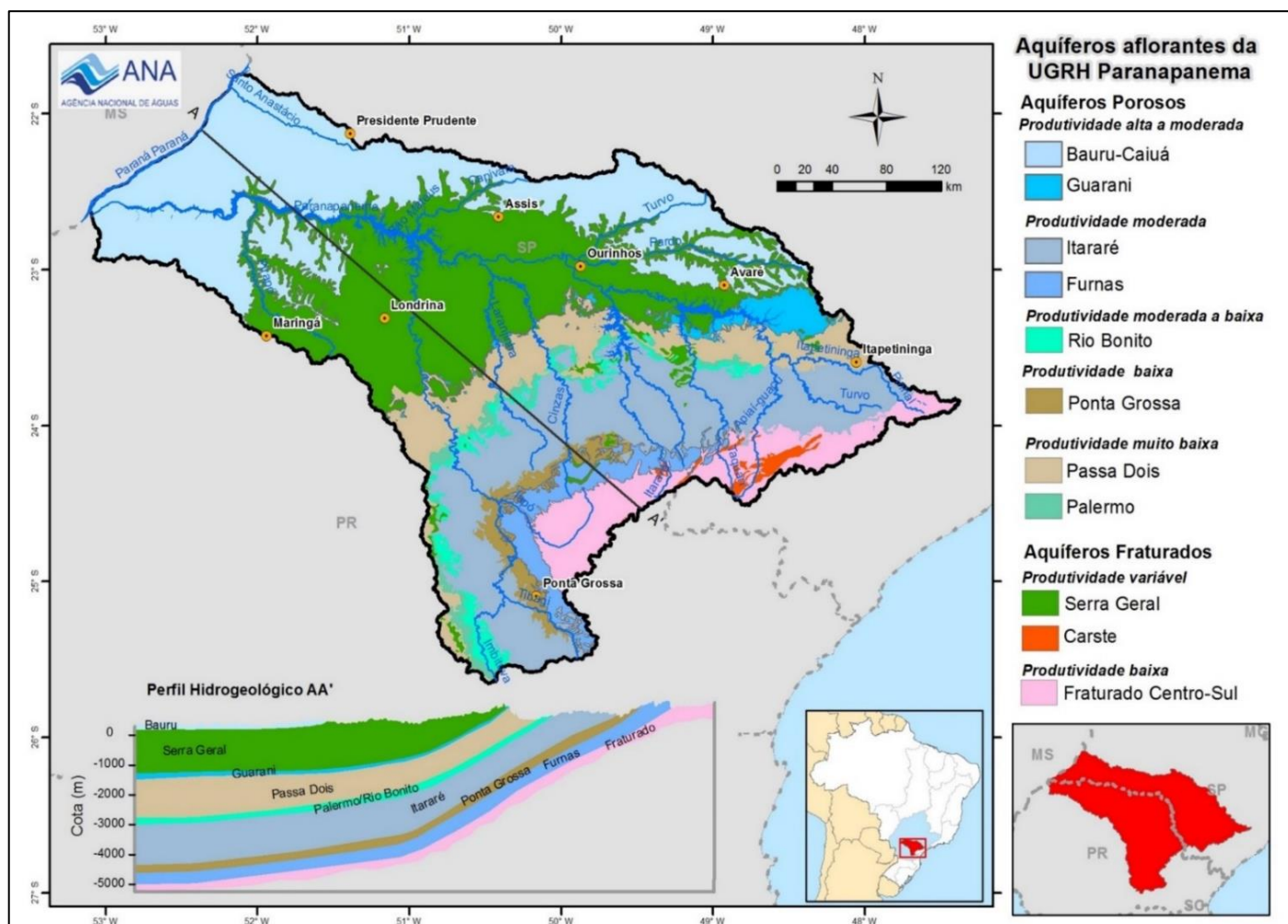
Segundo ANA (2021) a localização geotectônica da UGRH Paranapanema alonga-se desde as rochas ígneas e metamórficas da Província da Mantiqueira (em sua porção de montante) adentrando a espessa sequência sedimentar da bacia do Paraná (em sua porção de jusante). Nessa transição de leste a oeste, praticamente todas as unidades litoestratigráficas que compõe a referida bacia sedimentar desenvolvem áreas de afloramento, com mergulho para oeste (para o epicentro da bacia, lhes conferindo graus de confinamento crescentes). Em sua porção de jusante, observa-se extensas e

espessas coberturas de rochas sedimentares mais recentes, que constituem os melhores aquíferos da região.

Do ponto de vista hidrogeológico os sistemas aquíferos na área da bacia incluem sistemas aquíferos porosos, fraturados e cársticos (**Figura 2**). As unidades sedimentares de composição predominantemente arenosa formam aquíferos importantes, e ocupam a maior superfície areal da bacia (55%), dentre os quais se destacam os sistemas aquíferos Bauru-Caiuá, Guarani, Rio Bonito, Itararé e Furnas. Os aquíferos fraturados, por sua vez, ocupam 32% da área da bacia e são representados pelo Sistema Aquífero Serra Geral e o Aquífero Fraturado Centro-Sul, enquanto o tipo cárstico, com menos de 1%, é representado pelo Carste. O Aquífero Castro foi associado ao Fraturado Centro-Sul no mapa, haja vista sua pequena representatividade na bacia. Completando as demais unidades geológicas presentes na bacia, representando cerca de 12% da área total, o Grupo Passa Dois e a Formação Palermo, as quais possuem composição argilosa e potencial hidrogeológico muito baixo, são nessa região classificados como aquitardes (material quase impermeável). As rochas da Formação Ponta Grossa constituem uma unidade hidrogeológica de baixa produtividade.

Conforme se observa no mapa hidrogeológico da **Figura 2**, as áreas de afloramento dos aquíferos dispõem-se normalmente em faixas de direção nordeste, com inflexão para noroeste na região da unidade de gestão de Piraponema, região sudeste da bacia hidrográfica. Essas unidades arranjam-se em subsuperfície de forma que a unidade geologicamente mais nova está sobreposta à unidade mais antiga e assim subsequentemente até atingir as rochas do embasamento da bacia geológica do Paraná que representam o Aquífero Fraturado Centro-Sul e o Carste. Esse comportamento em profundidade pode ser observado no Perfil Hidrogeológico AA' no escopo do mapa da **Figura 2**.

A produtividade dos sistemas aquíferos dessa região é bastante variável, caracterizada no mapa qualitativamente em função das características das rochas que os compõem e ainda relacionada às vazões dos poços que exploram águas nessas unidades (**Quadro 2**). Os sistemas aquíferos de natureza granular ou porosos apresentam produtividade que variam de alta a moderada (Bauru-Caiuá e Guarani); moderada (Itararé e Furnas); moderada a baixa (Rio Bonito); baixa (Ponta Grossa) até de produtividade muito baixa (Passa Dois e Palermo). Aqueles de natureza fissural ou fraturados a produtividade é variável (Serra Geral e Carste) e baixa (Fraturado Centro-Sul).



**Figura 2.** Mapa de aquíferos da bacia do rio Paranapanema, sua localização em relação aos estados do PR, SP e MS e Perfil Hidrogeológico AA' (ANA, 2014).

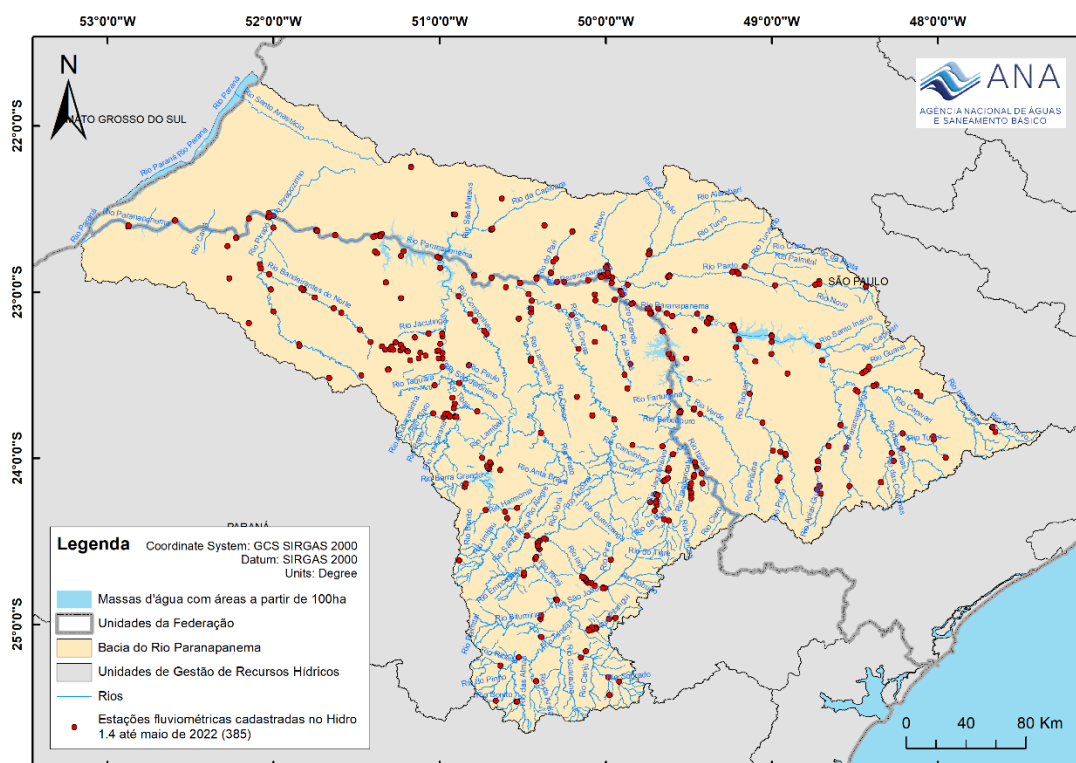
**Quadro 2.** Sistemas Aquíferos e demais unidades geológicas no Mapa de Aquíferos Aflorantes do Brasil (ANA, 2013), e nos estados de São Paulo (DAEE *et al.*, 2005) e Paraná (ÁGUASPARANÁ, 2010b) *apud* ANA, 2014.

SISTEMAS AQUÍFEROS NA BACIA DO RIO PARANAPANEMA				
Sistema Aquífero	Área aflorante (km <sup>2</sup> )	% área da bacia	Classificação	Produtividade
<i>Porosos</i>				
<b>Bauru-Caiuá</b>	29.572,18	27,74	Aquífero	Alta a moderada
<b>Guarani</b>	2.898,58	2,72	Aquífero	Alta a moderada
<b>Passa Dois</b>	8.953,35	8,4	Aquitarde	Muito baixa
<b>Palermo</b>	1.782,83	1,67	Aquitarde	Muito baixa
<b>Rio Bonito</b>	2.131,62	2,00	Aquífero	Moderada a baixa
<b>Itararé</b>	19.293,91	18,10	Aquífero	Moderada
<b>Ponta Grossa</b>	2.119,85	1,99	Aquífero	Baixa
<b>Furnas</b>	4.261,55	4,00	Aquífero	Moderada
<i>Fraturados</i>				
<b>Serra Geral</b>	27.528,16	25,83	Aquífero	Variável
<b>Fraturado Centro-Sul</b>	7.295,59	6,84	Aquífero	Baixa
<i>Cárstico</i>				
<b>Carste</b>	750,18	0,70	Aquífero	Variável

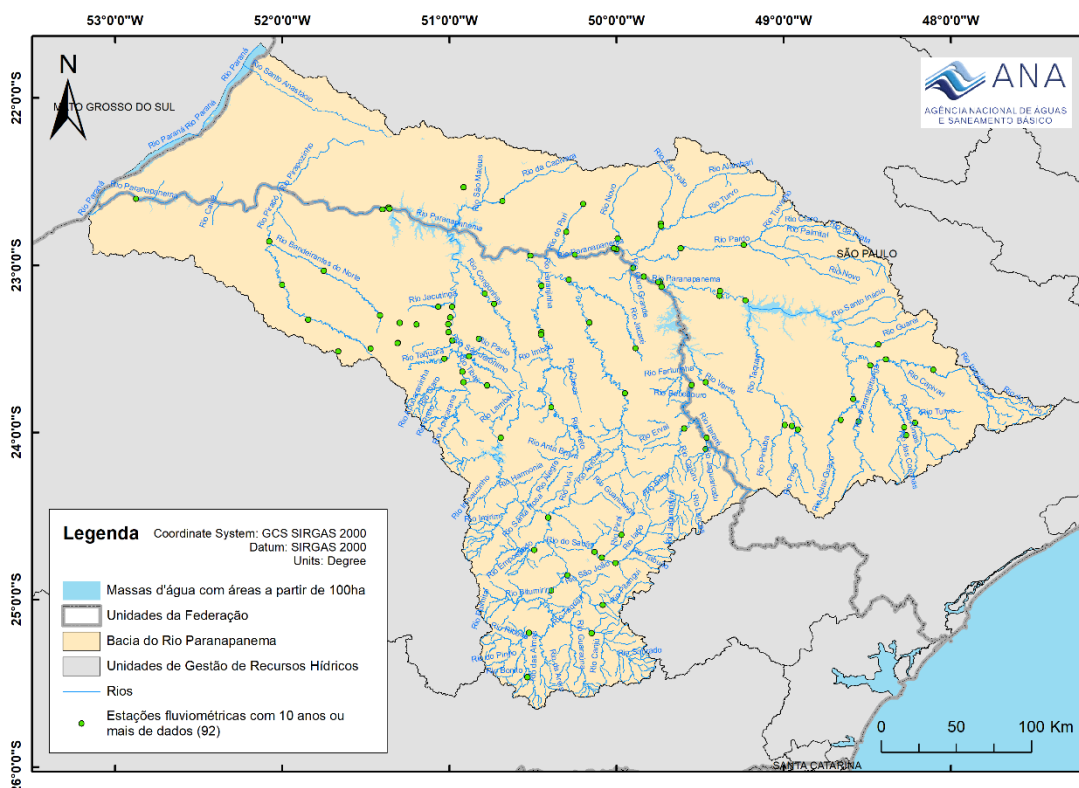
Áreas relevantes (“hot Spots”) para a gestão integrada rio/aquífero

A seleção de estações fluviométricas na bacia do rio Paranapanema foi feita por meio de uma pesquisa inicial no universo de estações cadastradas na base do Hidro 1.4 em maio/2022 que apresentava **385 estações (Figura 3)**, considerando um período mínimo de 10 anos de dados. Esse primeiro filtro resultou em uma **pré-seleção de 92 estações (Figura 4)**.





**Figura 3.** Estações fluviométricas da Bacia do Rio Paranapanema, conforme o Hidro 1.4.



**Figura 4.** Estações pré-selecionadas na Bacia do Rio Paranapanema, com 10 anos ou mais de dados.

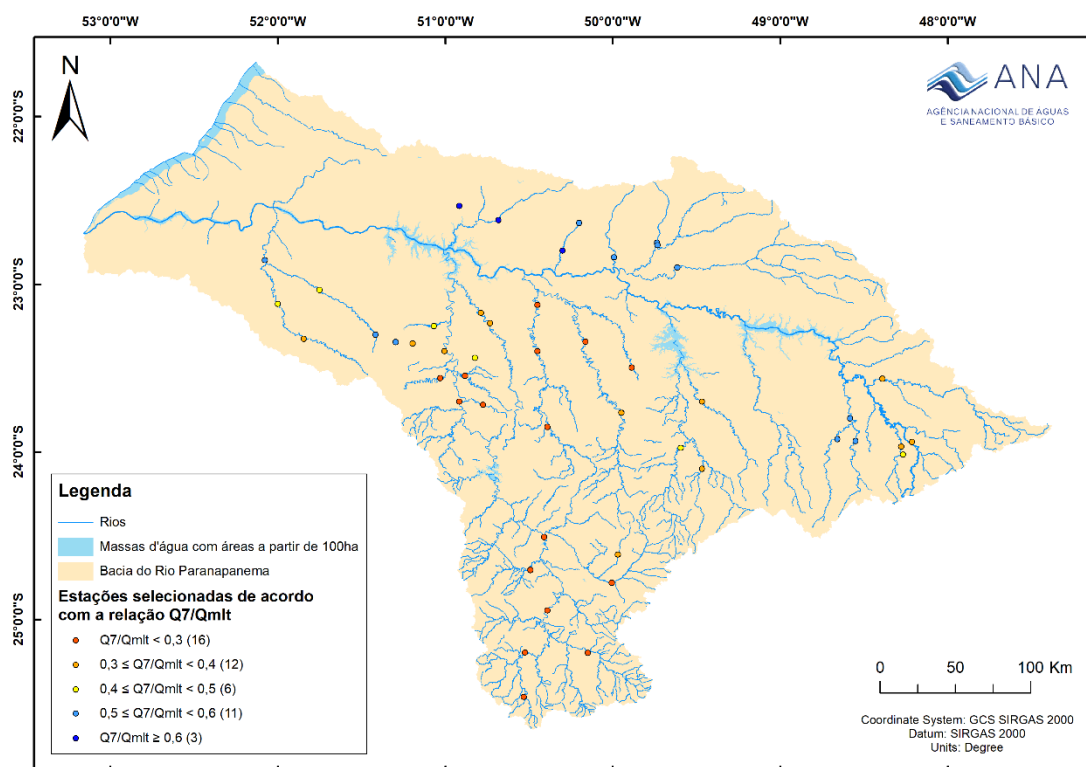


Posteriormente, foram descartadas mais 44 estações, com base em alguns critérios como: influência de reservatórios, eliminação de sobreposições, entre outros, restando **48 estações** para a presente análise, as quais cobrem mais de 52% da área da bacia do rio Paranapanema.

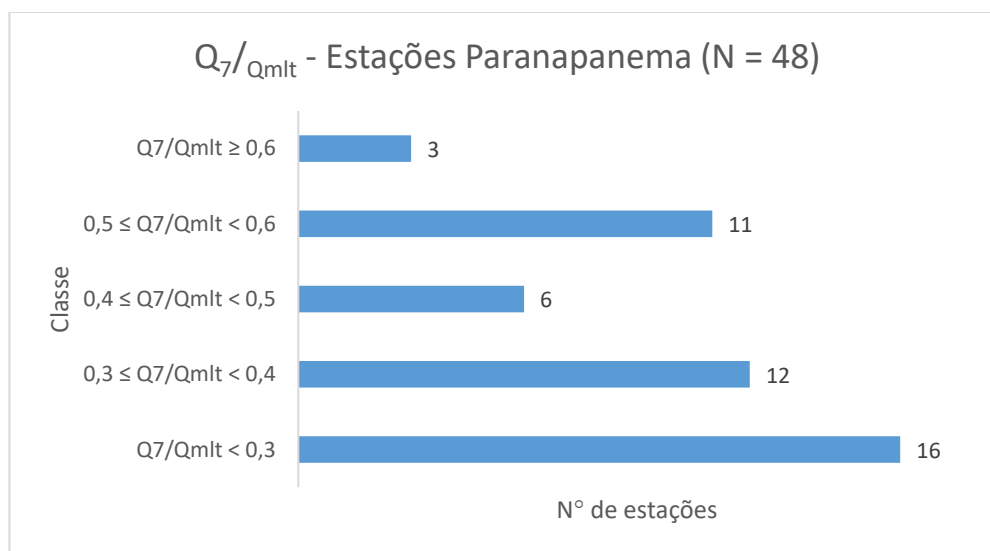
Abaixo são apresentados a sequência de descartes de estações realizadas na bacia do Paranapanema:

- a) Devido à influência de usos significativos à montante, 2 (duas) estações no leito do rio Paranapanema foram excluídas;
- b) Exclusão de 13 (treze) estações devido à influência de aproveitamentos hidrelétricos (Colônia do Barro Preto, UHE Jurumirim Barramento, UHE Piraju, UHE Chavantes Barramento, UHE Ourinhos, UHE Salto Grande, UHE Canoas Barramento, UHE Capivara Andirá, Represa Alagados, UHE Ribeirão das Antas/ Jayme Canet Junior, ETA Arapongas, UHE Capivara Jataizinho, UHE Capivara Barramento, UHE Capivara Jusante e UHE Rosana Barramento);
- c) 20 (vinte) estações foram excluídas por sobreposição/ concentricidade com outras;
- d) Exclusão de estações duplicadas, como se fossem estações diferentes ou com operadores diferentes (Buri, Itapeva, Santa Cruz do rio Pardo e UHE Canoas II Barramento);
- e) Exclusão de 5 (cinco) estações com dados de  $Q_7$  ou  $Q_{mlt}$  inferiores à 8 anos.

Assim, das 48 estações selecionadas a maior parte das relações  $Q_7/Q_{mlt}$  se enquadra na classe  $Q_7/Q_{mlt} < 0,3$  (16 estações), seguidas das classes  $0,3 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,4$  (12 estações), da  $0,5 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,6$  (11 estações), da  $0,4 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,5$  (6 estações) e da  $Q_7/Q_{mlt} \geq 0,6$  (3 estações), ou seja, ***em 29% das estações a contribuição do fluxo de base supera 50% da vazão média do rio, e podem ser consideradas, a princípio, as mais prioritárias para a implementação integrada da gestão rio/aquífero*** (Figuras 5 e 6).



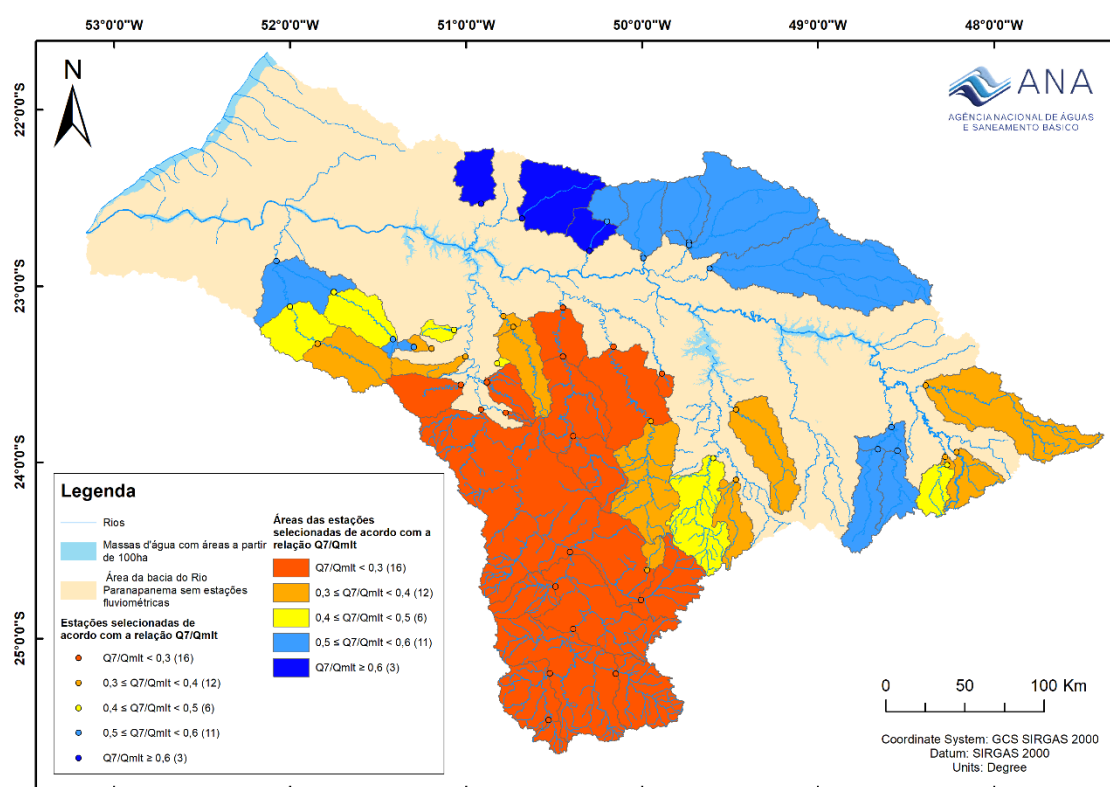
**Figura 5.** Classes das relações  $Q_7/Q_{mIt}$  nas estações fluviométricas selecionadas na bacia do rio Paranapanema.



**Figura 6.** Representação gráfica da porcentagem relativa ao número de estações fluviométricas analisadas na bacia do rio Paranapanema em cada uma das classes de relevância ( $Q_7/Q_{mIt}$ ).

Ao se analisar a área total coberta pelas estações selecionadas (**Figura 7**), em relação à cada uma das classes chega-se a seguinte distribuição:

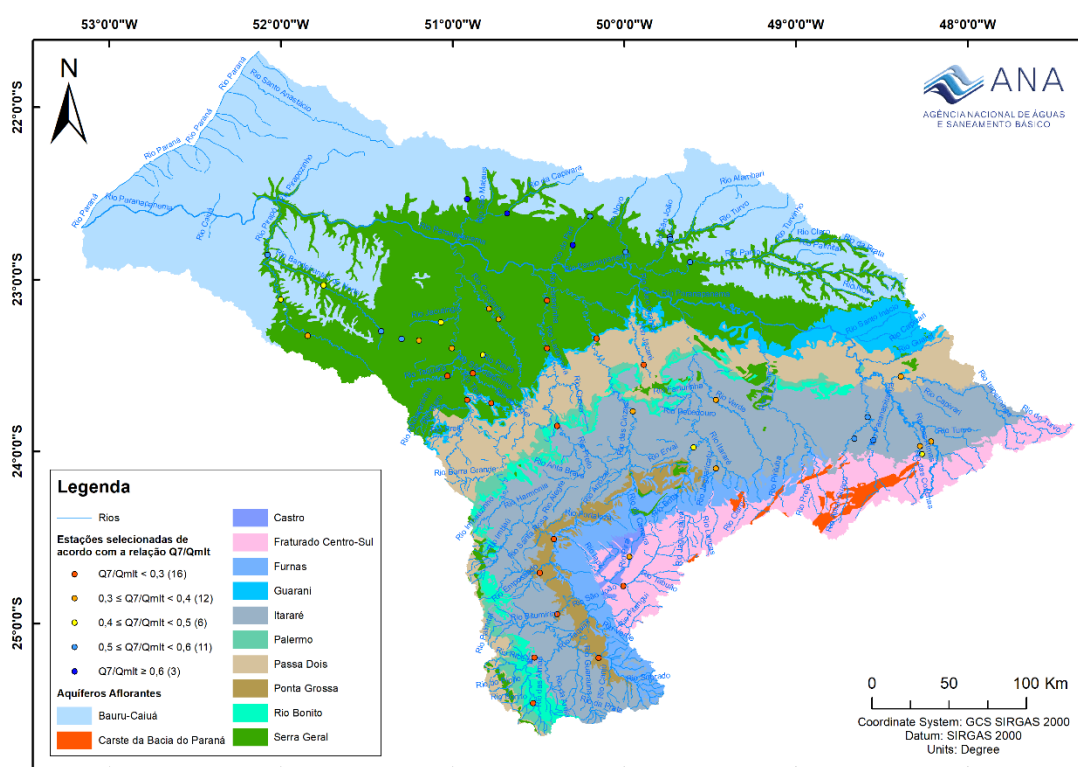
- a classe  $Q_7/Q_{mlt} < 0,3$  representa 58,5%, ficando as estações restritas às áreas sul e central da bacia;
- as estações da classe  $0,3 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,4$  ocorrem de forma bastante distribuída, correspondendo mais de 13%;
- as estações da classe  $0,5 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,6$  representam um pouco mais de 20%, estando localizadas nas porções oeste, nordeste e sudeste;
- com uma área significativamente menor as estações com as classes  $0,4 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,5$  e  $Q_7/Q_{mlt} \geq 0,6$  representam quase 4% aparecendo, o primeiro conjunto no centro-sul, a oeste e leste e o segundo restrito ao meio norte da bacia.



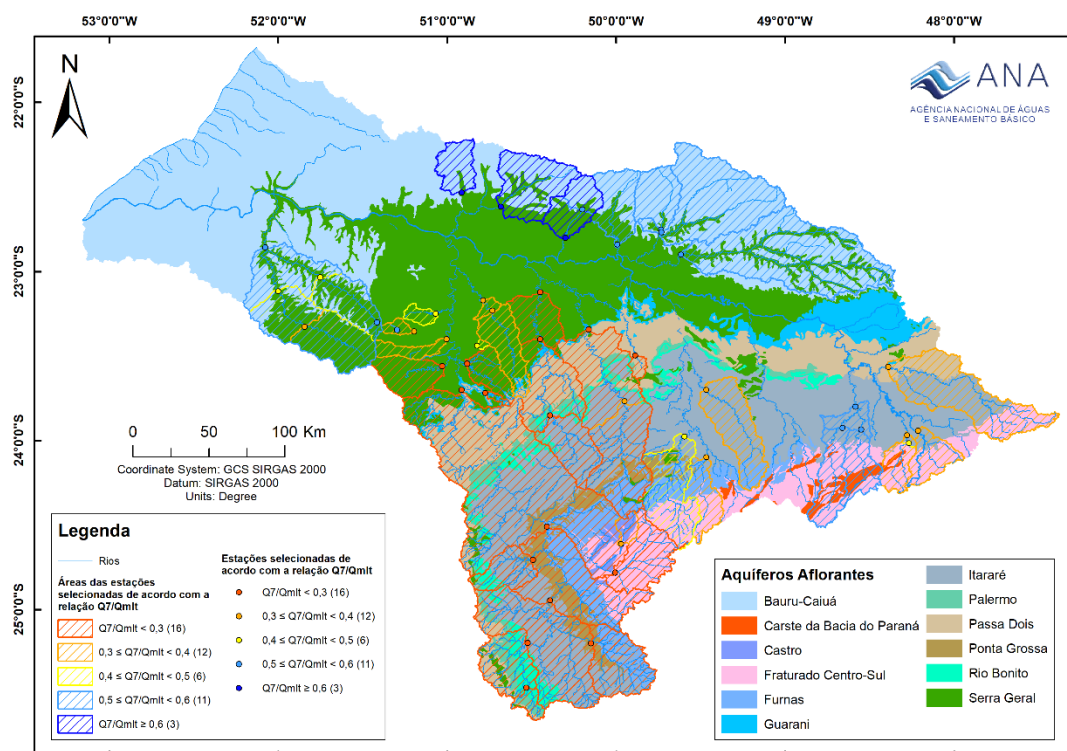
**Figura 7.** Classes das relações  $Q_7/Q_{mlt}$  nas áreas de contribuição das estações fluviométricas selecionadas na bacia do rio Paranapanema.

Do ponto de vista da correlação da hidrologia com a hidrogeologia, conforme pode ser observado nas **Figuras 8 e 9**, no **Sistema Aquífero Bauru Caiuá** (SABC) não houve grande variação de classes, permanecendo na faixa de maior que 50% de contribuição (classes  $0,5 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,6$  e  $Q_7/Q_{mlt} \geq 0,6$ ). Já o **Sistema Aquífero Serra Geral** (SASG) teve uma grande variação (classes  $Q_7/Q_{mlt} < 0,3$  a  $0,5 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,6$ ), o que já era esperado dado o seu comportamento anisotrópico. Não foi possível verificar a relevância do Sistema Aquífero Guarani (SAG) na bacia, devido à ausência de estações representativas, mas na bibliografia há indicações de que é um importante sistema na contribuição do fluxo de base para os rios. Em relação ao **Sistema Aquífero Itararé** (SAIt) também houve uma grande

variação (classes  $Q_7/Q_{mlt} < 0,3$  a  $0,5 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,6$ ), mas observou-se um certo padrão. Nas estações onde ocorre associado aos aquíferos Ponta Grossa (SAPG), Furnas (SAFu) e Itararé, a classe foi mais baixa (classe  $0,3 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,4$ ), junto apenas ao Furnas e Itararé a classe passou a ser somente  $0,3 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,4$ , e havendo Fraturado Centro-Sul (SAFCS), Carste e Itararé houve uma boa melhoria na capacidade de alimentação dos rios (classe  $0,5 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,6$ ), provavelmente, devido ao grande potencial das rochas carbonáticas em contribuir para os rios. Embora com menor percentual de área de Itararé, esse percentual tende a diminuir ( $0,4 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,5$  e  $0,3 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,4$ ). Já em relação à associação Fraturado Centro-Sul, Itararé e Fraturado a relação permaneceu na faixa anterior, mais inferior.



**Figura 8.** Classes das relações  $Q_7/Q_{mlt}$  nas estações fluviométricas selecionadas na bacia do rio Paranapanema em relação aos sistemas aquíferos.



**Figura 9.** Classes das relações  $Q_7/Q_{mlt}$  nas áreas de contribuição das estações fluviométricas selecionadas na bacia do rio Paranapanema em relação aos sistemas aquíferos.

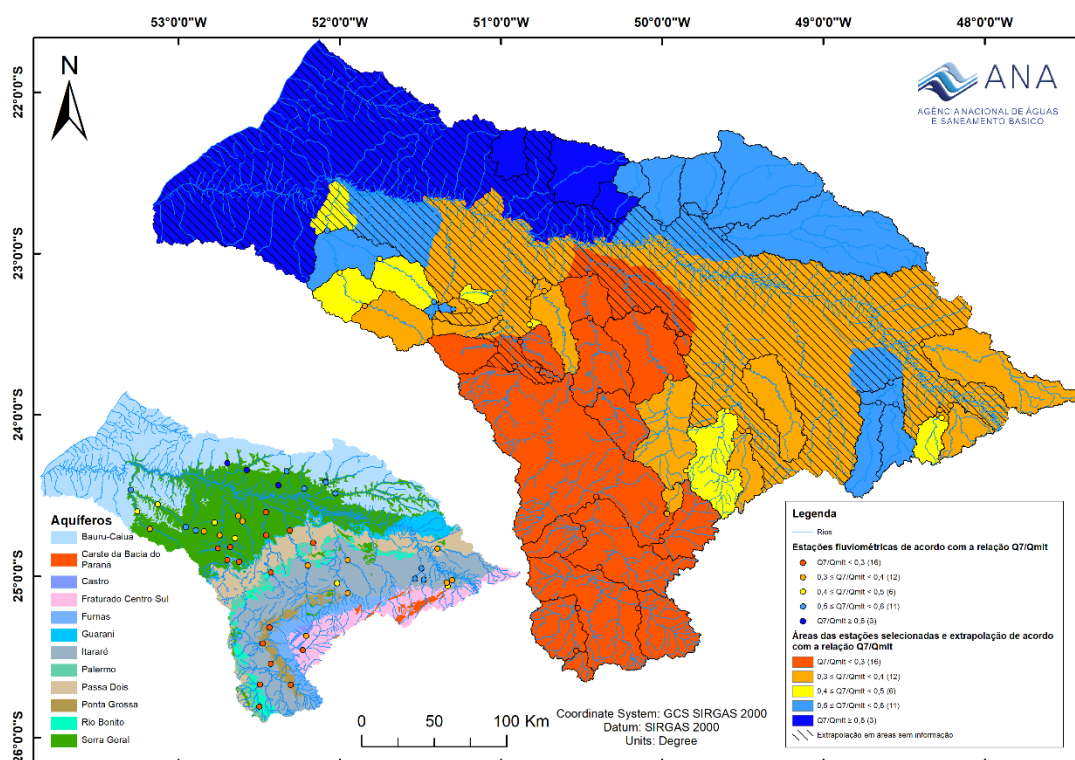
#### Extrapolção das classes de relevância para a área sem dados

A partir das associações entre classe de relevância e aquíferos observadas nas áreas das estações fluviométricas, fez-se a extrapolção para as demais áreas da bacia não cobertas por estações fluviométricas ou com séries bastante alteradas pela presença de reservatórios, cenário comum no rio principal da bacia. Além do mapa hidrogeológico, outras informações complementares disponíveis no banco de dados do plano da bacia foram consultadas, como geologia, hidrologia, declividade, pedologia e pluviometria de maneira a qualificar as extrapolções efetuadas. A partir da identificação de áreas com características semelhantes, as seguintes extrapolções, apresentadas na **Figura 10**, foram realizadas:

- Na área noroeste, com ampla ocorrência do Sistema Aquífero Barú-Caiuá e franjas de basalto, extrapolou-se toda a região para a classe  $Q_7/Q_{mlt} \geq 0,6$ , uma vez que já havia o indicativo de grandes contribuições do escoamento de base para o rio Paranapanema nas 3 estações selecionadas (região centro norte);
- Na área nordeste, com geologia similar, onde as estações selecionadas foram classificadas como  $0,5 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,6$  extrapolou-se para esta classe toda a região ao sul destas até o rio Paranapanema;
- Na região oeste onde uma estação também foi classificada nesta classe foi feita a extrapolção de outra estação para esta mesma classe, uma vez que a litologia é a mesma;
- A sul e oeste destas áreas uma e duas estações foram classificadas como  $0,3 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,4$ , sobre os basaltos do Sistema Aquífero Serra Geral. E mais a oeste no sentido NW-SE também foi categorizada nesta classe. Toda a região entre estas estações e até o limite

norte com o rio Paranapanema foi extrapolado para esta mesma classe (as áreas não classificadas anteriormente);

- e) Mais a sul deste conjunto diversas estações foram rotuladas na classe  $Q_7/Q_{mlt} < 0,3$ . A região da parte mais ocidental foi extrapolada até o rio Paranapanema para a mesma classe, e a mais oriental até o limite das áreas da classe  $0,3 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,4$ ;
- f) Na região sudeste (à direita da estação classe  $0,4 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,5$ ), onde ocorrem os sistemas aquíferos Itararé, Fraturado Centro-Sul e Carste da bacia do Paraná a maior parte das estações foram classificadas como  $0,3 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,4$ , tendo este valor sido extrapolado na região (exceto nas áreas anteriormente classificadas);
- g) Na região sudeste, à norte da estação classificada como  $0,5 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,6$ , as duas estações foram extrapoladas para a mesma classe. Embora apresente a mesma geologia do item anterior, a maior ocorrência de carste a justifica.
- h) Toda a região mais a norte (no sentido do rio Paranapanema) foi extrapolada para a classe  $0,3 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,4$ , uma vez que nesta região ocorrem aquíferos que não apresentam contribuições representativas para o fluxo de base (SA Itararé, SA Rio Bonito e SA Passa Dois).

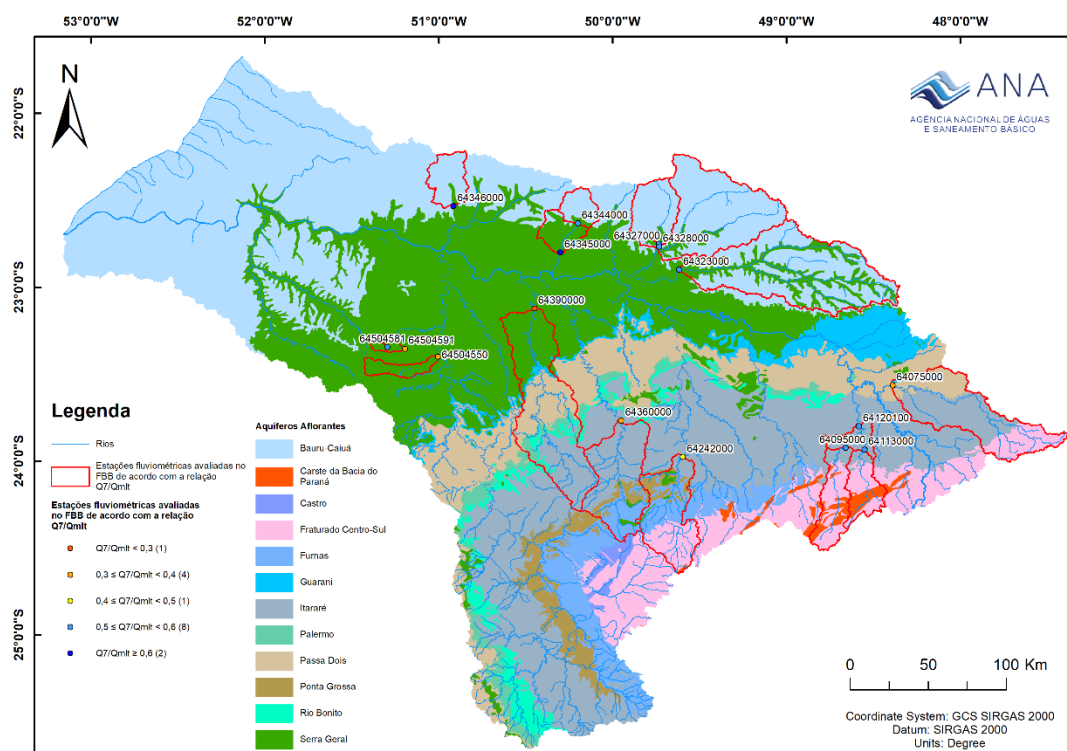


**Figura 10.** Mapa com todas as extrapolações de classes das relações  $Q_7/Q_{mlt}$  nas áreas de contribuição das estações fluviométricas selecionadas na bacia do rio Paranapanema e detalhe mostrando os sistemas aquíferos.



### Separação do Escoamento de base por filtros digitais recursivos (FBBrasil)

Em **16 estações** da bacia do rio Paranapanema foram **aplicados filtros digitais** para a separação do escoamento subterrâneo em hidrogramas. Para tanto utilizou-se a ferramenta **FBBrasil**, que utiliza modelos de separação de fluxo denominados Filtro Simples (FS) e Filtro Duplo (FD). Utilizou-se como parâmetros de entrada no programa, para o algoritmo do Filtro Simples (FS) o parâmetro de filtragem “a” no valor de 0,925; para o Filtro Duplo (FD), o parâmetro “k” no valor de 0,98 e o IFBmax no valor obtido para a relação  $Q_{90}/Q_{50}$  da estação. As estações selecionadas estão apresentadas na **Figura 11** e listadas na **Tabela 1**, sendo 3 representativas do Sistema Aquífero Serra Geral, 1 do Sistema Aquífero Itararé (SAIt) e 6 do conjunto Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) e Sistema Aquífero Bauru-Caiuá (SABC).



**Figura 11.** Estações avaliadas no FBBrasil na Bacia do Paranapanema.

**Tabela 1.** Comparativo dos resultados dos parâmetros obtidos no FBBrazil e nos cálculos das relações de vazões mínimas e médias.

Código	Nome	Área (km <sup>2</sup> )	IFB FS	IFB FD	Q <sub>90</sub> /Q <sub>50</sub>	Q <sub>7</sub> /Q <sub>mlt</sub>
64075000	Angatuba	2.520,00	0,82	0,54	0,48	0,35
64095000	Taquarivaí	952,00	0,76	0,62	0,64	0,54
64113000	Ponte Marcolino Nunes	707,00	0,78	0,64	0,61	0,55
64120100	Buri	2.020,00	0,79	0,63	0,64	0,53
64242000	Tamanduá	1.680,00	0,70	0,55	0,56	0,40
64323000	Santa Cruz do Rio Pardo	4.190,00	0,82	0,65	0,62	0,54
64327000	São Pedro do Turvo	891,00	0,74	0,66	0,51	0,69
64328000	São Pedro do Turvo (DAEE)	3.890,00	0,77	0,56	0,56	0,55
64344000	Platina	427,00	0,79	0,69	0,71	0,71
64345000	Sucui	648,00	0,83	0,66	0,61	0,61
64346000	Agice	649,00	0,87	0,68	0,70	0,74
64360000	Tomazina	2.020,00	0,76	0,45	0,39	0,27
64390000	UHE Capivara Porto Santa Terezinha	3.386,00	0,53	0,54	0,37	0,20
64504550	Apertados	331,00	0,83	0,52	0,47	0,35
64504581	Jusante do Ribeirão Ciclone	47,20	0,92	0,71	0,69	0,59
64504591	Londrina Mte. ETA Sanepar	134,00	0,85	0,55	0,51	0,38

IFB FS – Índice de fluxo de base médio com base anual calculado pelo Filtro Simples; IFB FD – Índice de fluxo de base médio com base anual calculado pelo Filtro Duplo.

Ao comparar a relação entre a vazão dada pela razão  $Q_7/Q_{mlt}$  e os *IFBs* (Índices de Fluxo Subterrâneo) obtidos pelos filtros digitais, observa-se, que de forma geral, os **índices obtidos pelo FS e pelo FD são superiores àqueles obtidos na relação  $Q_7/Q_{mlt}$** , o que já era esperado, uma vez que esta é mais conservadora, conforme já indicado inicialmente.

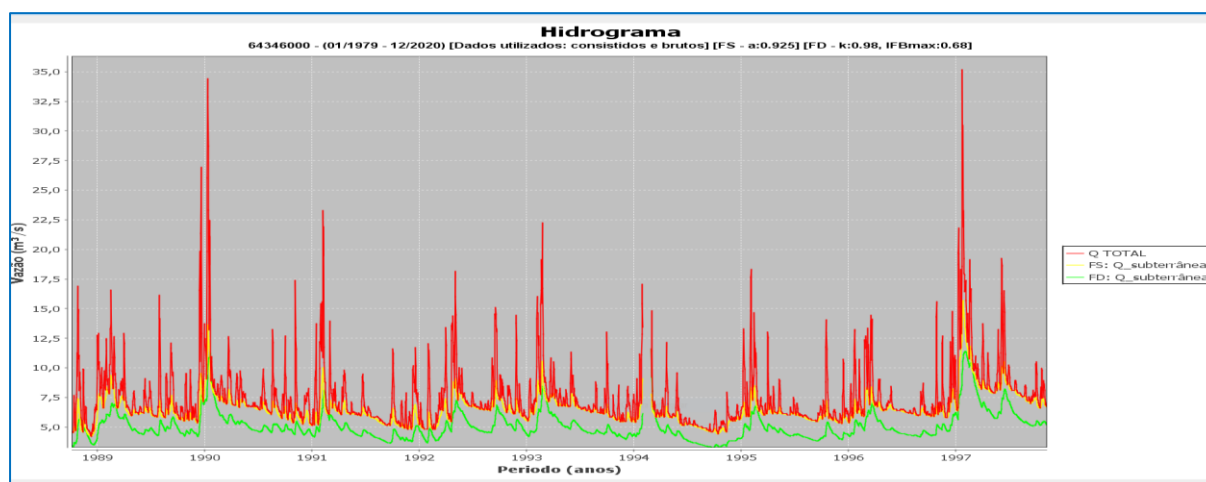
A relação  $Q_7/Q_{mlt}$  na estação Platina (64344000) se destacou com valor de 0,71, tendo sido classificada como classe  $Q_7/Q_{mlt} \geq 0,6$ , que é condizente com o que já que ocorre sobre o Sistema Aquífero Bauru-Caiuá e basaltos da Formação Serra Geral. No **Quadro 3** abaixo é apresentada a quantidade de estações em cada classe.

**Quadro 3.** Quantidade de estações para cada classe da relação  $Q_7/Q_{mlt}$ .

Classes $Q_7/Q_{mlt}$	Número de estações
$Q_7/Q_{mlt} < 0,3$	1
$0,3 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,4$	4
$0,4 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,5$	1
$0,5 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,6$	8
$Q_7/Q_{mlt} \geq 0,6$	2
<b>Total</b>	<b>16</b>

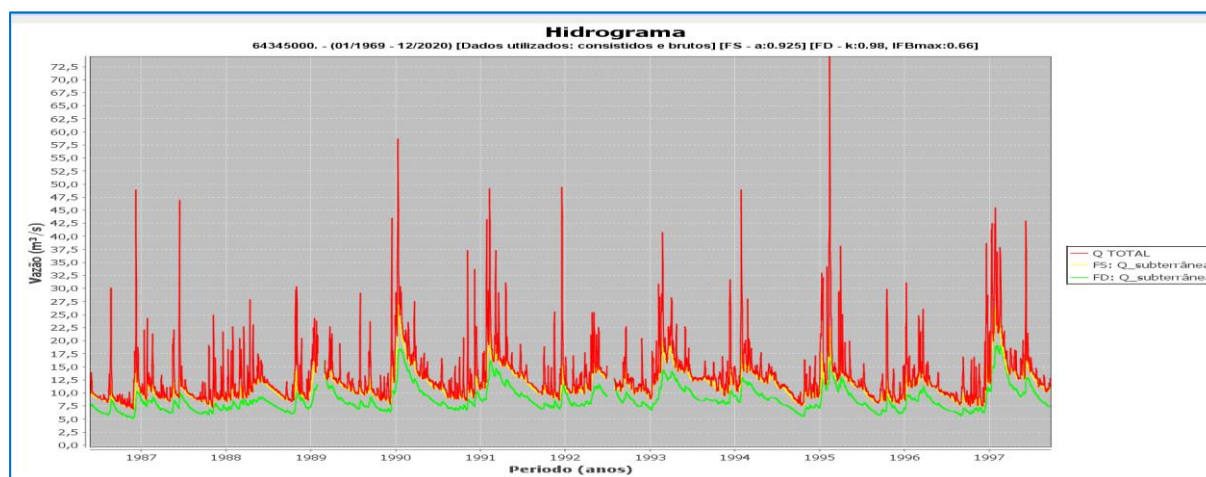


A análise do gráfico da Estação Agice (**Figura 12**) gerado no FBBrasil para a separação do escoamento de base apresenta a separação do escoamento calculado pelo FS (0,87) e pelo duplo (0,68), mostrando que o FD estimou valores cerca de 15% acima daqueles obtidos para  $Q_7/Q_{mlt}$  (0,74). Destaca-se que na área dessa estação também ocorrem sedimentos do Bauru-Caiuá (SABC) e basaltos da Formação Serra Geral, que mostram uma grande contribuição para os rios.



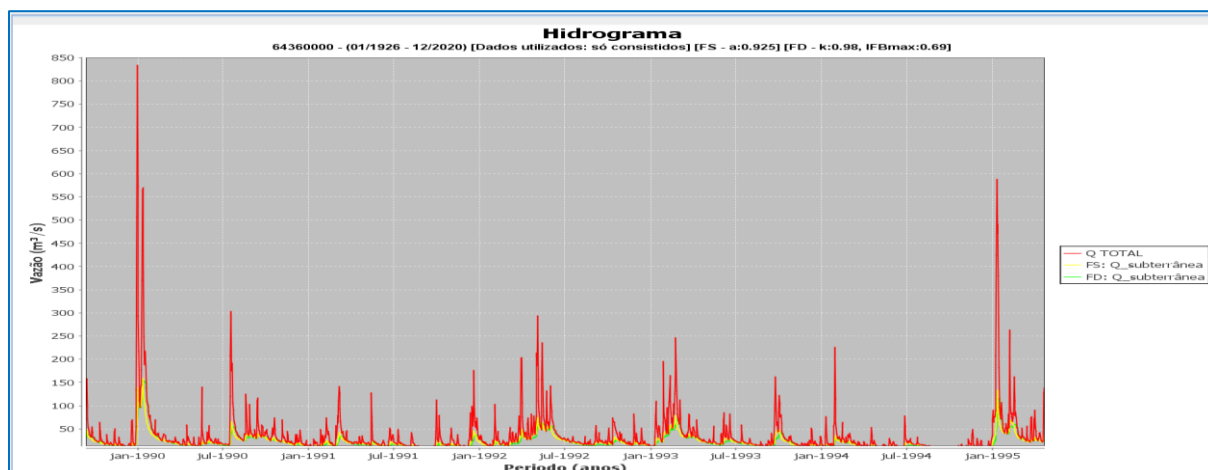
**Figura 12.** Hidrograma construído no FBBrasil para a Estação Agice (64346000) na bacia do rio Paranapanema (SASG/SABC).

Já na análise do gráfico da Estação Sucuí (64345000), as diferenças entre os valores obtidos nos filtros foram um pouco mais significativas (**Figura 13**), pois se acomoda, em sua maior parte, sobre o Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), uma vez que esse aquífero sozinho não tem uma contribuição tão significativa para os rios quanto o SABC.



**Figura 13.** Hidrograma construído no FBBrasil para a Estação Sucuí (64345000) na bacia do rio Paranapanema (SASG).

Enquanto na Estação Tomazina, cuja maior parte da área de contribuição está sobre o Aquífero Itararé, as diferenças entre o FS e a relação  $Q_7/Q_{mlt}$  foram bem mais significativas, chegando a 100% (**Figura 14**).



**Figura 14.** Hidrograma construído no FBBrasil para a Estação Tomazina (64360000) na bacia do rio Paranapanema (SAIt).

As análises das estações utilizadas nesta comparação, indicam que quanto maior o escoamento de base (e mais regularizador o aquífero) menor será a diferença entre os resultados dos filtros e da  $Q_7/Q_{mlt}$ .

#### Comentários

As **áreas com maior contribuição** dos aquíferos para o rio Paranapanema são as de ocorrência de **sedimentos do Bauru-Caiuá sobre basaltos da Formação Serra Geral**. Ademais a utilização do **FBBrasil mostrou resultados mais coerentes nestas áreas**, ou seja, com alta relação  $Q_7/Q_{mlt}$ .

Como pode-se verificar na **Figura 6**, as **áreas com maior potencial de contribuição**, se localizam principalmente, na **porção central da margem direita do Rio Paranapanema**- coincidentes com as descritas acima- ocorrendo outras com menor potencial na porção oeste da margem esquerda, assim como nas regiões oeste da margem direita (também coincidentes) e na região do rio Apiaí-Guaçu (sistemas aquíferos Carste da bacia do Paraná, Fraturado Centro Sul e Itararé).

Após as extrapolações as áreas com maior potencial foram estendidas (**Figura 16**). Assim toda a **região noroeste e nordeste** da bacia se destacam como **áreas de grande contribuição** (classes  $0,4 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,5$  e  $Q_7/Q_{mlt} \geq 0,6$ ). Ademais há uma área na **região do Apiaí-Guaçu**, acima mencionada. A região leste e centro-oeste tem potencial indicado como mediano (classe  $0,3 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,4$ ), com partes a noroeste e centro sul com potencial médio (classe  $0,4 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,5$ ) e a parte sul e central, baixo (classe  $Q_7/Q_{mlt} < 0,3$ ).

### **3.4.2. Bacia do Rio Grande**

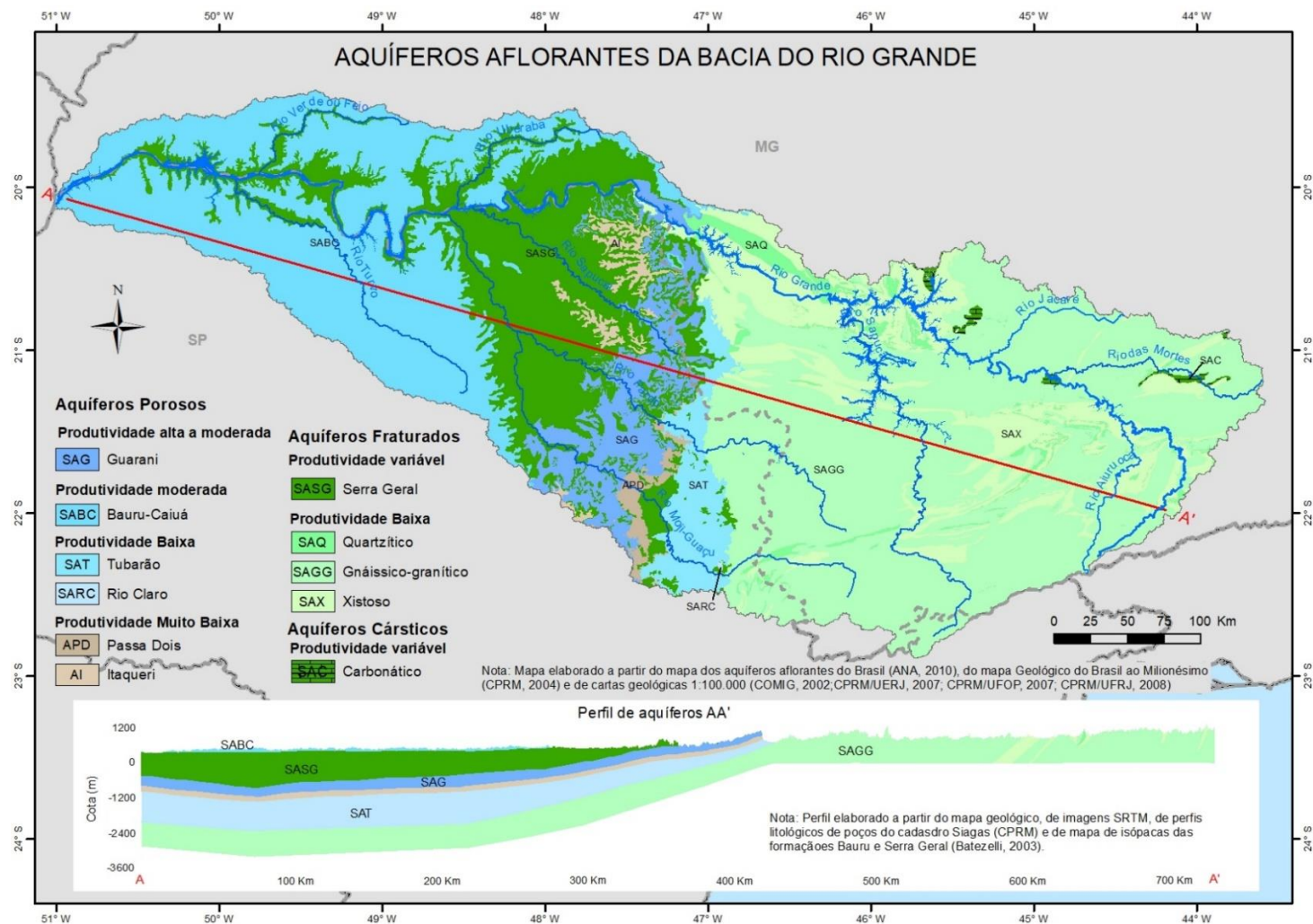
#### Contexto Hídrico e Fisiográfico

A bacia hidrográfica do rio Grande situa-se na região sudeste do Brasil e possui cerca de 144 mil km<sup>2</sup>, divididos entre os estados de Minas Gerais (60% da área) e São Paulo (40%). O rio Grande se estende por 1.286 km, desde a Serra da Mantiqueira, onde nasce, até confluir com o rio Paranaíba para formar o rio Paraná. Os principais afluentes, pela margem esquerda, são os rios Sapucaí (MG), Sapucaí (SP), Pardo, Moji-Guaçu e Turvo; e pela margem direita, o rio das Mortes, o rio Jacaré, o rio Uberaba e o rio Verde ou Feio. São de domínio da União além do rio Grande, os rios Pardo e Moji-Guaçu. O rio Grande conta com doze reservatórios para aproveitamento hidrelétrico (de montante para jusante): Camargos, Itutinga, Funil, Furnas, Marechal Mascarenhas de Moraes, Estreito, Jaguará, Igarapava, Volta Grande, Porto Colômbia, Marimbondo e Água Vermelha. Há ainda, no rio Pardo, o reservatório da UHE Caconde. As represas de Camargos, Furnas, Marechal Mascarenhas de Moraes, Marimbondo, Água Vermelha e Caconde regularizam vazão.

A bacia do rio Grande abrange os biomas Cerrado e Mata Atlântica, sendo o primeiro com ocorrência na sua porção oeste e o segundo na porção leste. Ambos se encontram mais de 85% suprimidos em função das atividades antrópicas da bacia. As regiões com maior cobertura vegetal remanescente correspondem a áreas montanhosas e protegidas por unidades de Conservação, como a Serra da Canastra, onde há cobertura remanescente de Cerrado e a Serra da Mantiqueira, onde há Mata Atlântica. As atividades agropecuárias ocupam grande parte da área da bacia, com amplo domínio da cana-de-açúcar na porção oeste da bacia e da pastagem na porção leste. Outras culturas relevantes são o café, o milho e a soja.

A pluviometria média anual é de 1.423 mm, máxima de 1.924 mm e mínima de 1.292 mm, com valores mais elevados no extremo leste da bacia (região da Serra da Mantiqueira) e na porção centro-norte (onde há trechos da Serra da Canastra). As menores precipitações encontram-se na região da foz do rio Grande

A geologia da bacia do rio Grande pode ser compartimentada em dois grandes domínios. Um a oeste, formado pelas rochas sedimentares e vulcânicas da bacia sedimentar do Paraná, a que se associam relevos planos a suave ondulados e com menores altitudes. Outro a leste, formada por rochas cristalinas ígneas e metamórficas, predominantemente granito-gnáissicas, a que se associa um relevo mais movimentado, ondulado a fortemente ondulado, podendo apresentar-se montanhoso, com maiores altitudes. O potencial hídrico subterrâneo da bacia está intimamente vinculado a esta compartimentação, sendo maior o potencial na porção oeste, onde há importantes aquíferos granulares, como o Bauru-Caiuá e o Guarani, além do aquífero formado por basaltos da Serra Geral, de produtividade variável. Na região leste da bacia, há predominância de aquíferos fissurais de produtividade geralmente baixa. (**Figura 15**).



**Figura 15.** Mapa de aquíferos aflorantes da bacia hidrográfica do rio Grande, elaborado para o Diagnóstico do Plano da bacia (ANA, 2015).

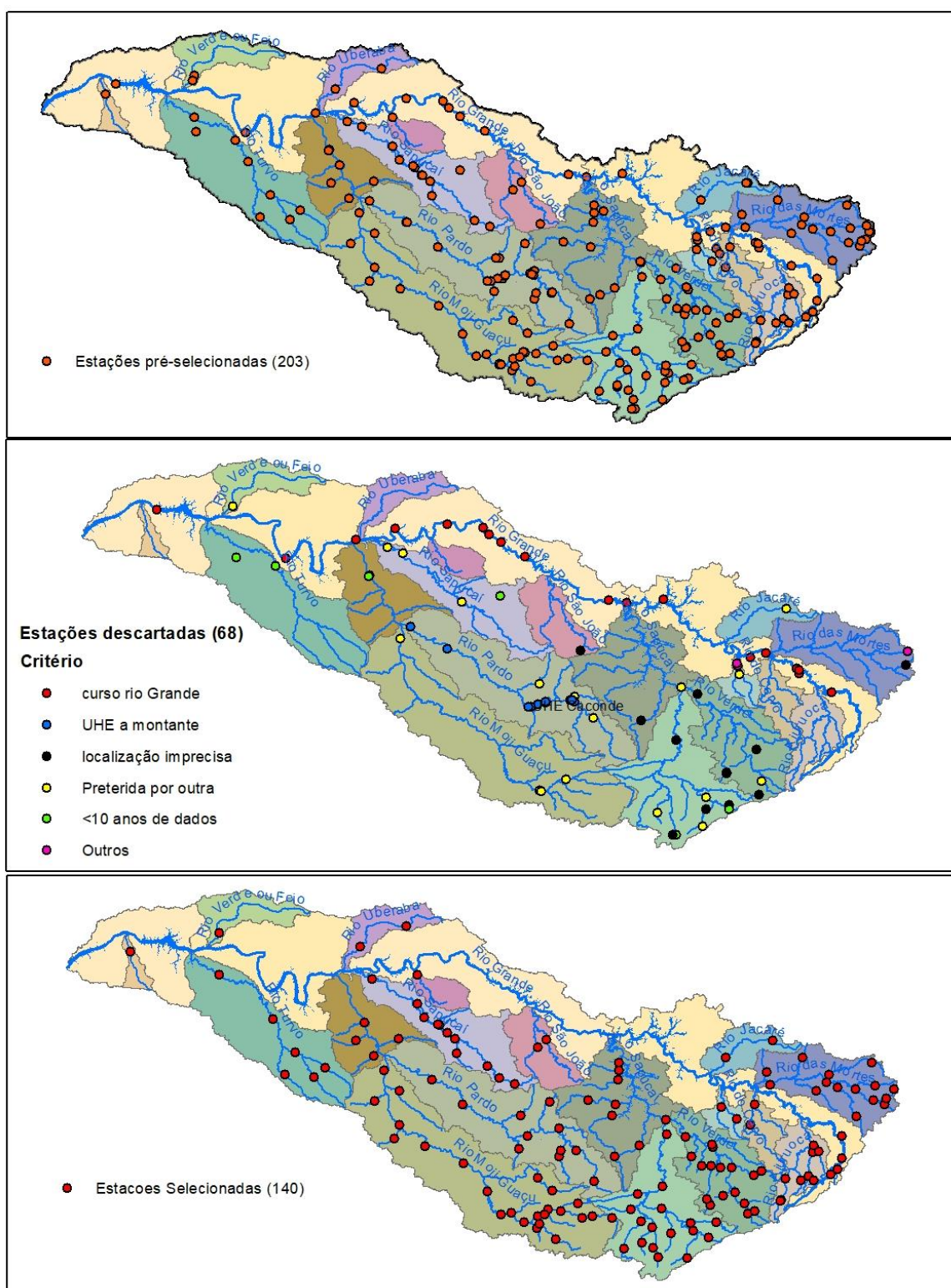
### Áreas relevantes (“hot spots”) para a gestão integrada rio/aquífero

A seleção de estações fluviométricas na bacia do rio Grande é proveniente de uma pesquisa inicial no universo de estações cadastradas na base do Hidro 1.4 em maio/2022 (796 estações), considerando período mínimo de 10 anos de dados, o que resultou em uma pré-seleção de **208 estações**.

Posteriormente, foram descartadas mais 68 estações, com base em alguns critérios como: influência de reservatórios, imprecisão na localização geográfica, eliminação de sobreposições, entre outros, **restando 140 estações** para a presente análise (**Figura 16**), as quais cobrem 63,4% da área da bacia do rio Grande. O tratamento de dados na bacia do rio Grande, até a seleção final das estações abrangeu as seguintes etapas:

- a) Exclusão de 18 (dezoito) estações localizadas no leito do rio Grande (exceto trecho de cabeceira), por receberem grande influência dos usos de montante;
- b) Exclusão de onze estações localizadas a jusante da UHE Caconde (rio Pardo) que não possuíam dados anteriores ao início da operação do reservatório ou se tais dados não alcançavam 10 anos.
- c) Exclusão de 11 (onze) estações cujas coordenadas geográficas não coincidiam com a informação do curso d’água monitorado e cujo ajuste não foi possível ou confiável. Outras quatro estações tiveram o posicionamento ajustado, sendo deslocadas para o curso d’água informado na base cadastral, no trecho corresponde à área de contribuição informada.
- d) Exclusão de 20 (vinte) estações em detrimento de outras muito próximas, com áreas de contribuição semelhantes (em grande parte sobreposta). A cada par ou trio de estações, foi selecionada a que apresentava a melhor série, dando preferência a séries mais longas e/ou mais recentes, maior continuidade de anos se houvesse falhas e dados consistidos em detrimento de brutos. Utilizou-se nessa análise a delimitação das áreas de contribuição das estações do Estudo de Escoamento de Base (ANA/UFV) e, quando não disponível, a delimitação foi feita a partir das Ottobacias da base BHO da ANA de 2017.
- e) Exclusão de 6 (seis) estações que apresentavam dados anômalos em relação as outras no mesmo contexto hidrogeológico. Dentre elas, cinco foram excluídas porque apresentaram menos de 10 anos de dados ao se considerar apenas anos com menos de 5% de falhas. Uma delas (61093000) foi excluída por possuir área insignificante (21 km<sup>2</sup>), além de variações na série não concordantes com as curvas de estações próximas, como a subida de vazões em época de estiagem.





**Figura 16.** Estações selecionadas na avaliação da contribuição do aquífero ao escoamento de base do rio na bacia do Grande. A) Estações pré-selecionadas (203) B) Estações excluídas (68) C) Estações selecionadas (140).

Antes da elaboração do mapa da contribuição do aquífero ao escoamento de base do rio na área das estações selecionadas, mais alguns procedimentos foram realizados:

- a) Revisão das vazões de referência de três estações localizadas à jusante de reservatórios que regularizam vazões e que possuíam dados prévios ao início da operação do aproveitamento hidrelétrico;
- b) Comparação dos dados calculados com outros previamente disponíveis, como aqueles trabalhados por esta Coordenação de Águas Subterrâneas para o Diagnóstico do Plano de Recursos Hídricos da bacia (2015) e os dados do Estudo de Estimativas de Escoamento de Base de Aquíferos (2022), desenvolvido em parceria com a Universidade Federal de Viçosa. No caso de divergências, fez-se conferências e revisões no Hidro 1.4 e Excel;
- c) Conferência e revisão (Hidro e Excel) de dados anômalos em relação às estações vizinhas no mesmo contexto hidrogeológico. Cálculos para períodos diversos e para percentual de falhas menores (até 5 ou, em alguns casos, até 10%, nesse caso em específico)
- d) Seleção do dado final de  $Q_7/Q_{mlt}$  a ser adotado na elaboração do mapa (cálculo original ou revisado).

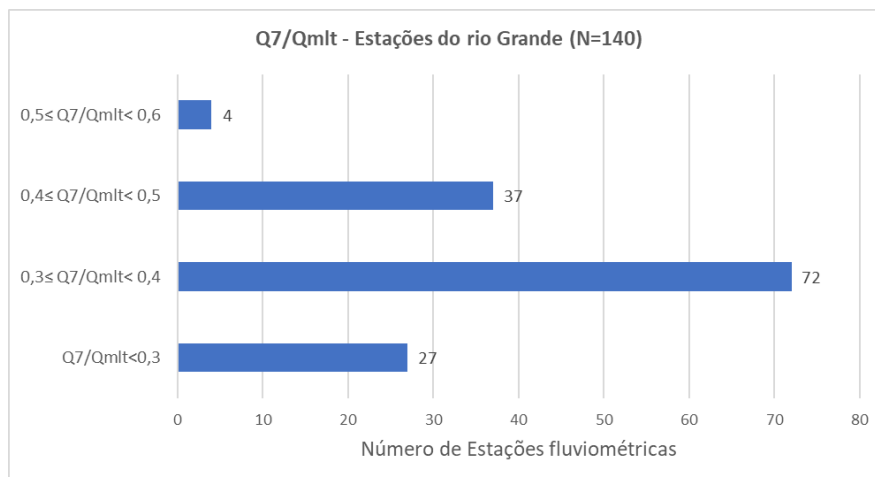
A análise das áreas relevantes para a gestão integrada rio/aquífero ou “hot spots” se deu a partir da relação entre a vazão mínima  $Q_7$  e a vazão média de longo período  $Q_{mlt}$ . Uma síntese da distribuição das estações por intervalo da relação  $Q_7/Q_{mlt}$  encontra-se ilustrada na **Figura 17**. Para a geração do mapa de relevância rio/aquífero na área das estações selecionadas, as vazões calculadas foram associadas como atributos aos vetores de pontos e de áreas de contribuição das estações, permitindo a criação de simbologias classificadas pelos intervalos de valores de  $Q_7/Q_{mlt}$  pré-determinados. Verificou-se o amplo domínio da classe  $0,3 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,4$ , seguido das classes  $0,4 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,5$  e  $Q_7/Q_{mlt} < 0,3$ , estas com cobertura semelhante em área, além de ocorrências restritas da classe  $0,5 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,6$ . A classe  $Q_7/Q_{mlt} \geq 0,6$  não ocorre na bacia. Os mapas de relevância rio/aquífero na área das estações selecionadas nas **Figuras 18 e 19**.

A classe  $0,3 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,4$  ocorre em 72 estações (51%) e representa aproximadamente 68% da área coberta pelas estações selecionadas (descontadas as sobreposições). Esta classe ocorre na maior parte das estações localizadas nos aquíferos fraturados do embasamento (granito-gnáissico, xistoso e quartzítico), em quase todas as estações no Sistema Aquífero Bauru-Caiuá localizadas na margem esquerda do rio Grande e nas estações com associação dos aquíferos Serra Geral e Guarani na bacia do rio Sapucaí (SP).

A classe  $0,4 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,5$  foi a segunda mais frequente, obtida em 37 estações (26%), correspondendo a aproximadamente 16% da área coberta pelas estações selecionadas. Ocorre na área de afloramento dos aquíferos Serra Geral e Bauru-Caiuá na bacia do rio Moji-Guaçu/Pardo e em algumas áreas do aquífero fraturado do embasamento (granito-gnáissico, xistoso e quartzítico), especialmente: em afluentes da margem esquerda do rio Sapucaí (MG), no entorno do reservatório de Furnas; na região de cabeceira do rio Grande e do rio Sapucaí (MG), coincidindo com a região de maior pluviometria e com remanescentes de Mata Atlântica, na Serra da Mantiqueira.

A classe  $Q_7/Q_{mlt} < 0,3$  está presente em 27 estações (19%) e representa cerca de 15% da área coberta pelas estações selecionadas. Ocorre distribuída em regiões cobertas pelo aquífero Bauru-Caiuá na margem direita do rio Grande; nas áreas de associação do Sistema Aquífero Serra Seral com o Aquitarde Itaqueri; em estações cobertas parcialmente pelo Aquífero Tubarão em regiões de cabeceira de bacia; em algumas estações no contexto dos aquíferos fraturados do embasamento, nesse caso especialmente em áreas estações localizadas nas regiões de cabeceiras de bacias, com áreas de contribuição pequenas.

A classe  $0,5 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,6$  ocorre em apenas 4 estações de pequena área de contribuição, ocupando menos de 2% da área coberta pelas estações selecionadas. Duas estão associadas ao Sistema Aquífero Serra Seral na bacia do rio Moji-Guaçu/Pardo e duas estão na região do Alto rio Grande, na bacia do rio Aiuruoca, em região de maior pluviometria.



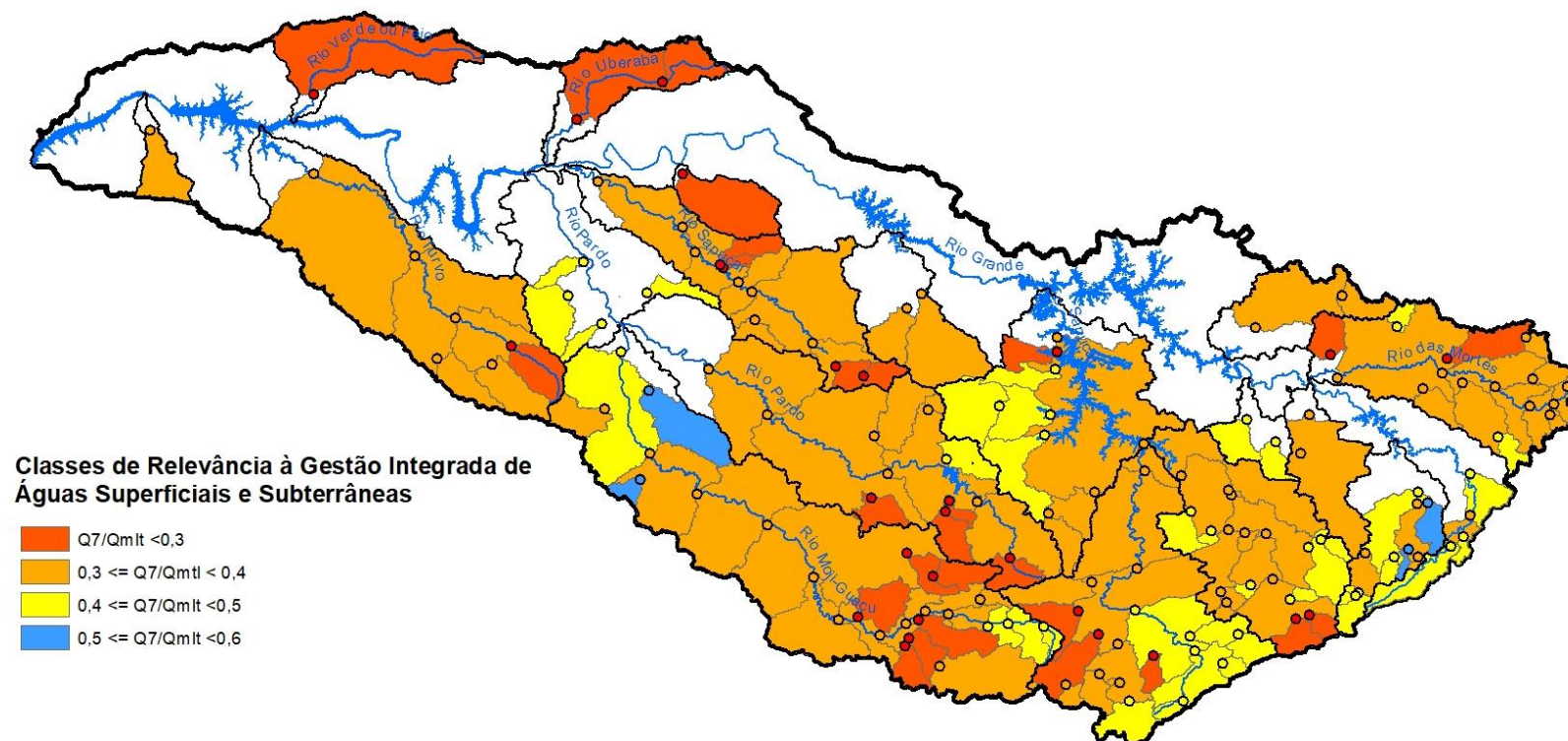
**Figura 17.** Representação gráfica do número de estações fluviométricas analisadas na bacia do rio Grande e suas classes ( $Q_7/Q_{mlt}$ ).

De maneira geral, verificou-se que há diferenciação na relevância à GIRH para um mesmo aquífero, a depender da região na bacia, como demonstrou os dados nas estações do Sistema Aquífero Bauru-Caiuá (SABC), com diferença entre as margens esquerda e direita do rio Grande e o Sistema Aquífero Serra Geral, mais relevante na bacia do rio Moji Guaçu/Pardo que no restante da bacia. No Sistema Aquífero Fraturado Centro-Sul a distribuição de classes apresentou-se mais dispersa, o que está de acordo com a grande variedade de rochas agregadas nesse sistema aquífero, além da heterogeneidade intrínseca desse tipo de porosidade (relacionado ao grau de fraturamento).

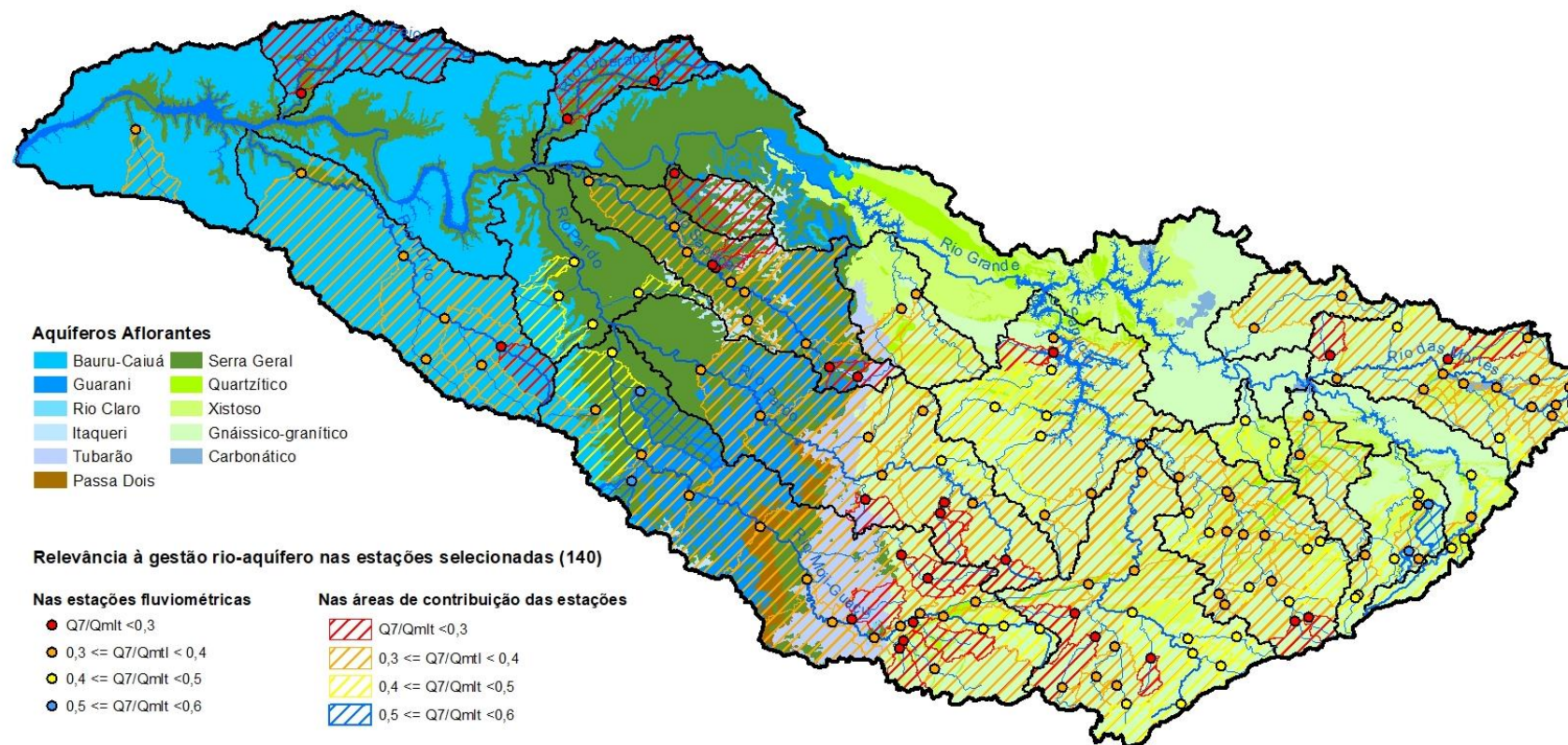
Não foi possível avaliar diretamente o Sistema Aquífero Guarani (SAG) na bacia, devido à ausência de estações representativas, mas se estima que seja elevada, dado o aumento da razão  $Q_7/Q_{mlt}$  na bacia do rio Moji-Guaçu entre as estações localizadas nos limites desse aquífero (0,34 na estação de montante e 0,39 na estação de jusante). Na evolução do trabalho, pretende-se aplicar coeficientes que permitam ponderar a importância de cada aquífero nas estações cobertas por vários deles. Para avaliação do Guarani, poderão ser consultados dados da bacia vizinha (rio Tietê).



## RELEVÂNCIA À GESTÃO INTEGRADA DE ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS NA BACIA DO RIO GRANDE



**Figura 18.** Relevância à gestão integrada rio/aquífero nas áreas de contribuição das estações fluviométricas selecionadas.



**Figura 19.** Sobreposição das áreas classificadas aos aquíferos aflorantes na bacia do rio Grande.

### Extrapolação das classes de relevância para a área sem dados

A partir das associações entre classe de relevância e aquíferos observadas nas áreas das estações fluviométricas, fez-se a extrapolção para demais áreas da bacia (**Figura 20**). Além do mapa hidrogeológico, informações complementares disponíveis no banco de dados do plano da bacia foram consultadas, como geologia, declividade, solos, uso do solo e pluviometria. A partir da identificação de áreas com características semelhantes, as seguintes extrapolções foram feitas:

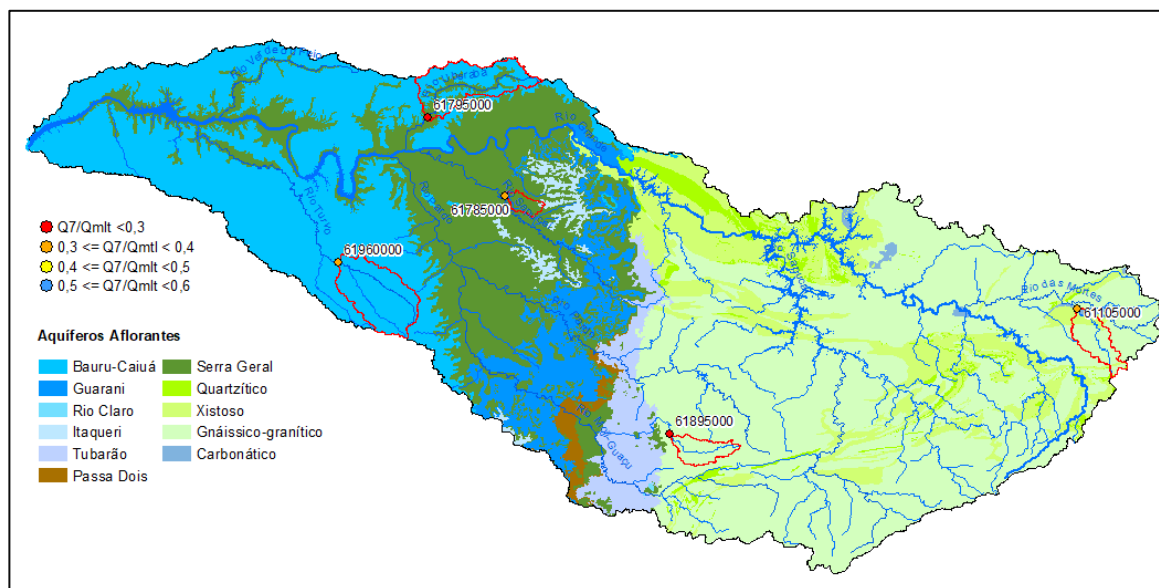
- a) Extrapolção da classe  $Q_7/Q_{mlt} < 0,3$  para áreas de domínio do Sistema Aquífero Bauru-Caiuá (associado ou não com o Serra Geral) na margem direita do rio Grande. Para maior confiança nessa extrapolção, foram calculadas as razões  $Q_7/Q_{mlt}$  em seis estações situadas no mesmo contexto hidrogeológico em área contígua na bacia do rio Paranaíba, sendo que cinco delas apresentaram  $Q_7/Q_{mlt}$  de 0,26 e uma de 0,32, reforçando o predomínio da classe mais baixa na região;
- b) Extrapolção da classe  $0,3 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,4$  para áreas de domínio do Aquífero Bauru-Caiuá (associado ou não com o Serra Geral) para áreas na margem esquerda do rio Grande;
- c) Extrapolção da classe  $0,4 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,5$  para as áreas domínio do Sistema Aquífero Serra Geral (ou associações dos aquíferos Serra Geral e Bauru-Caiuá) na bacia do rio Mogi Guaçu/Pardo, assim como em pequena sub-bacia contígua à do Pardo (sub-bacia Ribeirão Rio Jardim, afluente da margem esquerda do rio Sapucaí);
- d) Extrapolção da classe  $0,3 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,4$  para as áreas domínio do Sistema Aquífero Serra Geral (e associações com o Sistema Aquífero Guarani) nas interbacias da margem esquerda formadas por pequenos afluentes diretos do rio Grande, assim como na margem direita do rio Grande;
- e) Extrapolção da classe  $0,4 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,5$  para área do Sistema Aquífero Fraturado Centro-Sul (Gnáissico-Granítico, Xistoso, Quartzítico) na região do Alto rio Grande, em região de pluviometria mais elevada;
- f) Extrapolção da classe  $0,4 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,5$  para área do Aquífero Fraturado Xistoso/Quartzítico na bacia do rio Cervo, em continuidade à classe da estação de montante, até limite com o Aquífero Gnáissico-Granítico;
- g) Extrapolção da classe  $0,3 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,4$  para todo o Sistema Aquífero Fraturado Centro-Sul (Gnáissico, Xistoso, Quartzítico), a exceção das áreas previamente classificadas na classe  $0,4 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,5$ .





### Separação do Escoamento de base por filtros digitais recursivos (FBBrasil)

**Cinco estações** da bacia do rio Grande foram selecionadas para separação do escoamento subterrâneo em hidrogramas utilizando filtros digitais recursivos. Para tanto utilizou-se a ferramenta FBBrasil, conforme explicado anteriormente. As estações selecionadas são mostradas na **Figura 21** e listadas na **Tabela 2**, sendo duas representativas do Sistema Aquífero Bauru-Caiuá (SABC), uma no Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) e duas do Sistema Aquífero Fraturado Centro-Sul Gnáissico-Granítico (SAFCSGG). Exemplos dos gráficos resultantes apresentando as curvas de separação do fluxo de base estão apresentados nas **Figuras 22 a 25**.



**Figura 21.** Estações selecionadas para separação do escoamento de base com a ferramenta FB Brasil.

**Tabela 2.** Comparativo dos resultados dos parâmetros obtidos no FBBrasil e nos cálculos das relações de vazões mínimas e médias.

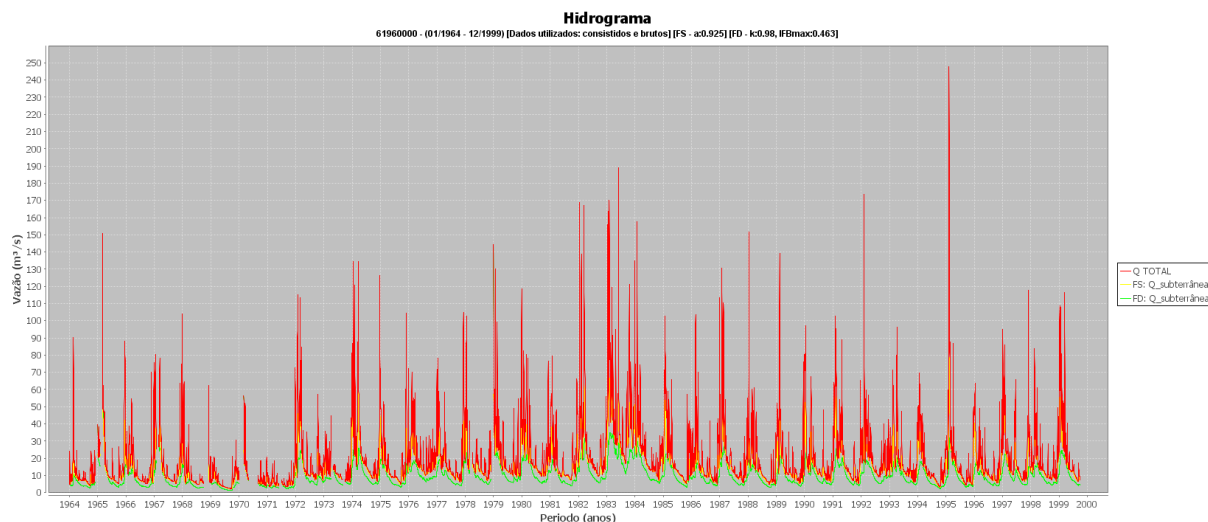
Código	Nome	Área (km <sup>2</sup> )	$Q_{90}/Q_{50}$	$Q_7/Q_{mit}$	IFB FS	IFB FD
61960000	São Benedito	2070	0,46	0,32	0,69	0,46
61795000	Conceição das Alagoas	1980	0,38	0,25	0,77	0,38
61785000	Guará	267	0,47	0,37	0,83	0,47
61105000	Porto do Elvas	828	0,57	0,38	0,80	0,55
61895000	São João da Boa Vista	622	0,44	0,28	0,71	0,44

IFB FS – Índice de fluxo de base médio com base anual calculado pelo Filtro Simples; IFB FD – Índice de fluxo de base médio com base anual calculado pelo Filtro Duplo.

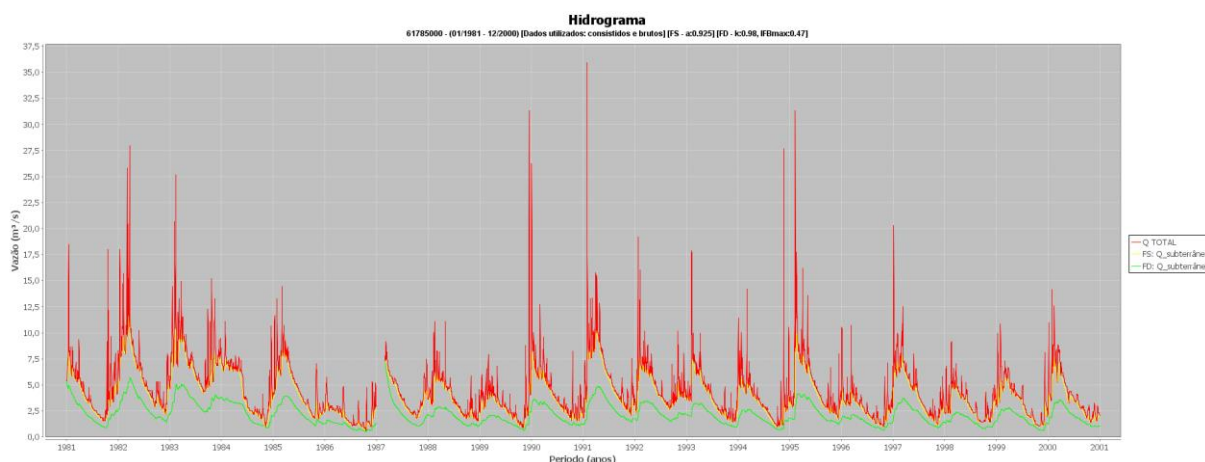
Ao comparar a relação entre a vazão  $Q_7/Q_{mit}$  com os IFBs (Índices de Fluxo Subterrâneo) obtidos pelos filtros digitais, observa-se que a ferramenta **superestimou o fluxo subterrâneo separado pelo Filtro Simples (FS) e retornou, para o Filtro Duplo**, praticamente **o mesmo valor inserido como dado de entrada** para o IFBmax, ou seja, a  $Q_{90}/Q_{50}$ . A partir de testes observou-se que, quanto menor o valor de IFBmax utilizado como parâmetro de entrada, mais a ferramenta induz o retorno de um resultado de IFB próximo a ele, tendendo à igualdade para valores abaixo de 0,5.

Além disso, observou-se que, além do Filtro Simples superestimar o fluxo de base, os resultados relativos também apresentaram incoerências. É o caso da comparação entre as duas estações do Sistema Aquífero Bauru-Caiuá (SABC), em que se esperava IFB menor para a estação 61795000 que o da 61960000, o que não ocorreu.

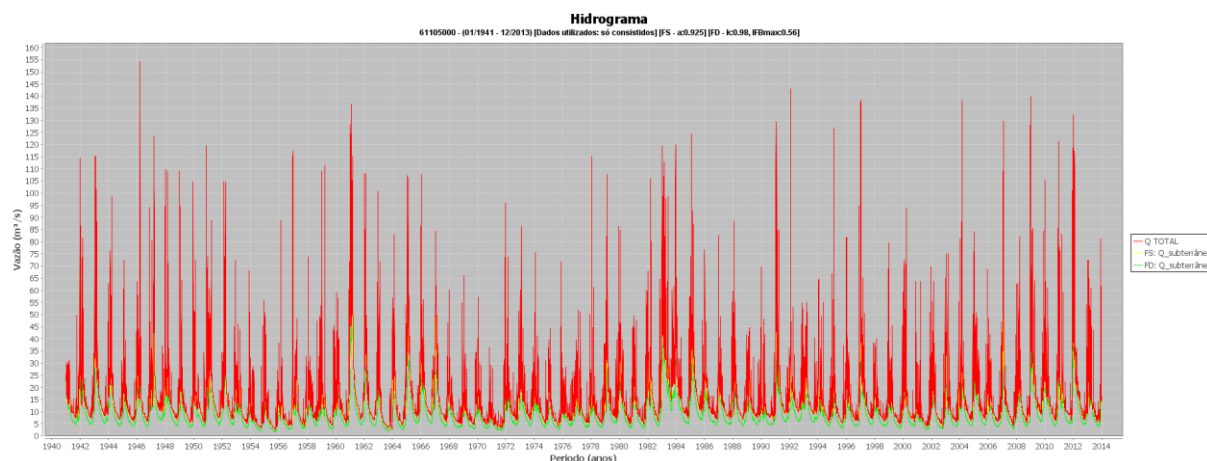
Em geral, conforme observado em outras bacias, os resultados para as estimativas do escoamento de base a partir de filtros digitais tendem a superestimar os valores do fluxo de base, quando comparado com metodologias mais conservadoras, como a  $Q_7$  utilizada no presente trabalho.



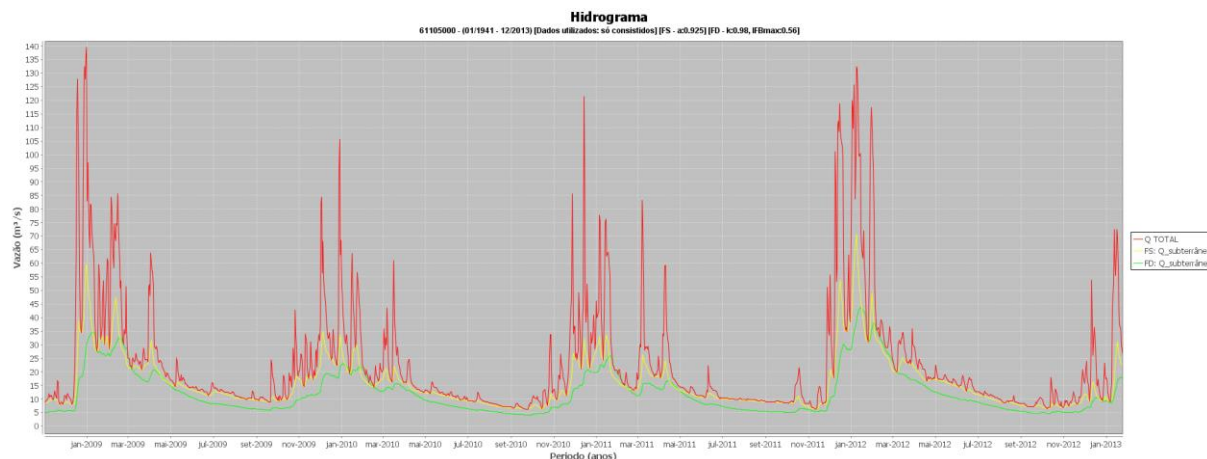
**Figura 22.** Gráfico de separação de fluxo com Filtro Simples (FS) e Duplo (FD) no hidrograma da estação 6196000 (Sistema Aquífero Bauru-Caiuá), com utilização do FBBrazil.



**Figura 23.** Gráfico de separação de fluxo com Filtro Simples (FS) e Duplo (FD) no hidrograma da estação 61785000 (Sistema Aquífero Serra Geral), com utilização do FBBrazil.



**Figura 24.** Gráfico de separação de fluxo com Filtro Simples (FS) e Duplo (FD) no hidrograma da estação 61105000 (Aqüífero Gnáissico-Granítico), com utilização do FBBrazil.



**Figura 25.** Aproximação aplicada no gráfico da estação 61105000 (Sistema Aqüífero Gnáissico-Granítico).

### Comentários

Dado o que foi exposto, **as áreas mais relevantes para a gestão integrada rio/aqüífero** na bacia do rio Grande são as **bacias dos rios Moji-Guaçu e Pardo**, nas áreas de domínio dos sistemas aquíferos Serra Geral, Guarani e Bauru-Caiuá. Trata-se de uma região com importantes cidades com usos relevantes das águas subterrâneas, como Ribeirão Preto, Barretos e Araraquara. Na região do Sistema Aqüífero Fraturado Centro-Sul, apesar da existência de algumas manchas de maior relevância, o uso da água subterrânea é baixo, além de parte delas estarem em um contexto de relevo montanhoso, logo, com baixo potencial de aumento dos usos.



### 3.4.3. Bacia do Rio São Francisco

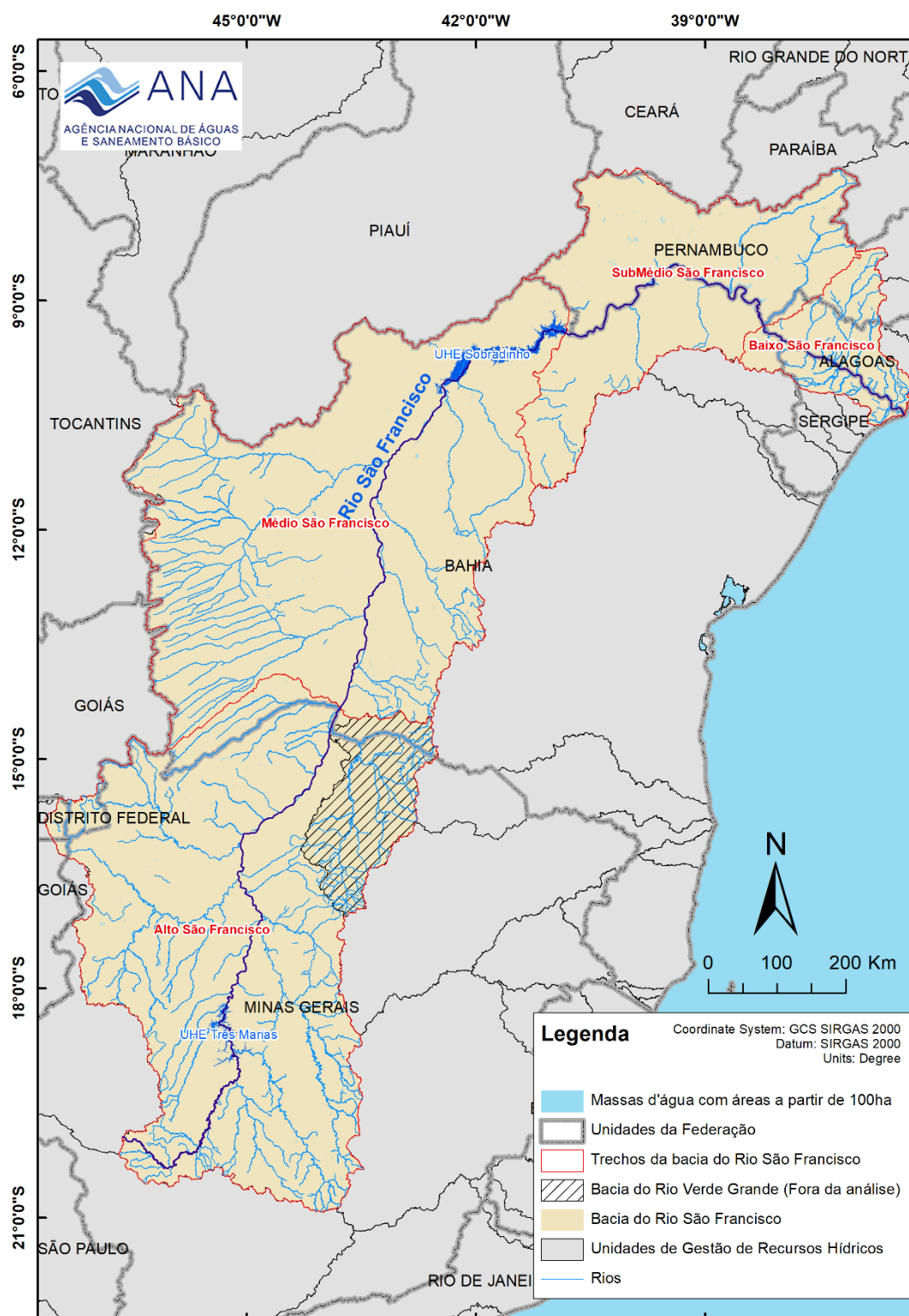
#### Contexto Hídrico e Fisiográfico

A bacia hidrográfica do rio São Francisco (BHSF) abrange seis estados (MG, GO, BA, PE, AL e SE) e o Distrito Federal; com área de cerca de 600 mil km<sup>2</sup> (**Figura 26**). Denominado de rio da integração nacional, o rio São Francisco se estende por 2.863 km, desde a Serra da Canastra, onde nasce, até o Oceano Atlântico, onde deságua na divisa dos estados de Alagoas e Sergipe. A bacia é dividida, para fins de estudos e planejamento em Baixo, Submédio, Médio e Alto São Francisco. O rio constitui base fundamental para o suprimento de energia elétrica do Brasil, contando com nove reservatórios, em operação, para controle de sua vazão e/ou geração de energia hidroelétrica, sendo os mais importantes: Três Marias, em Minas Gerais, Sobradinho, Paulo Afonso e Itaparica, na Bahia e Xingó, localizado entre os estados de Alagoas e Sergipe (PRHBHSF, 2016).

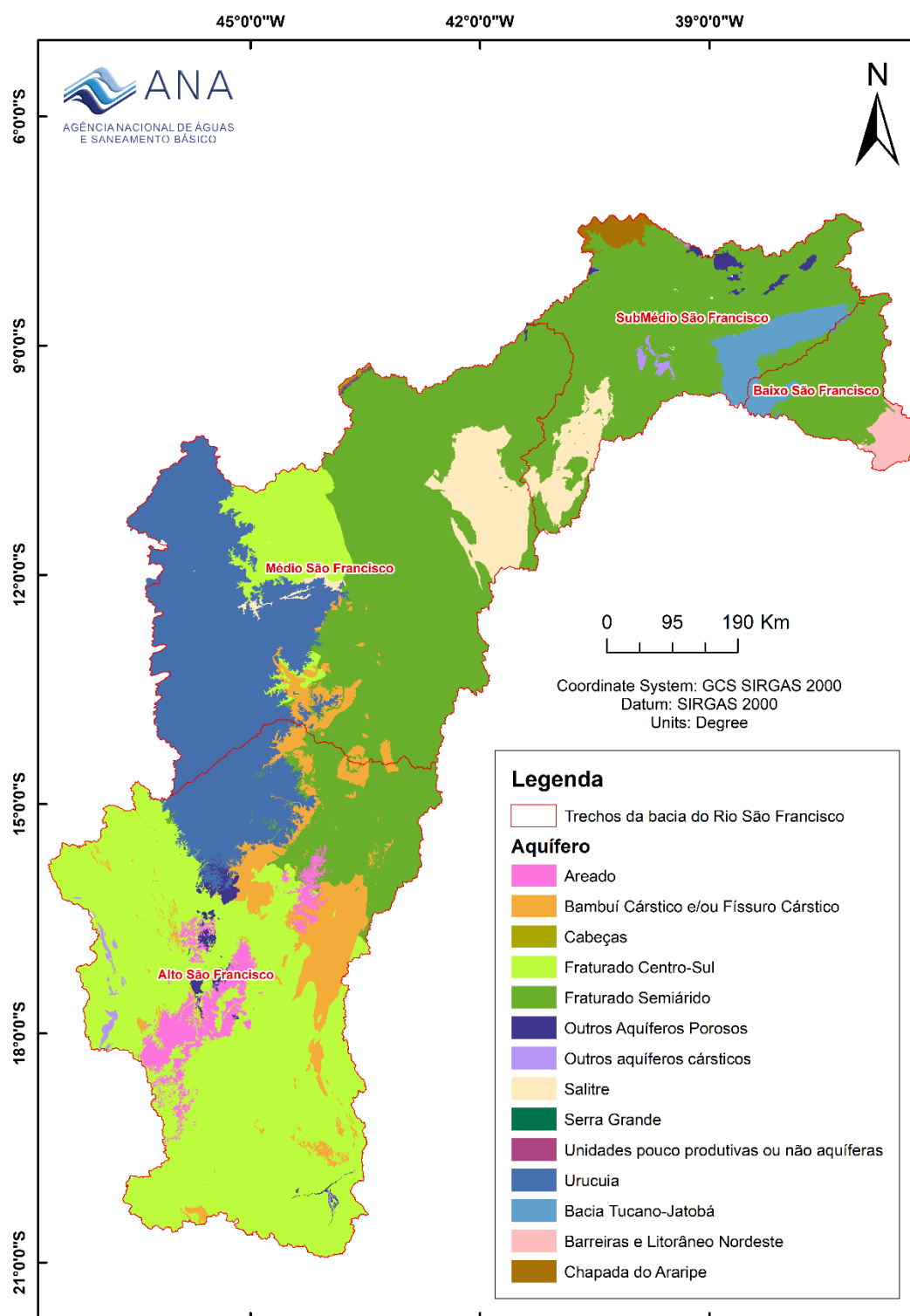
A BHSF abrange três biomas brasileiros, mata atlântica, cerrado e caatinga. O cerrado cobre, praticamente, metade da área da bacia – de Minas Gerais ao oeste e sul da Bahia, enquanto a caatinga predomina no nordeste baiano, onde as condições climáticas são mais severas, especialmente no polígono do Semiárido Brasileiro. O clima apresenta uma variabilidade associada à transição do úmido para o árido, com temperatura média anual variando de 18 a 27°C. A pluviosidade apresenta média anual de 1.036 mm, sendo que os mais altos valores de precipitação, da ordem de 1.400 mm, ocorrem nas nascentes do rio e, os mais baixos, cerca de 350 mm, entre Sento Sé e Paulo Afonso, na Bahia. O trimestre mais chuvoso é de novembro a janeiro, enquanto o mais seco é de junho a agosto.

O rio São Francisco tem uma vazão média de 2.769 m<sup>3</sup>/s (1931-2013); Q<sub>95</sub> de 800 m<sup>3</sup>/s e Q<sub>7,10</sub> de 670 m<sup>3</sup>/s; e importantes reservas de águas subterrâneas, como os sistemas aquíferos Exu e Santana, da Bacia Sedimentar do Araripe (Pernambuco); São Sebastião e Marizal, na bacia Sedimentar Tucano-Jatobá; o Sistema Aquífero Urucuia, o principal e mais relevante da bacia, e o Areado (Médio/Alto SF); além do Sistema Aquífero Cárstico Bambuí. Num cenário de crescimento da demanda, a preocupação com a garantia de água para os usos múltiplos da bacia repercute-se nas metas, na estratégia e nas diretrizes do Comitê, através da implementação do Plano Decenal da BHSF (2016-2025), que apontou que mais 70% das demandas de água na bacia se destinam à irrigação, com maior concentração no Médio e Submédio.

O contexto geológico da BHSF é bastante heterogêneo também entre os trechos. Na região do Alto São Francisco predominam rochas cristalinas agrupadas no mapa de Aquífero Aflorantes (ANA, 2012) como Sistema Aquífero Fraturado Centro-Sul. Na região do Médio os arenitos dos grupos Urucuia e Areado integram os sistemas aquíferos granulares homônimos da bacia; e, as rochas carbonáticas dos grupos Bambuí e Salitre que agregam o Sistema Aquífero Cárstico e Físsuro Cárstico. Nas demais regiões da bacia a geologia é representada pelas rochas cristalinas, agrupadas como Sistema Aquífero Fraturado Semiárido, as rochas que compõem as bacias sedimentares Tucano-Jatobá e as seqüências de sedimentos recentes, presentes especialmente nas calhas dos rios (**Figura 27**).



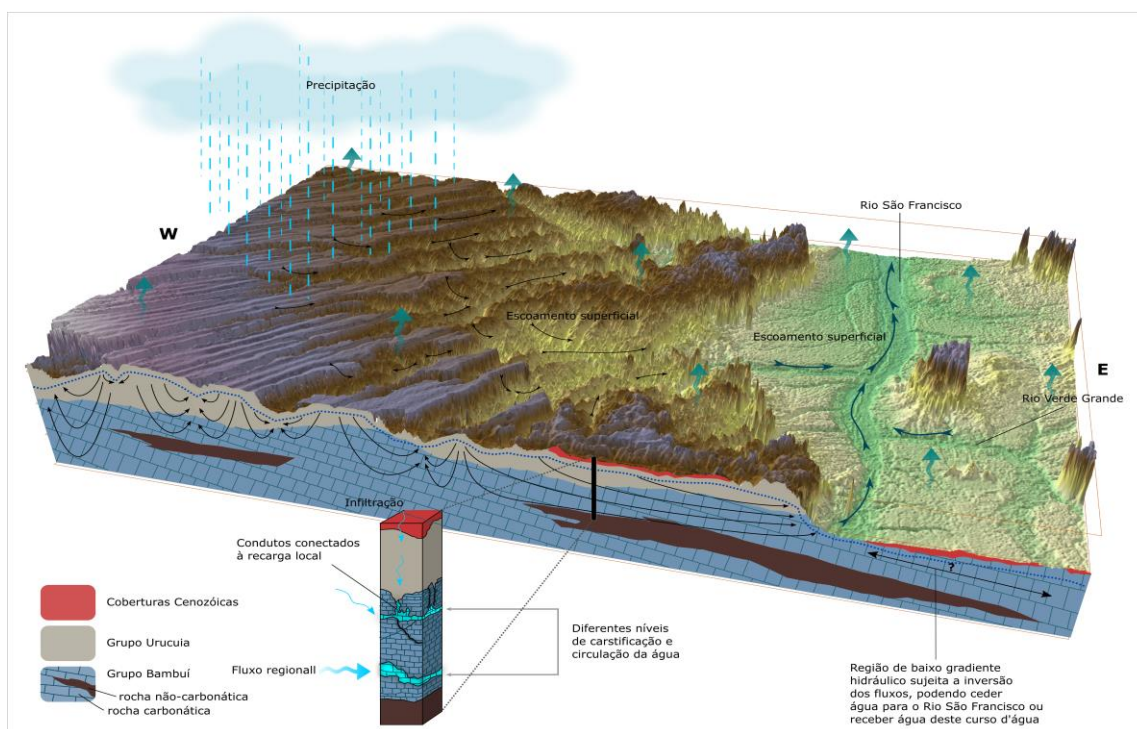
**Figura 26.** Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.



**Figura 27.** Mapa simplificado de aquíferos aflorantes da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.

O rio São Francisco é de domínio da União, assim como importantes afluentes (Carinhonha, Itaguari e Verde Grande); contudo, a bacia como um todo possui um desafiador cenário de gestão entre União e Estados, em função do contexto hídrico integrado com as águas subterrâneas

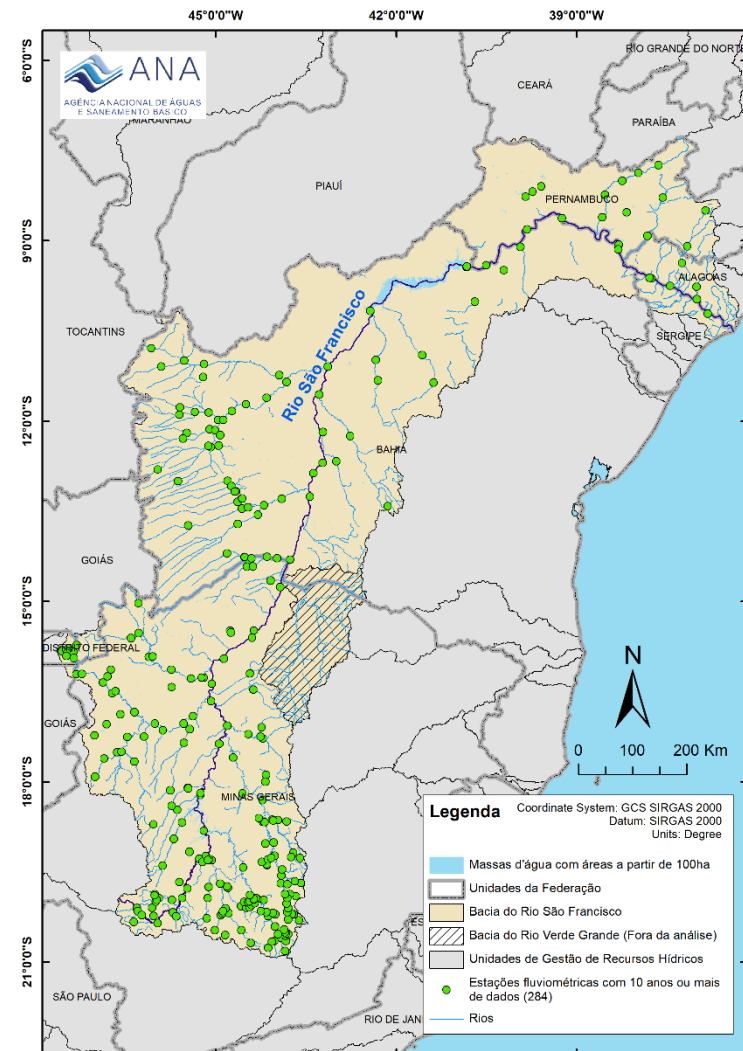
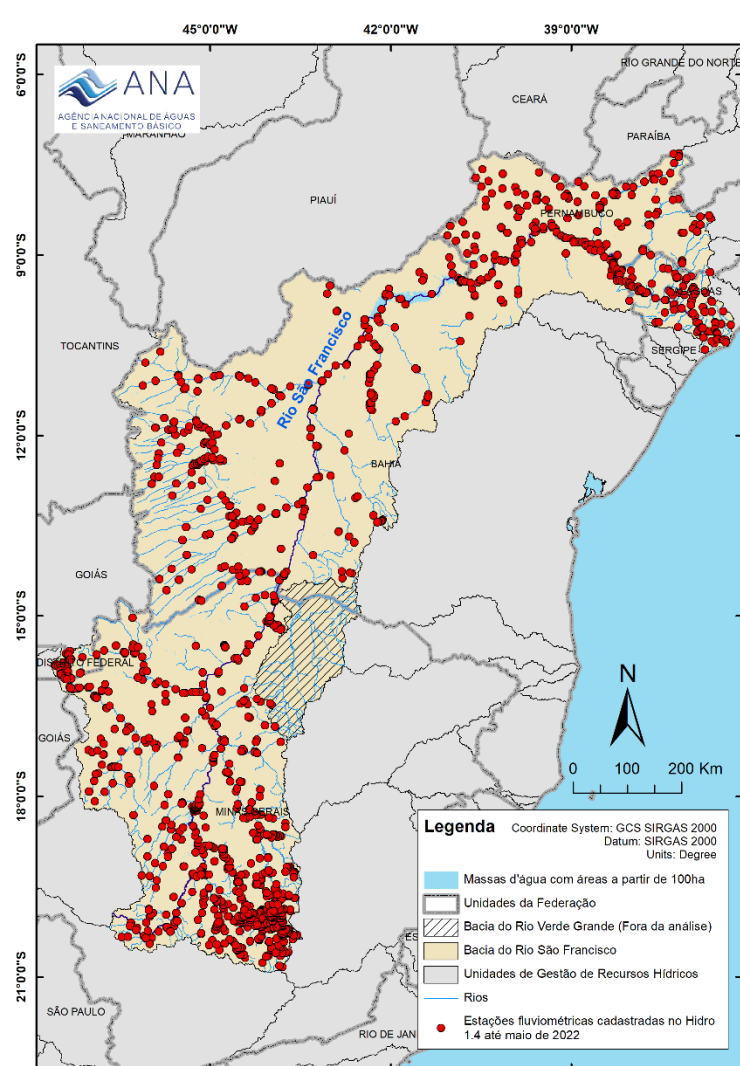
(dominialidade estadual) e com os afluentes de domínio estadual, especialmente os perenes, responsáveis por importantes “entregas” de vazões para a calha do rio São Francisco. Pode-se destacar esse contexto hídrico integrado com as águas subterrâneas, principalmente, na região de ocorrência do Sistema Aquífero Urucuia -SAU (**Figura 28**), onde esse aquífero chega a contribuir com o rio São Francisco entre 80 e 90% da sua vazão no período de estiagem (agosto a outubro), com referência ao reservatório de Sobradinho (Médio São Francisco) (ANA, 2017).



**Figura 28.** Contexto hídrico integrado: Rio São Francisco x Aquífero Urucuia. Exemplo do limite entre o Alto e o Médio São Francisco (BHs dos rios Verde Grande e Carinhanha).

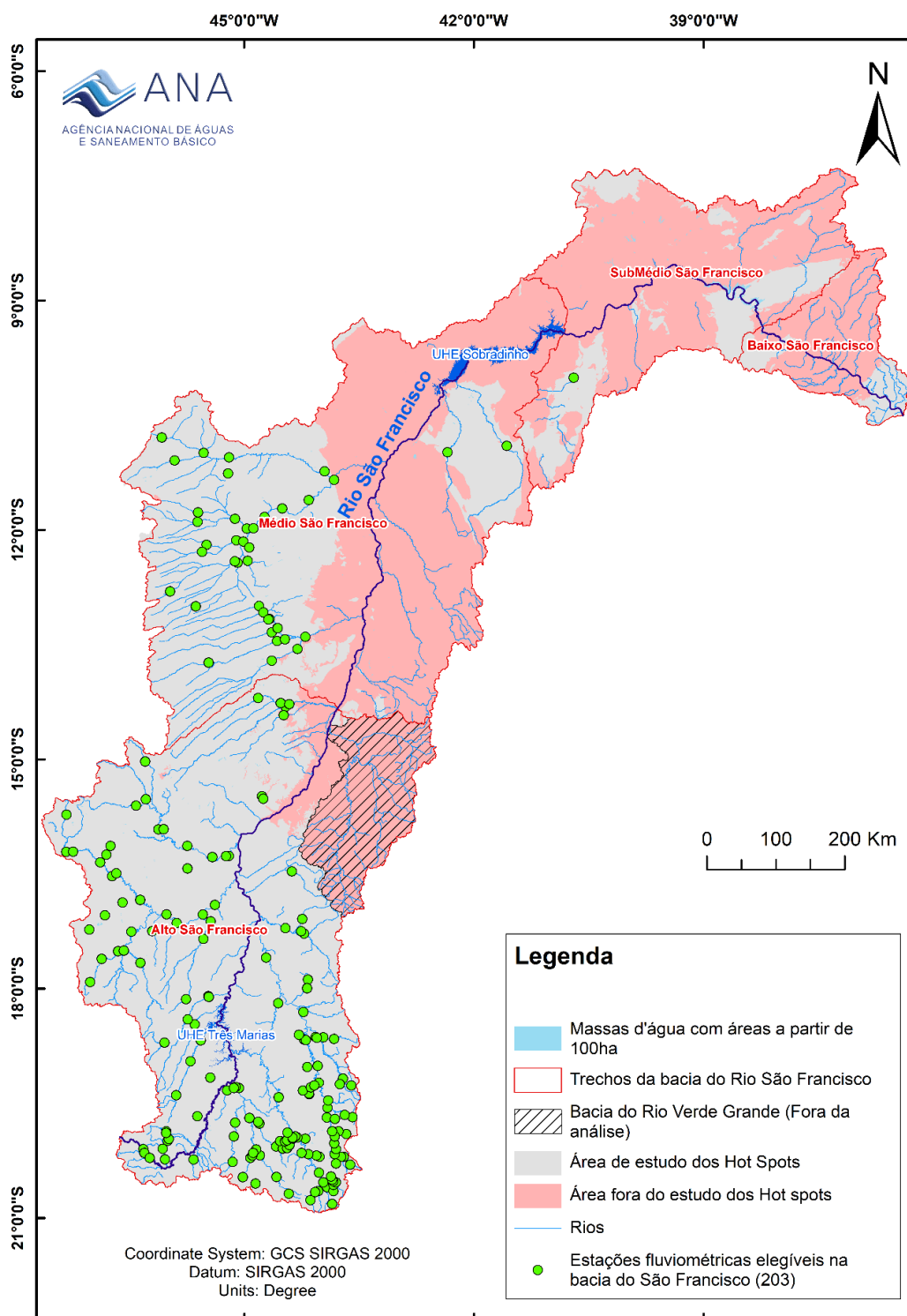
### Áreas relevantes (“hot spots”) para a gestão integrada rio/aquífero

A seleção de estações fluviométricas na BHSF é proveniente de uma pesquisa inicial no universo de estações fluviométricas disponíveis (1.771 estações) na base do Hidro 1.4 (maio/2022) apresentada na **Figura 29A**; considerando inicialmente aquelas com um período de dados com 10 ou mais anos, que resultou em **284 estações** (**Figura 29B**). Posteriormente, ao avaliar as estações submetidas a influência de reservatórios, localizadas no curso principal do rio São Francisco, que se encontravam fora da área de estudos dos *hot spots* definida na Nota Técnica nº 36/2021/COSUB/SIP (Documento nº 02500.036202/2021) e os critérios de concentricidade por sobreposições, foram descartadas mais 81 estações, restando **203 estações aptas** para a presente análise (**Figura 30**). A bacia do Rio Verde Grande, situada na margem direita do Alto rio São Francisco, não foi incluída nessa análise, pois embora faça parte da bacia, é considerada na base nacional, como uma unidade de gestão independente. Contudo, essa área será objeto de análise futura. De forma resumida, feito um recorte inicial daquelas estações situadas dentro do limite da área de estudo *hot spots*, a seleção das estações fluviométricas elegíveis para análise na BHSF teve como ponto de partida 203 estações (**Figura 31**).



**Figura 29.** (A) Estações fluviométricas (1.771) na BH São Francisco no Hidro 1.4 (05/22); (B) Estações fluviométricas (284) com 10 anos ou mais de dados.



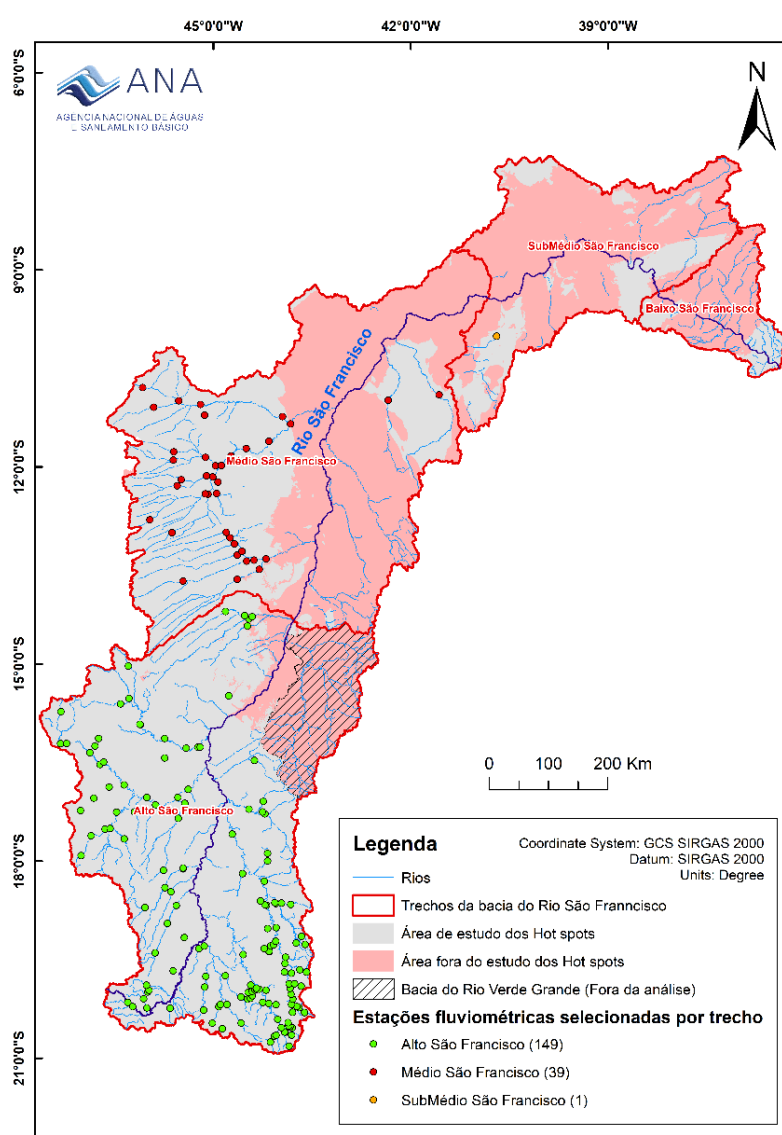


**Figura 30.** Estações fluviométricas elegíveis para análise integrada rio/aquífero, conforme critério inicial da área pré-definida (*hot spots*) com 10 ou mais anos de dados na BHSF.



Do número inicial de estações selecionadas para a bacia do São Francisco também foram observadas várias **estações concêntricas na mesma bacia**, a maior parte delas com mais de 90% de sobreposição da área total, diferenciadas apenas pelo período de dados disponível. Optou-se por utilizar nessa análise as **estações com dados mais recentes** por retratarem o cenário atual das bacias, bem como as mudanças climáticas em curso.

Assim, a análise das áreas relevantes para a gestão integrada na bacia do rio São Francisco foi feita com base em **189 estações fluviométricas**, divididas por trechos: 1 no Submédio, 39 no Médio e 149 estações no Alto (Figura 31). Destaca-se que não foi possível analisar o trecho do Baixo São Francisco; o trecho Submédio foi analisado com base em apenas uma pequena área (1 estação), e boa parte do trecho Médio – especialmente a margem direita, pois essas áreas estavam inicialmente excluídas da região selecionada para efetuar a avaliação integrada rio/aquífero, por não contemplar as condições de contorno estabelecidas na Nota Técnica nº 36/2021/COSUB/SIP.



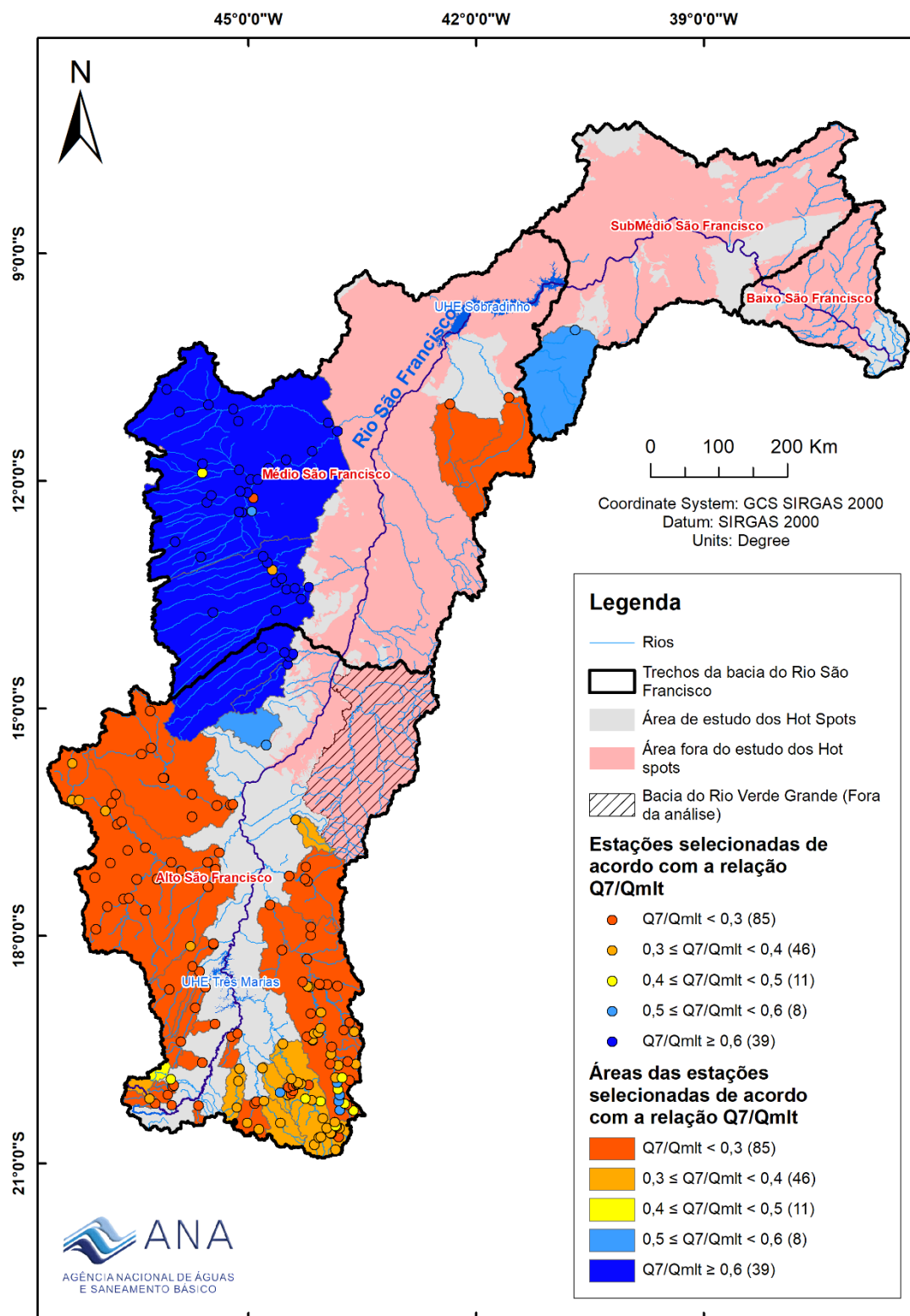
**Figura 31.** Estações fluviométricas (189) analisadas na bacia do rio São Francisco para indicação de áreas relevantes para a gestão integrada rio/aquífero (*hot spots*).

A partir dos dados dessas 189 estações fluviométricas, utilizou-se para análise, como citado anteriormente, o cálculo da razão  $Q_7/Q_{mlt}$  a partir de classes pré-definidas, por trechos do rio São Francisco. Avaliações complementares, como a separação de escoamento de base foi efetuada em áreas específicas da bacia do rio São Francisco, que tiveram maior relevância e disponibilidade de dados.

A representação cartográfica estática dos resultados da interação rio/aquífero no Alto São Francisco é dificultada em algumas regiões-específicas, tendo em vista a presença de resultados de **classes diferentes dentro de uma mesma bacia**, assim como devido à ausência de dados na região da calha do rio – devido ao critério anterior de exclusão especificado. Optou-se por apresentar em mapa a discriminação das classes da razão  $Q_7/Q_{mlt}$  tanto nas áreas das estações analisadas, como nos pontos que as representam; de forma que numa representação geográfica estática, as maiores estações sobressaem em relação as menores sotopostas, mas todos os pontos das estações exibem – mesmo sotoposta às maiores – a classe que representa. Na BHSF as estações com maiores áreas de contribuição exibem **predominância da classe  $Q_7/Q_{mlt} < 0,3$  (Figura 32)**, com algumas particularidades na região do alto rio das Velhas, Paraoapeba, Pará e rio Preto; e em maior **destaque na região norte do Alto São Francisco**, onde as classes  $Q_7/Q_{mlt}$  **acima de 0,5 e 0,6** demonstram maiores contribuições dos aquíferos para os rios.

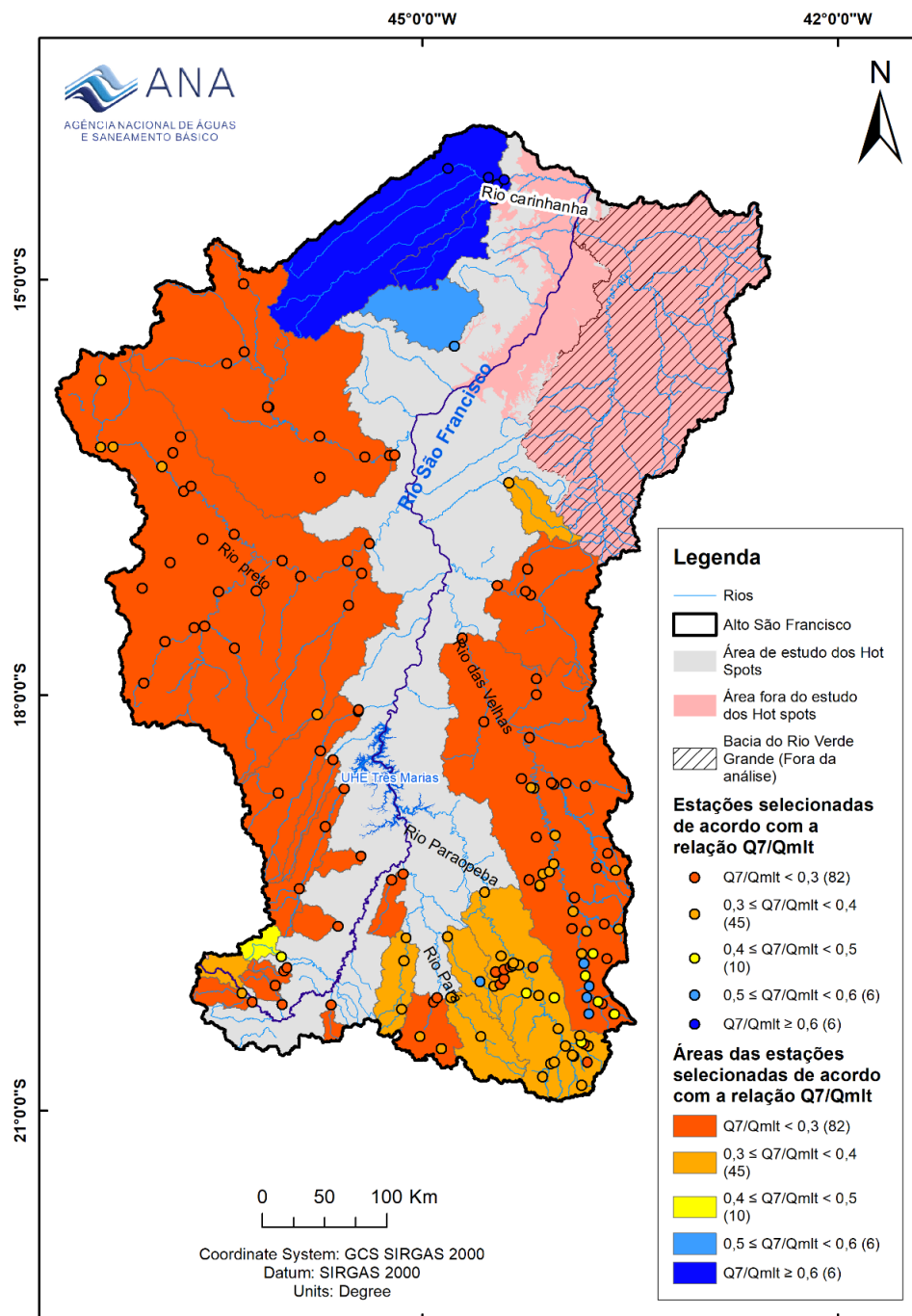
As classes da razão  $Q_7/Q_{mlt}$  calculadas para a bacia do São Francisco refletem, de forma geral, a capacidade de regularização natural dos mananciais subterrâneos (Figura 34). Os menores valores estimados para a região do Alto São Francisco (classe  $< 0,3$  e  $0,3 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,4$ ), em vermelho, refletem a baixa capacidade de regularização dos aquíferos predominantes do Fraturado Centro Sul nessa região. Na região do Médio a classe predominante é a  $Q_7/Q_{mlt} \geq 0,6$ , que reflete a excelente capacidade de regularização do Sistema Aquífero Urucuia nessa região; enquanto na região norte do trecho médio as rochas cársticas do sistema aquífero Salitre, avaliadas a partir dos dados de estações fluviométricas nos rios Verde e Jacaré demonstraram baixa capacidade de regularização, com valores de  $Q_7/Q_{mlt}$  da ordem de 0,05 e 0,28, respectivamente.

Na região do submédio, em estação fluviométrica no rio Salitre, também região de ocorrência das rochas do Sistema Aquífero Salitre, no entanto, obteve-se valores de  $Q_7/Q_{mlt}$  de 0,53, não coerente com o esperado para o contexto geológico.



**Figura 32.** Classes  $Q_7/Q_{mlt}$  obtidas para as estações analisadas na BH do rio São Francisco.

No Alto São Francisco analisou-se **149 estações** (Figura 33), estas mais concentradas nas bacias do rio das Velhas e Paraoapeba. A maior parte (55,03%) dessas estações apresentam valores menores que 0,3 para razão  $Q_7/Q_{mlt}$  (Quadro 4 e Figura 34). E apenas 4 % delas apresentam valores acima de 0,6 para essa razão, o que já assinala a fraca interdependência entre rios e aquíferos nesse trecho da bacia.

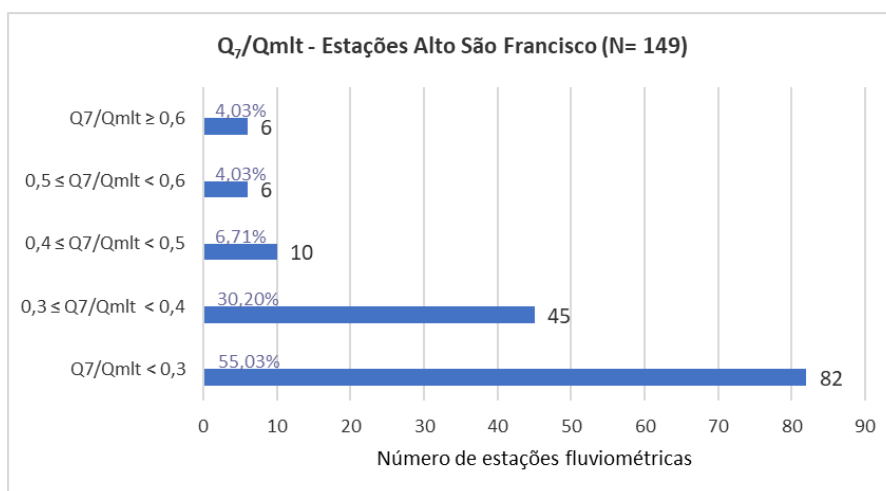


**Figura 33.** Predominância da classe  $Q_7/Q_{mlt} < 0,3$  no Alto São Francisco, com alguns comportamentos diferenciados nas áreas destacadas.



**Quadro 4.** Número de estações por classes da razão  $Q_7/Q_{mlt}$  no Alto São Francisco.

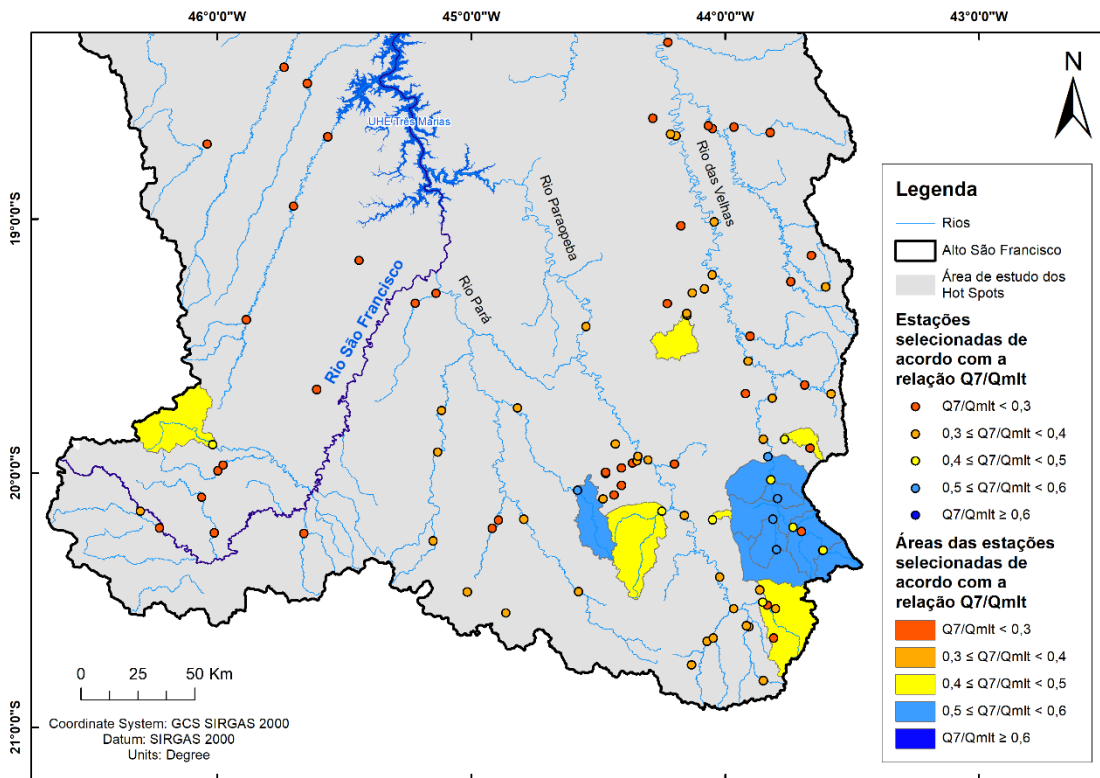
Classes $Q_7/Q_{mlt}$	Número de estações
$Q_7/Q_{mlt} < 0,3$	82
$0,3 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,4$	45
$0,4 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,5$	10
$0,5 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,6$	6
$Q_7/Q_{mlt} \geq 0,6$	6
<b>Total</b>	<b>149</b>



**Figura 34.** Representação gráfica do número de estações fluviométricas analisadas no trecho do Alto São Francisco e suas classes ( $Q_7/Q_{mlt}$ ).

As regiões de cabeceira apresentam bacias menores com várias estações fluviométricas concêntricas analisadas, cujos valores das classes  $Q_7/Q_{mlt}$  se mostraram diferentes em diversos trechos de uma mesma bacia. Aplicando-se um filtro, as estações sotopostas de classes diferentes são exibidas, mostrando um cenário local diferenciado nos pequenos trechos com classes da razão  $Q_7/Q_{mlt}$  maiores (**Figura 35**), indicando uma maior contribuição dos aquíferos locais para os rios. Esses trechos podem representar rochas mais fraturadas ou mesmo contribuições subterrâneas de regiões do entorno da bacia.





**Figura 35.** Detalhes sub-bacias menores na região de cabeceira do Alto SF que apresentam cenários da relação rio/aquífero melhores que do entorno.

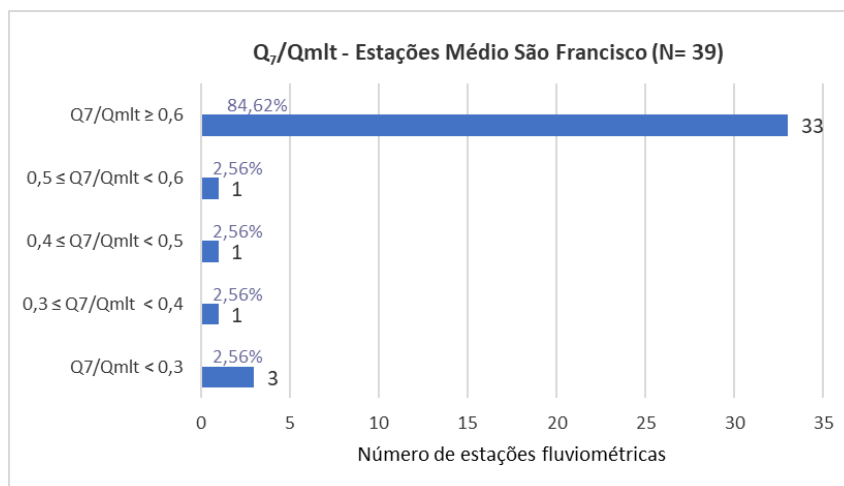
Ao passo que na **região norte** do trecho do Alto São Francisco, **destacam-se regiões mais promissoras na relação rio/aquífero**. Na bacia do rio Pandeiros e do Carinhonha – último afluente do trecho Alto - margem esquerda do SF, a relação  $Q_r/Q_{\text{mlt}}$  chega a valores da ordem de 0,5 e maiores que 0,6, indicando que os rios são muito dependentes da provisão dos aquíferos no período de estiagem. Esse comportamento mostra-se coerente com a presença do Sistema Aquífero Urucuia (SAU) nessa região, importante aquífero granular da região, cuja contribuição para os afluentes do São Francisco já foi objeto de análises anteriores.

Na região do **Médio São Francisco** analisou-se **39 estações**, em que a maior parte está concentrada na margem esquerda, área das bacias hidrográficas dos rios Grande e Corrente. A maioria (84,62%) das estações apresentam **valores maiores que 0,6 para razão  $Q_7/Q_{mlt}$**  (Quadro 5 e Figura 36), mostrando uma forte interdependência entre rios e aquíferos nesse trecho da bacia.



**Quadro 5.** Número de estações por classes da razão  $Q_7/Q_{mlt}$  no Médio São Francisco.

Classes $Q_7/Q_{mlt}$	Número de estações
$Q_7/Q_{mlt} < 0,3$	3
$0,3 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,4$	1
$0,4 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,5$	1
$0,5 \leq Q_7/Q_{mlt} < 0,6$	1
$Q_7/Q_{mlt} \geq 0,6$	33
<b>Total</b>	<b>39</b>



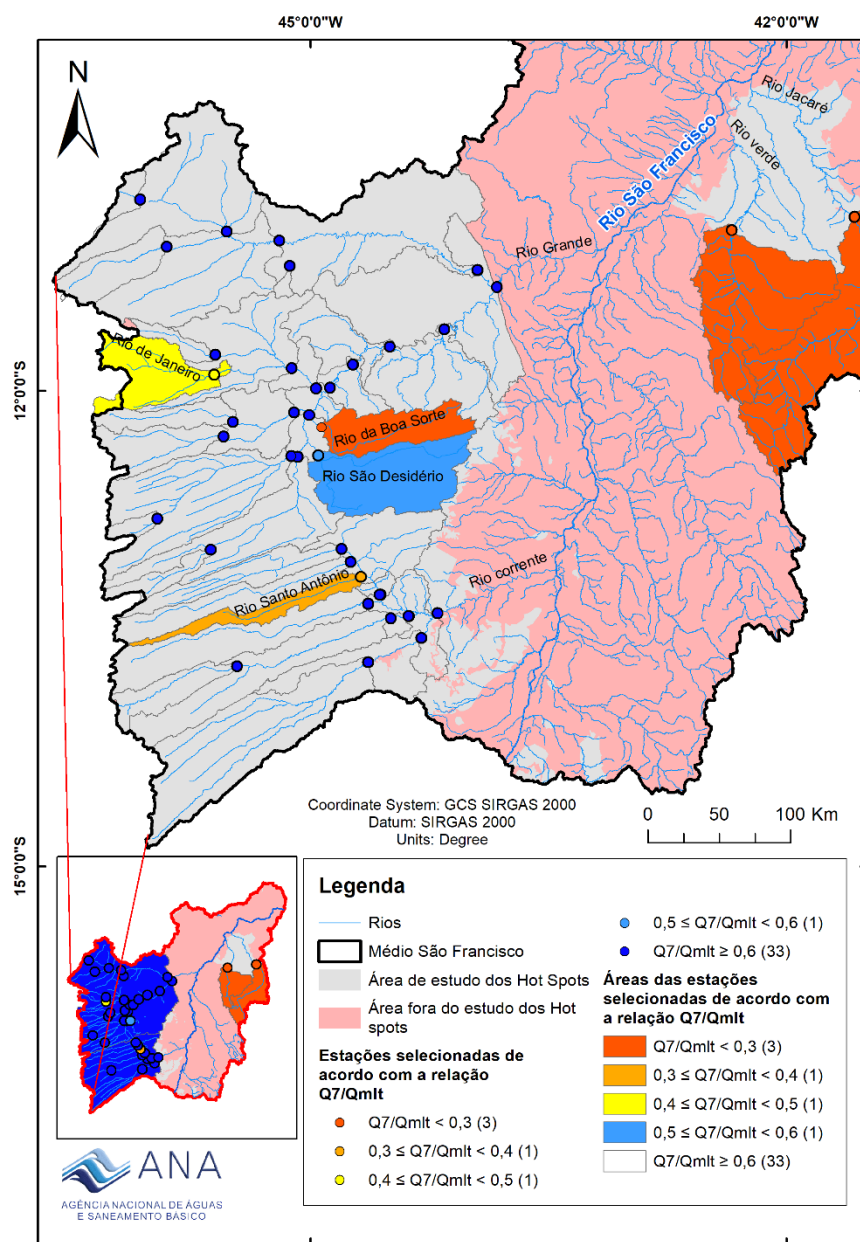
**Figura 36.** Representação gráfica do número de estações fluviométricas analisadas no trecho do Médio São Francisco e suas classes ( $Q_7/Q_{mlt}$ ).

O cenário da relação rio/aquífero do Médio SF se mostra de forma geral uniforme, com classes da relação  $Q_7/Q_{mlt}$  **maiores que 0,6** (Figura 37). Essa situação de **forte interdependência entre rios e aquífero** mostra-se coerente tendo em vista a presença do Sistema Aquífero Urucuia nessa região; embora **quatro sub-bacias** (rio de Janeiro, rio Boa Sorte, rio São Desidério e Santo Antônio) tenham sido **classificadas em classes inferiores**.

Na sub-bacia do rio de Janeiro, esse comportamento diferenciado, pode ser justificado pelo cenário de uso do solo e da água na bacia, que apresenta mais recentemente alguns barramentos e uma quantidade significativa de usuários de águas superficiais e subterrâneas. A sub-bacia do rio Boa Sorte está situada numa região onde há o adelgaçamento das espessuras das rochas do Aquífero Urucuia e predominância das rochas cársticas, o que explica o valor menor da relação rio/aquífero, além de um relevo mais dissecado. Nos casos das bacias dos rios São Desidério e da Boa Sorte, configura-se um cenário misto de ocorrência dos arenitos do SAU com os calcários do Bambuí, sendo comum, a presença de arenitos apenas na zona vadosa do aquífero cárstico sotoposto, contudo, nos limites dessa sub-bacia há uma importante área de relevo plano e rochas um pouco mais espessas que proveem uma regularização natural mais eficiente dos corpos d'água superficiais.



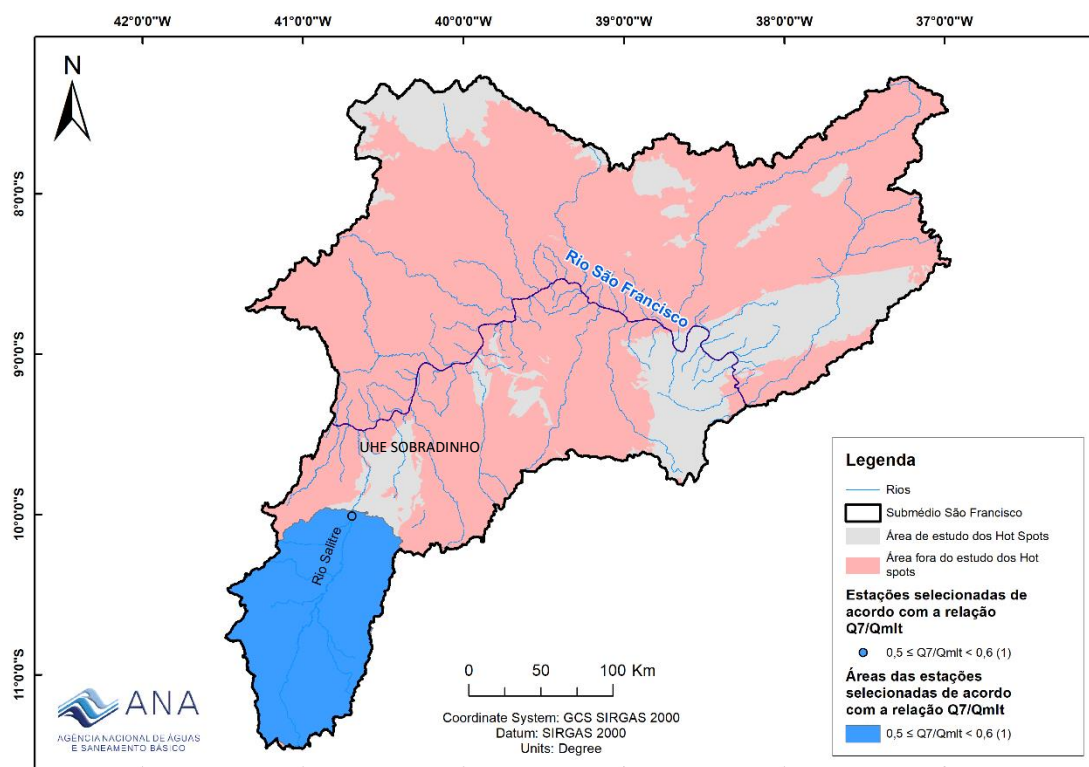
Cenário particular na região norte do Médio São Francisco é observado na região dos rios Jacaré e Verde. As sub-bacias analisadas foram classificadas na menor classe  $Q_7/Q_{mlt} < 0,3$ , sendo, no entanto, justificada pela ocorrência de aquíferos cársticos do Grupo Salitre na área, onde é comum a presença de feições cársticas; além de ser uma região de precipitação muito baixa. Essa região situa-se dentro do limite do Semiárido, mas foi incluída na análise, muito mais por ter uma relevante importância hidrogeológica local, do que pelo resultado do ponto de vista da integração rio/aquífero.



**Figura 37.** Cenário da relação  $Q_7/Q_{mlt}$  na região do Médio São Francisco.



Na região do Submédio São Francisco obteve-se apenas uma estação fluviométrica elegível para as condições de contorno adotadas no método utilizado (**Figura 38**). A estação Abreus (4790000), situada no rio Salitre, apresentou um valor inesperado da razão  $Q_7/Q_{mlt}$  (**0,53**), considerando que o cenário hidrogeológico é similar ao da região norte do Médio, pertencente ao domínio do Aquífero Cárstico das rochas do Grupo Salitre, sendo também uma região que chove muito pouco.



**Figura 38.** Estação analisada no Submédio São Francisco.

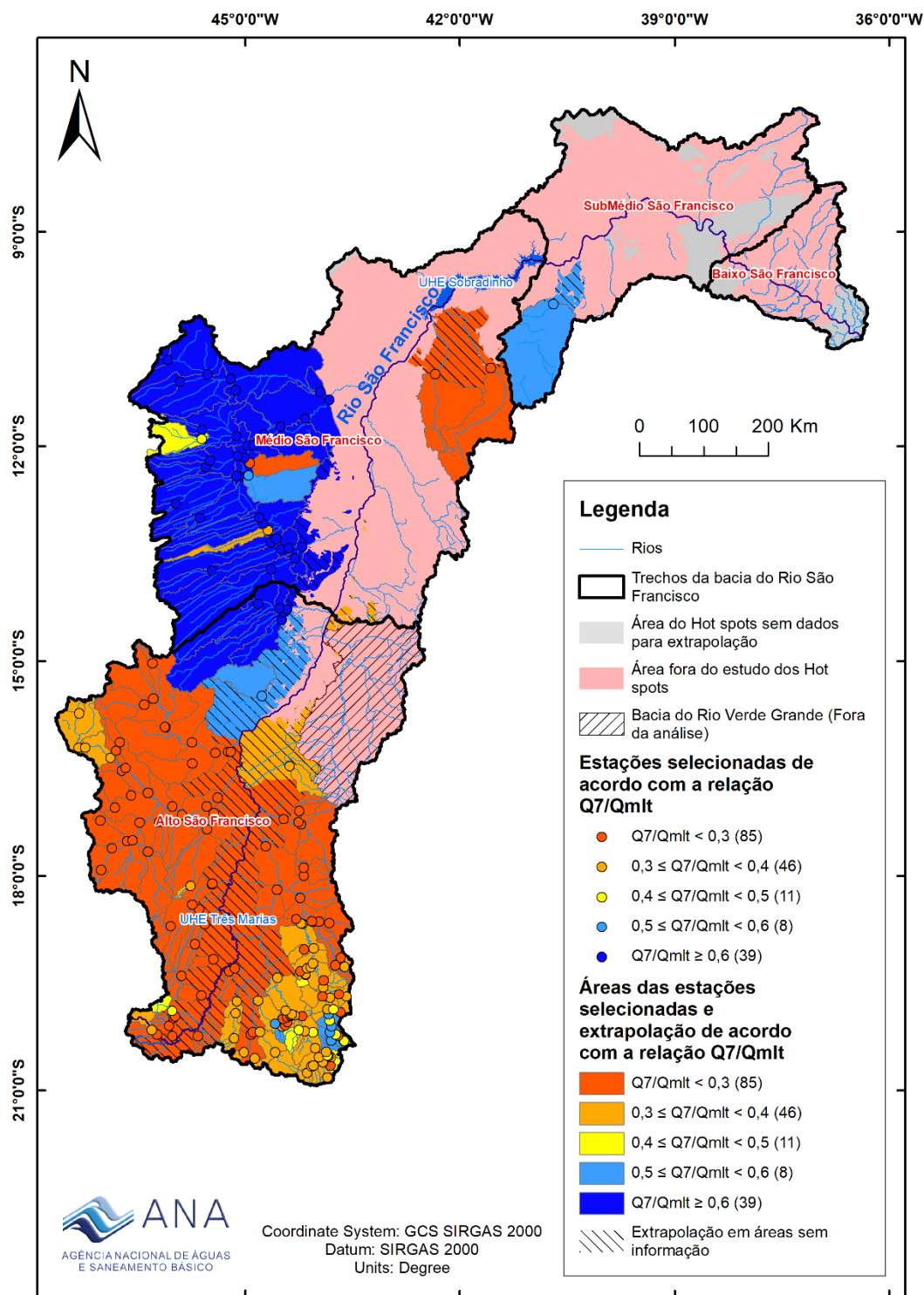


Extrapolação das classes de relevância para a área sem dados

A partir de informações complementares disponíveis, sobretudo a geologia e a pluviometria fizeram-se extrapolações das classes de relevância para demais áreas elegíveis da bacia do São Francisco, que não dispunham de dados de estações fluviométricas (**Figura 39**); tal como descrito a seguir:

- a) Extrapolação da classe  $Q_7/Q_{mt} < 0,3$  para áreas de calha da região do Alto São Francisco, domínio do sistema aquífero Fraturado Centro-Sul. Essa classe foi extrapolada até o limite sudoeste da bacia do rio Verde Grande, margem direita do SF;
- b) Extrapolação da classe  $0,3 \leq Q_7/Q_{mt} < 0,4$  em área contígua ao limite sudoeste da bacia do rio Verde Grande, onde a associação das rochas carbonáticas com as sedimentares dos sistemas aquíferos Cárstico e Areado subsidiaram essa extrapolação, na margem direita do rio São Francisco;
- c) Extrapolação da classe  $0,5 \leq Q_7/Q_{mt} < 0,6$  para as áreas de domínio do sistema aquífero Urucuia associado com o Cárstico na porção norte do Alto rio São Francisco, margem esquerda, em áreas das bacias hidrográficas do rio Pandeiros e Pardo;
- d) Extrapolação da classe  $Q_7/Q_{mt} \geq 0,6$  para as áreas contíguas do Sistema Aquífero Urucuia, associado ao Aquífero Cárstico, na margem esquerda do médio São Francisco, formadas pela continuidade das estações que drenam essas rochas, até a atingir toda a região elegível dos *hot spots*;
- e) Extrapolação da parte norte da região norte do trecho médio para a classe  $Q_7/Q_{mt} < 0,3$ , de um pequeno trecho a jusante das estações (47249000 e 47480000) analisadas nos rios Verde e Jacaré, onde há predomínio das rochas cársticas do Grupo Salitre.

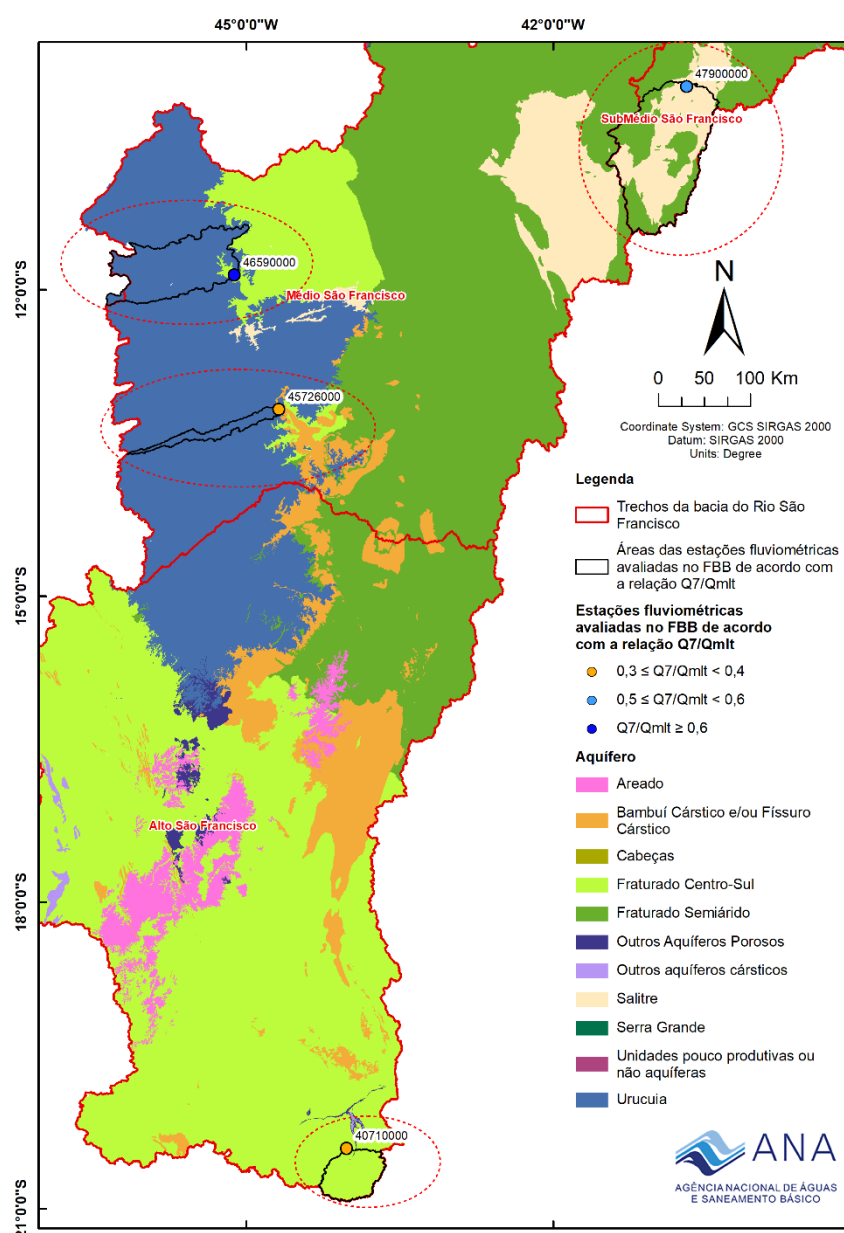




**Figura 39.** Mapa das áreas relevantes para a gestão integrada rio/aquífero na bacia do rio São Francisco.

### Separação do Escoamento de base por filtros digitais recursivos (FBBrasil)

Para avaliar algumas sub-bacias com aplicação de outra relação com vazões mínimas, selecionou-se **quatro sub-bacias**, destacadas na **Figura 40**, para avaliar a relação entre o fluxo de base ( $Q_b$ ) e a vazão média de longo termo ( $Q_{mlt}$ ),  $Q_b/Q_{mlt}$ . Para tanto utilizou-se o FBBrasil para efetuar a separação do fluxo de base nos mesmos períodos de análises empregados para a estimativa da relação  $Q_7/Q_{mlt}$ . As estações selecionadas estão listadas na **Tabela 3**, sendo uma na região do Alto, duas no Médio São Francisco e uma no Submédio.



**Figura 40.** Estações analisadas no FBrasil na Bacia do Rio São Francisco.



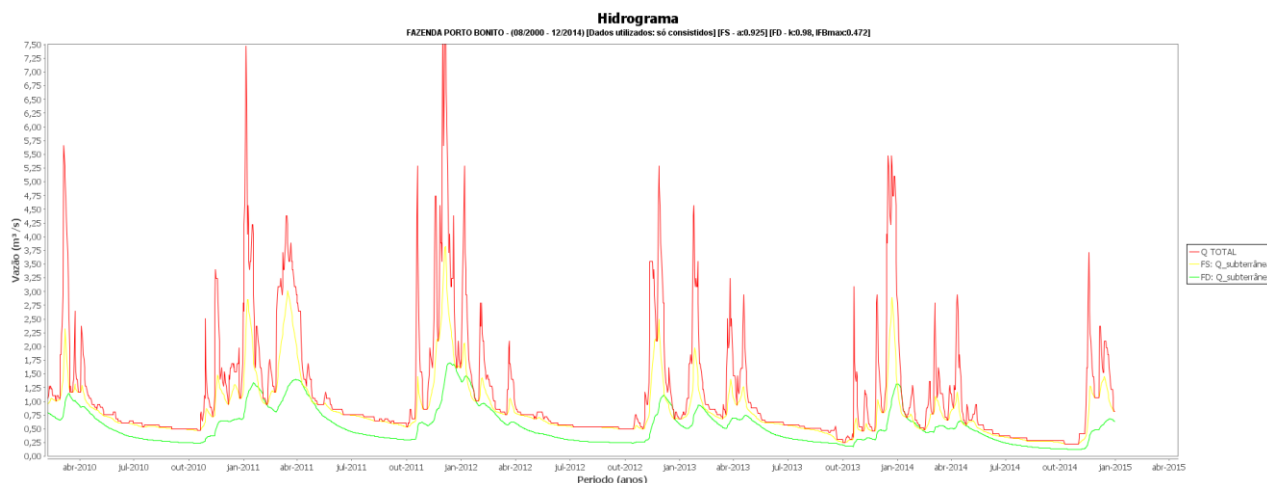


**Tabela 3.** Comparativo dos resultados dos parâmetros obtidos no FBBrazil e nos cálculos das relações de vazões mínimas e médias.

Trecho	Código	Estação	Rio	Área (km <sup>2</sup> )	IFB FS	IFB FD	Q <sub>90</sub> /Q <sub>50</sub>	Q <sub>7</sub> /Q <sub>mt</sub>
ALTO	40710000	BELO VALE	PARAOPEBA	2.770	0,699	0,51	0,51	0,320
MÉDIO	46590000	NOVA VIDA MONTANTE	RIO BRANCO	7.480	0,90	0,73	0,74	0,729
MÉDIO	45726000	FAZ PORTO BONITO	RIO SANTO ANTONIO	1.290	0,74	0,47	0,47	0,364
SUBMÉDIO	4790000	ABREUS	RIO SALITRE	12.500	0,49	0,53	0,55	0,321

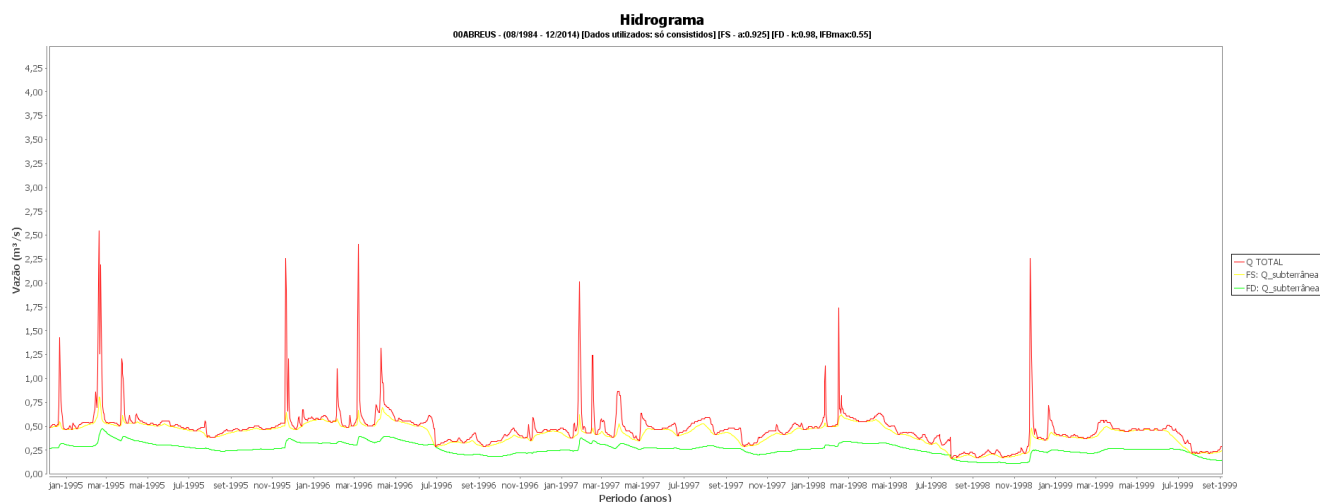
IFB FS – Índice de fluxo de base médio com base anual calculado pelo Filtro Simples; IFB FD – Índice de fluxo de base médio com base anual calculado pelo Filtro Duplo.

Ao comparar a relação  $Q_7/Q_{mt}$  com o IFB observa-se que apenas uma estação no médio São Francisco se destaca, conforme indicado inicialmente, devido à natureza conservadora da vazão  $Q_7$  em relação ao escoamento de base obtido por filtros digitais recursivos. Das quatro estações onde foram estimados o escoamento de base por filtros digitais somente a Nova Vida Montante (46590000), situada no rio Branco (afluente do rio Grande, margem esquerda do São Francisco), apresentou valores de  $Q_7/Q_{mt}$  e de IFB similares. Não obstante, o gráfico da separação de fluxo obtido em outra estação, Fazenda Porto Bonito (45726000) – exibido em detalhe – na **Figura 41**, mostra que nos períodos de recessão o Filtro Duplo (FD) não apresenta um ajuste adequado ao período de recessão do hidrograma e do Filtro Simples, mostrando descolamento.



**Figura 41.** Gráfico de separação de fluxo com Filtro Simples (FS) e Duplo (FD) no hidrograma da estação Fazenda Porto Bonito (rio Branco, afluente do rio Grande - Médio São Francisco), com utilização do FBBrazil.

A análise da estação Abreus (4790000) com o método da separação do fluxo de base mostrou que a estação não é adequada para esse tipo de avaliação. O próprio hidrograma do rio não exibe curvas de recessão bem definidas para análise da integração rio/aquífero (**Figura 42**). Os resultados das curvas da separação de fluxo, com o emprego do Filtro Simples mostrou pouca ou quase nenhuma separação do fluxo original, mesmo nos períodos que deveriam ser a recessão; e no caso do emprego do Filtro Duplo o gráfico apresenta um considerável desajuste com o regime de vazões do hidrograma original.



**Figura 42.** Gráfico de separação de fluxo com Filtro Simples (FS) e Duplo (FD) no hidrograma da estação Abreus (rio Salitre, Submédio São Francisco), com utilização do FBBrasil.

### Comentários

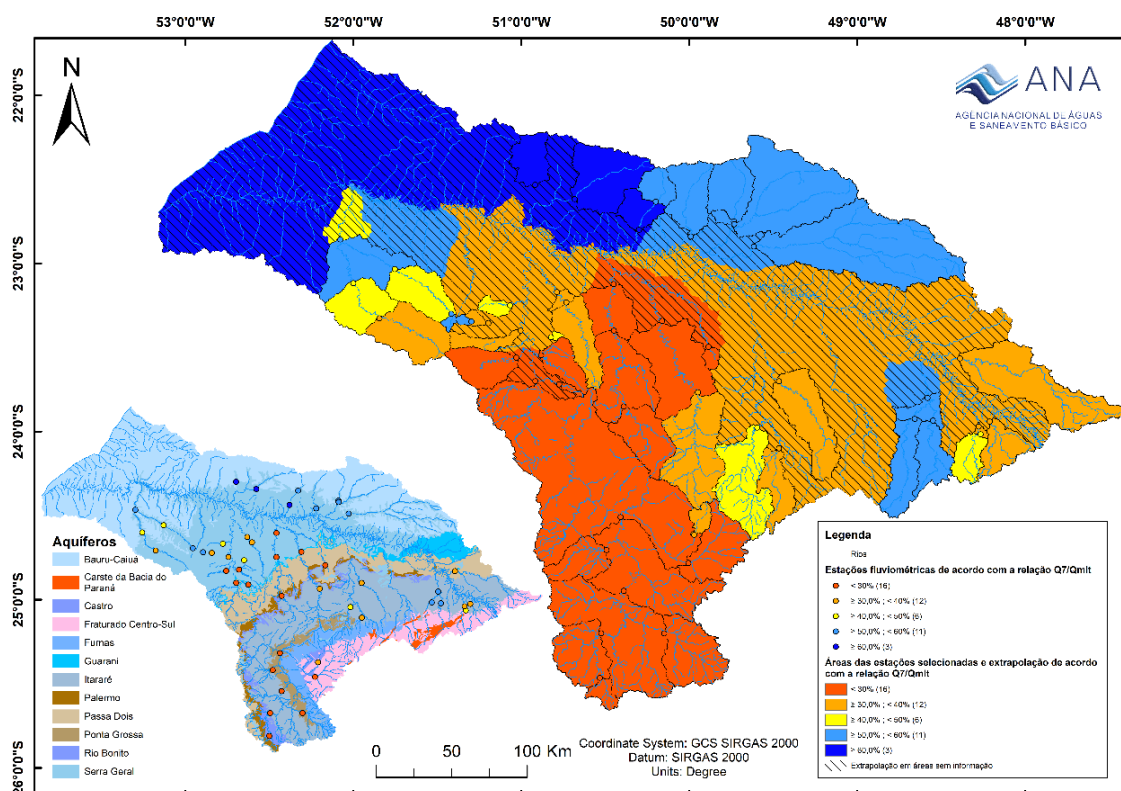
Dado o que foi exposto, **a área mais relevante para a gestão integrada rio/aquífero** na bacia do rio São Francisco é das **bacias hidrográficas dos rios Grande e Corrente**, nas áreas de domínio do Sistema Aquífero Urucuia, em área contígua desse com o Aquífero Cárstico. Trata-se de uma região onde a água subterrânea é um importante subsídio para o desenvolvimento da atividade de agricultura intensiva, com área irrigada cada vez mais crescente, no oeste baiano. Outra região que se mostrou relevante foi aquela relacionada ao rio Salitre, associada ao domínio das rochas carbonáticas do Grupo Salitre.

Com base nas avaliações efetuadas sugere-se não considerar a análise resultante da estação do Submédio (Abreus), tendo em vista que o valor da classe  $Q_7/Q_{mlt}$  não reflete as condições hidrogeológicas locais, além de que o próprio hidrograma da estação do rio Salitre não apresenta período de recessão bem definido, bem como as separações de fluxo com Filtro Duplo e Simples mostraram resultados inapropriados para a avaliação da integração rio/aquífero. Esse cenário é esperado tendo em vista a baixa pluviosidade da região, embora o aquífero tenha uma certa importância local.

## **4. Considerações finais**

A metodologia proposta foi aplicada nas bacias dos rios Paranapanema, Grande e São Francisco com a finalidade de indicar em quais áreas das bacias os rios têm maior dependência das águas subterrâneas (hot spots) para a formação de suas vazões, de forma que se possa estabelecer prioridades de ações para a gestão integrada considerando essa interdependência, em especial na avaliação de disponibilidade hídrica para outorgas superficiais e subterrâneas e nos planos de bacia.

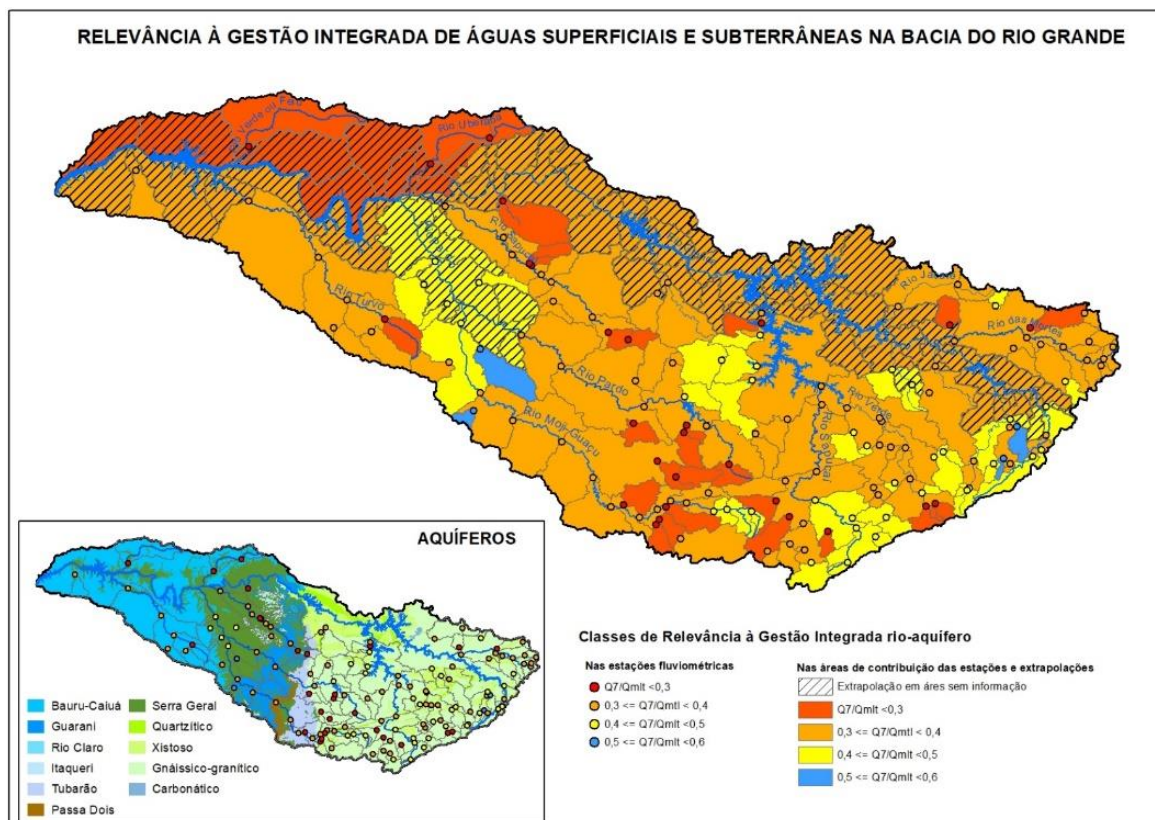
No caso da **bacia do rio Paranapanema** as áreas mais relevantes para a gestão integrada rio/aquífero se localizam a **noroeste** (região de Presidente Prudente), **oeste e norte** no domínio dos sistemas aquíferos Caiuá-Bauru (SABC) e Serra Geral (SASG), onde ocorrem, principalmente, culturas de cana e pastagem. Regiões no meio leste (a partir de Assis), nordeste (Avaré) e oeste (Pirapó) têm relevância indicada como mediana (**Figura 43**).



**Figura 43.** Relevância da gestão integrada rio/aquífero na bacia do rio Paranapanema (detalhe mostrando os sistemas aquíferos).

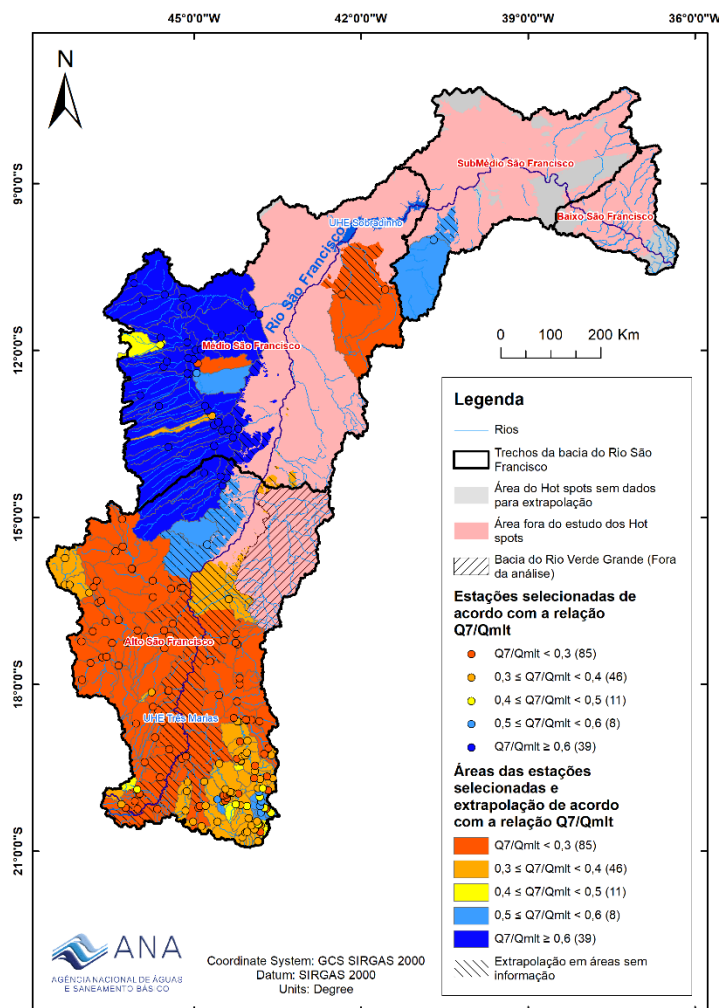
A área mais relevante para a gestão integrada rio/aquífero na **bacia do rio Grande** é a **bacia dos rios Moji-Guaçu e Pardo**, nas áreas de domínio dos sistemas aquíferos Serra Geral (SASG), Guarani (SAG) e Bauru-Caiuá (SABC). Trata-se de uma região com importantes cidades com usos relevantes das águas subterrâneas, como Ribeirão Preto, Barretos e Araraquara.





**Figura 44.** Relevância da gestão integrada rio/aquífero na bacia do rio Grande (detalhe mostrando os sistemas aquíferos).

Por fim, as áreas mais relevantes para a gestão integrada rio/aquífero na **bacia do rio São Francisco** são as das **bacias dos rios Grande e Corrente**, nas áreas de domínio do Sistema Aquífero Urucua (SAU), em área contígua desse com o Sistema Aquífero Cárstico (**Figura 45**). Trata-se de uma região onde a água subterrânea é um importante subsídio para o desenvolvimento da atividade de agricultura intensiva, com área irrigada cada vez mais crescente, no oeste baiano. Outra região que se mostrou relevante foi aquela relacionada ao rio Salitre, associada ao domínio das rochas carbonáticas do Grupo Salitre.



**Figura 45.** Relevância da gestão integrada rio/aquífero na bacia do rio São Francisco.

É importante ressaltar que diversas áreas nestas bacias foram avaliadas com base em extrapolações, utilizando como referenciais informações dos temas de geologia, hidrogeologia, pluviometria, pedologia etc. Portanto, algum grau de discricionariedade está implícito nesses resultados, sendo importante que no futuro sejam realizados estudos de naturalização de séries de vazões (locais com dados afetados por reservatórios), bem como de regionalização de vazões e a instalação de novas estações nos locais com vazios de informação.

Conforme destacado anteriormente, estas bacias já dispõem de Planos de Bacia, que devem ser revisados considerando a indicação das áreas consideradas como mais relevantes neste estudo ( $0,5 \leq Q7/Q_{mlt} < 0,6$  e  $Q7/Q_{mlt} \geq 0,6$ ). Ademais na análise das outorgas de águas subterrâneas e superficiais, também, deverão ser considerados os diferentes graus de interdependência entre elas para o cálculo de uma disponibilidade hídrica mais próxima da realidade.

## **5. Menção**

Destaca-se que o analista de monitoramento Daniel Moreira Dias Batista foi fundamental para a realização da presente Nota Técnica, particularmente no trabalho com as séries fluviométricas, além das bases em SIG e mapas resultantes.

Atenciosamente,

(assinado eletronicamente)  
ADRIANA NIEMEYER PIRES FERREIRA  
Especialista em Regulação de Recursos Hídricos e Saneamento Básico

(assinado eletronicamente)  
LETÍCIA LEMOS DE MORAES  
Especialista em Regulação de Recursos Hídricos e Saneamento Básico

(assinado eletronicamente)  
MÁRCIA TEREZA PANTOJA GASPAR  
Especialista em Regulação de Recursos Hídricos e Saneamento Básico

De acordo, à SPP.

(assinado eletronicamente)  
FERNANDO ROBERTO DE OLIVEIRA  
Coordenador de Águas Subterrâneas

De acordo.

(assinado eletronicamente)  
FLAVIA CARNEIRO DA CUNHA OLIVEIRA  
Superintendente de Planos, Programas e Projetos

